



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UNB)

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (IG)

***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***

EZEQUIEL COSTA E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOLOGIA

Nº 281

Orientadora: Prof. Dra Adalene Moreira Silva

Co-orientadora: Prof. Dra Catarina L. Bemfica Toledo

Banca examinadora: Prof. Dr. José Carlos Sícoli Seoane (IG-UFRJ)

Prof. Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira (IG-UnB)

Brasília – DF

Agosto, 2011

“Assim, pois, não depende do que quer, nem do que corre, mas de Deus, que se compadece.” Romanos 09:16.

Agradeço, primeiramente à Deus, criador de todas as coisas que me guiou, orientou e me deu forças para continuar. Toda honra e toda glória sejam dadas a ti Senhor.

Aos meus pais, Saulo e Noêmia, por terem me mostrado o bom caminho a seguir. Por terem se esforçado em nos dar uma boa educação e nos incentivado a prosseguir adquirindo conhecimento e sabedoria. Também agradeço pelas incansáveis intercessões em meu favor. Tenho certeza que não foram em vão.

Aos meus irmãos, Viviane e Lemuel, pelo incentivo e apoio. Agradeço ao meu irmão, Lemuel, pelos constantes e sábios conselhos e a minha irmã Viviane pela ajuda na finalização dessa dissertação.

À minha cunhada, Dra. Patrícia e ao meu cunhado, Misael, pelo incentivo.

À minha sobrinha linda e inteligente, Maria Cândida. Desculpe os vários momentos em que o titio não pode dar atenção porque estava trabalhando no mestrado.

À minha família, tios (as), primos (as), pelo apoio e a compreensão em ter ficado ausente por um tempo devido às atividades do mestrado.

À minha avó, Cândida Maria da Costa Sousa (*in memoriam*), que está descansando no céu há 3 meses e não pôde ver o primeiro neto da família a concluir um mestrado. Vovó, essa conquista dedico em especial à senhora.

Às minhas orientadoras, Adalene M. Silva e Catarina Toledo, pela orientação, incentivo e confiança. Aprendi muito com vocês.

À Troy/Reinarda Mineração, pela cessão dos dados e confiança, nas pessoas dos geólogos Augusto Mol (Troy's Exploration Director) e Peter Doyle (Troy's VP Exploration). Ao Rodrigo Cortez (Coordenador de Projeto - RML) pelo incentivo e apoio desde o início. Ao amigo Dave Otterman (Troy's Chief Geologist), pelas diversas revisões do artigo que acompanha essa dissertação e também no cheque dos alvos no campo.

À Horizonte Minerals e a Talon Metals Corp pela permissão da publicação dos dados oriundos desse trabalho.

Aos técnicos da Troy/Reinarda, Ricardo, Wagner e auxiliares de campo Jaime, Daniel, João e Luismar, pelo apoio de campo e por terem compartilhado comigo as alegrias nas validações dos alvos com as novas descobertas.

Aos amigos que trabalham na mina subterrânea da RML, os geólogos de mina Adriane (Gerente de Serviços Técnicos) e Natanael, e o topógrafo Paulo Mendes (Supervisor de Topografia), pelas informações disponibilizadas.

Ao grande amigo geólogo Elton Zimmerman, pelas informações relevantes quanto ao histórico da exploração mineira da Província Rio Maria.

À banca examinadora.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1. APRESENTAÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO	4
1.3. MATERIAIS E MÉTODOS	5
1.3.1 Dados Cartográficos	5
1.3.2 Dados Aerogeofísicos da região do terreno granito-greenstone Rio Maria.....	5
1.3.3 Dados Geoquímicos.....	7
1.3.4 SRTM	8
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO 2. CONTEXTO GEOLÓGICO DA PROVÍNCIA RIO MARIA	9
2. O CRÁTON AMAZÔNICO	9
2.1. PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS	11
2.2. PROVÍNCIA RIO MARIA	12
2.2.1 Supergrupo Andorinhas	15
2.2.2 Granitóides Arqueanos	17
2.2.3. Grupo Rio Fresco - Coberturas plataformais.....	17
2.2.4. Suíte Jamon e Diques - Paleoproterozóicos	18
2.2.5. Faixa Araguaia - Neoproterozóica.....	19
2.3. EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA PROVÍNCIA RIO MARIA	20
2.4. MINERALIZAÇÃO AURÍFERA	21
2.4.1. Mineralização Aurífera Lagoa Seca	21
2.4.2. Mineralização Aurífera Mamão/Babaçu.....	23

CAPÍTULO 3. PROCESSAMENTO E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS DO PROJETO ANDORINHAS	27
3. APRESENTAÇÃO	27
3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS	27
3.2 PRODUTOS GERADOS	29
3.2.1 Gradientes medidos e produtos derivados do campo magnético anômalo.....	29
3.2.2 Dados Gamaespectrométricos	36
3.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS	44
3.3.1 Magnetometria	45
3.4 APLICAÇÃO DA GAMAESPECTROMETRIA NO REFINAMENTO DA CARTOGRAFIA GEOLÓGICA NA REGIÃO DO GREENSTONE BELT ANDORINHAS	50
3.5 PRODUTOS DERIVADOS DA GAMAESPECTROMETRIA E SUA APLICAÇÃO NO ENTEDIMENTO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E SUA INTEGRAÇÃO COM DADOS AEROMAGNÉTICOS	58
3.6 ANÁLISE VISUAL INTEGRADA E SUA APLICAÇÃO NA EXPLORAÇÃO MINERAL	61
CAPÍTULO 4. MODELAGEM ESPACIAL UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO NO TERRENO GRANITO-GREENSTONE RIO MARIA, SUDESTE DO PARÁ	64
4. APRESENTAÇÃO	64
4.1. MÉTODOS DE ANÁLISE	64
4.2. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS DO TIPO LODE HOSPEDADO EM GREENSTONE BELT	65
4.3. OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DA ÁREA DE ESTUDO	71
4.4. ANÁLISE POR LÓGICA FUZZY	83
4.4.1. Fuzificação dos dados.....	84
4.4.2. Operações fuzzy	90
4.4.3. Mapas de favorabilidade	90
4.4.3.1. <i>Modelo Regional - Área do Projeto Andorinhas</i>	91
4.4.3.2. <i>Bloco Mamão/Babaçu</i>	93
4.4.3.3. <i>Bloco WRM (Oeste Rio Maria)</i>	95
4.4.3.4. <i>Bloco Malvinas (Votuporanga)</i>	97
4.5. VALIDAÇÃO DOS MODELOS EXPLORATÓRIOS	100
4.5.1. Bloco Mamão.....	102
4.5.3.1. <i>Amostragem e Discussão</i>	107
4.5.2. Bloco WRM - Oeste Rio Maria.....	112
4.5.3.2. <i>Amostragem e Discussão</i>	113
4.5.3. Bloco Malvinas (Votuporanga).....	118
4.5.3.3. <i>Amostragem e Discussão</i>	119

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	123
--	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127
--	------------

ANEXO 1- ARTIGO

1. MINERAL POTENTIAL MAPPING FOR OROGENIC GOLD DEPOSITS IN THE ANDORINHAS GREENSTONE BELT, SOUTHEASTERN PARA STATE, BRAZIL	136
---	------------

*Artigo submetido na revista Economic Geology. Ainda sob análise.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Fluxograma esquemático ilustrando os processos de integração dos dados de acordo com um modelo exploratório para a modelagem espacial e seleção de áreas favoráveis para exploração aurífera no Projeto Andorinhas, sudeste do Pará (Modificado de Pan & Harris 2000 e Nykanen 2008).....	2
Figura 1.2 Mapa de localização da área de estudo, incluindo principais vias de acesso, rede de drenagem e a área de estudo investigado nessa dissertação (Modificado CPRM 2008).	4
Figura 1.3 Ilustração da disposição dos três sensores magnetométricos gradiométricos e da separação entre os mesmos (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).	7
Figura 2.1 Subdivisão do Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas segundo a concepção de Tassinari (1996) e Tassinari & Macambira (1999, 2004). A direita, detalhamento da Província Mineral de Carajás e sua subdivisão em Cinturão Itacaiúnas e o Terreno Granito- <i>Greenstone</i> Rio Maria (Tassinari & Macambira 2004).	10
Figura 2.2 Província Mineral de Carajás (PMC) e localização de seus diferentes depósitos minerais. Em estrela de cor amarela depósitos de ouro tipo Serra Pelada e Mamão; estrelas de cor azul depósitos de Cu/Au/Zn do tipo Igarapé Pojuca; pontos de cor preto depósitos de níquel como Onça-Puma e o outros são depósitos e ocorrências do tipo IOCG (Cu,Fe,Au). Em destaque a área de estudo (Modificado CPRM 2006).....	12
Figura 2.3 Mapa geológico e ocorrências de ouro da área de estudo elaborado pela CPRM (2008).	14
Figura 3.1 Fluxograma ilustrando as transformações lineares. CMA (Campo magnético anômalo), ASA (Amplitude do sinal analítico), Dz, Dx e Dy (Derivadas vertical e horizontais), AGHT (Amplitude do gradiente horizontal total) e ISA (Inclinação do sinal analítico).	30
Figura 3.2 Figura do campo magnético anômalo da área de estudo.	31
Figura 3.3 Mapa da derivada vertical de primeira ordem do campo magnético anômalo gerado para a região da área de estudo. Iluminação com 45° de inclinação e declinação. A imagem ressalta trends NW, NE, NE e áreas com relevo magnético agitado com mais alta frequência evidenciando porções do greenstone belt Andorinhas, porção onde localiza-se a mina do Mamão.....	32
Figura 3.4 Imagens magnetométricas. a) a amplitude do sinal analítico de ordem zero do campo magnético anômalo (ASA); b) imagem da amplitude do gradiente horizontal total usando os gradientes medidos Gx e Gy. Iluminação com 45° de inclinação e declinação.....	34
Figura 3.5 A figura apresenta o gradiente horizontal medido na direção x – Gx em tons cinza.....	35
Figura 3.6 Imagem do gradiente horizontal medido na direção y – Gy para a região do Projeto Andorinhas.....	36
Figura 3.7 Fluxograma ilustrando as etapas de geração dos produtos gamaespectrométricos.....	37

Figura 3.8 Imagem do canal do K (%) da área de estudo.....	38
Figura 3.9 Imagem do canal do Th (ppm) da área estudada.....	39
Figura 3.10 Imagem do canal do U (ppm) da área estudada.	40
Figura 3.11 Composição ternária RGB (KThU) e CMY (KThU) para a área de estudo.....	42
Figura 3.12 Imagem do parâmetro F (Fator F) da área estudada utilizada na tentativa de realçar o enriquecimento em potássio.....	44
Figura 3.13 A figura mostra um mapa de lineamentos magnéticos confeccionado a partir da interpretação dos gradientes medidos (G_x e G_y) e comparação com os gradientes calculados (D_x e D_y). Para consolidar a interpretação foram utilizadas a primeira derivada vertical do campo magnético anômalo e a inclinação do sinal analítico. As diferentes direções estão indicadas acima em cores diferenciadas para facilitar o entendimento dos critérios de corte e superposição observados na interpretação e validados posteriormente em trabalhos de campo na região.....	46
Figura 3.14 Diagrama de rosetas ilustrando as três direções principais associadas à mineralização. Sendo o trend de primeira ordem com direção NE-SW, o de segunda ordem com direção NW-SE e o de terceira ordem com direção aproximada E-W.	49
Figura 3.15 Imagem de composição ternária falsa cor RGB (K,Th,U) mostrando as diferentes assinaturas gamaespectrométricas dos domínios das unidades geológicas que são equivalentes na literatura por: 1 - <i>Greenstone Belt</i> Rio Maria; 2 - <i>Greenstone Belt</i> Andorinhas; 3 - <i>Greenstone Belt</i> Identidade; 4 - Tonalito Arco Verde; 5 - Trondjemito Mogno; 6 – Suíte Sanukitóide Rio Maria; 7 – Granito Xinguara; 8 – Tonalito Caracol; 9 - Grupo Rio Fresco; 10 - Granitos Anorogênicos; 11 - Faixa Araguaia e 12 Suíte Sanukitóide Rio Maria (porém, com assinatura distinta da porção 6). A figura mostra também a localização do depósito Lagoa Seca e da mina de ouro do Mamão hospedados no <i>greenstone belt</i> Andorinhas.....	51
Figura 3.16 <i>Greenstone belts</i> (De acordo com CPRM 2008) realçando porções com alto potássio, na imagem do canal do K%, em três blocos principais, Malvinas, WRM (Oeste de Rio Maria) e Mamão. O canal do potássio foi classificado em três classes de acordo com a percentagem, baixo (branco), médio (- amarelo), alto (vermelha).....	53
Figura 3.17 Imagem ternária falsa cor (RGB) ressaltando regolitos em azul claro, aluviões e dique tardio com direção NW	56
Figura 3.18 Mapa geológico integrado, baseado na análise e interpretação dos dados aerogeofísicos de alta resolução espacial, bem como no conhecimento geológico disponível. Parte das unidades interpretadas não possui uma correspondência com os dados geológicos disponíveis e foram checadas em trabalho de campo. Importante observar que a área da Sequência Vulcano-sedimentar interpretada no produto em apreço se difere da conhecida na literatura possuindo um <i>shape</i> pouco maior. Sugere-se a uma validação de detalhe com trabalho de campo, pois caso seja confirmada, isto aumentaria a potencialidade da área da Província Rio Maria no que tange a discriminação de rochas hospedeiras potenciais.....	57
Figura 3.19 Produtos gamaespectrométricos para realçar o potássio anômalo. a) tem-se o parâmetro F; b) o potássio anômalo (Kd) e c) a razão K/eTh.	61
Figura 3.20 Fluxograma dos produtos usados na análise visual para a seleção de alvos.	62
Figura 3.21 Imagem do parâmetro F com a localização dos 27 alvos exploratórios gerados. Os alvos foram selecionados baseados na inspeção visual de uma avaliação da configuração estrutural e de geologia favoráveis.....	63
Figura 4.1 Diagrama esquemático, proposto por Poulsen <i>et al.</i> (2000), ilustrando os tipos de depósitos orogênicos. A figura também mostra os três tipos de depósitos encontrados na área de estudo: (1) depósito do tipo <i>lode</i> hospedado em <i>greenstone</i> , na área de trabalho representado pelos depósitos do trend Mamão/Babaçu, (2) depósito hospedado em turbiditos como o caso do depósito de Lagoa Seca, (3) depósitos associados à formação ferrífera bandada como o alvo Marcinho.	66
Figura 4.2 Diagrama mostrando as rochas hospedeiras da mineralização aurífera do <i>greenstone belt</i> Andorinhas, Identidade e Rio Maria. A figura ilustra os valores das respectivas porcentagens ressaltando a importância das ocorrências minerais associadas à metavulcânicas máficas, metavulcânicas félsicas e metassedimentos em termos de quantidade de depósitos individuais.	71

Figura 4.3 Localização da área de estudo onde se observa. a) a rede de drenagem e ocorrências sobrepostas ao modelo digital do terreno da área estudada; b) principais lineamentos magnéticos ressaltando os trends auríferos Mamão/Babaçu na direção predominante ENE, WRM (Oeste Rio Maria) na direção predominante ENE-WSW e o trend Malvinas (Votuporanga) com direção predominante WNW. Lineamentos sobrepostos à imagem SRTM (DEM); c) disposição dos três blocos pesquisados em detalhe, indicados pelos polígonos em amarelo a partir da imagem ternária (RGB).	72
Figura 4.4 Fotografias de alguns dos prospectos do <i>trend</i> Mamão-Babaçu cedidos pela Troy/RML. a) Cava do Garimpo Luiza lavrado por garimpeiros nos anos 80. Atualmente tem-se uma reserva, ainda em aberto em dow deep ao longo do plunge para o norte; b) detalhe de furo de testemunho de sondagem mineralizado com metabasalto alterado hidrotermalmente com biotitização, silicificação e piritização com veio de quartzo/carbonato; c) Alvo Coruja NE mapeado com geoquímica de solo, e confirmado com sondagem. Observar a ausência de afloramentos.	73
Figura 4.5 Imagens magnetométricas da área de estudo. a) Amplitude do gradiente horizontal total área de estudo; b) detalhe da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz); c) detalhe da amplitude do gradiente horizontal total (calculada com uso dos gradientes medido Gx e Gy) integradas com os principais lineamentos magnéticos.	75
Figura 4.6 Detalhe da imagem parâmetro F sobre o bloco Mamão-Babaçu. Notar que a maioria dos prospectos da região estão associados a altos valores do parâmetro F. O produto permite auxiliar na caracterização de zonas enriquecidas em potássio hidrotermalmente.....	76
Figura 4.7 Fotografias de alguns dos prospectos do bloco WRM. a) <i>shaft</i> no garimpo Manoel; b) visada E-W do garimpo Bezzerro; c) garimpo do Anastácio em atividade com lavra em pequenos <i>shafts</i>	78
Figura 4.8 Chip de sondagem RC do alvo Manoel. Em destaque a intensa silicificação da encaixante máfica/vulcanoclástica (Dados cedidos pela Troy/Reinarda Mineração).....	79
Figura 4.9 Imagem do parâmetro F com transformação linear para melhor visualização dos alto valores. Em destaque o <i>trend</i> NW-SE dos prospectos Malvinas, Votuporanga e Pampeana.	80
Figura 4.10 Mapa geológico do bloco Malvinas destacando as zonas de cisalhamento NW-SE. O mapa está sobreposto à imagem da inclinação do sinal analítico (ISA).	81
Figura 4.11 Metodologia da modelagem espacial para a Lógica Fuzzy (Nykänen <i>et al.</i> 2008).	83
Figura 4.12 Gráfico da função de pertinência fuzzy para um conjunto de dado de entrada. Os valores no mapa menores que 10 correspondem ao zero da função de pertinência, ou seja, não apresentam relação com o objeto de pesquisa. Em contraste, os valores acima de 48 apresentam pertinência total (Pertinência fuzzy = 1).	84
Figura 4.13 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um <i>expert</i> . A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos e mapeados nesse trabalho. Modelo 1) alta pertinência para as vulcânicas félsicas e máficas.	86
Figura 4.14 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um <i>expert</i> . A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos. Modelo 2) alta pertinência para as formações ferríferas e vulcânicas máficas.....	87
Figura 4.15 Fuzzificação das principais estruturas com <i>buffers</i> em zonas sucessivas de 0 à 200 metros, sendo um alto valor de pertinência de 0.95 entre 0 - 100 metros e 0.5 entre 100 - 200 metros.	89
Figura 4.16 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica <i>fuzzy</i> para o modelo regional da área de estudo.....	92
Figura 4.17 Mapa de potencialidade mineral para ouro gerado para a área do Projeto Andorinhas com operador <i>fuzzy</i> gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos e os círculos em azul mostram novos alvos com maior favorabilidade. Modelo sobreposto à imagem SRTM.	92
Figura 4.18 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica <i>fuzzy</i> para o modelo bloco Mamão/Babaçu.	94
Figura 4.19 Mapa de favorabilidade aurífera em 2.5D para o bloco Mamão/Babaçu usando o operador <i>fuzzy</i> gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.....	94
Figura 4.20 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica <i>fuzzy</i> para o modelo bloco WRM (Oeste Rio Maria).....	96
Figura 4.21 Mapa de favorabilidade aurífera em 2.5D para bloco Oeste Rio Maria usando o operador <i>fuzzy</i> gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.....	96
Figura 4.22 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica <i>fuzzy</i> para o modelo bloco Malvinas (Votuporanga).	98

Figura 4.23 Mapa de favorabilidade aurífera para o bloco Malvinas em 2.5D usando o operador fuzzy gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos e os círculos em azul os alvos com maior favorabilidade.	98
Figura 4.24 Mapa ilustrando o somatório dos três modelos para a região do Projeto Andorinhas destacando a potencialidade aurífera para a região, considerando o somatório dos vetores de exploração.	99
Figura 4.25 A imagem mostra o grid de ouro gerado a partir de dados de sedimento de corrente interpolados usando o inverso da distância ponderada com o posicionamento dos 81 alvos selecionados para serem validados. Os 81 alvos incluem os dois métodos, de interpretação e modelagem para a seleção de áreas prospectivas.	101
Figura 4.26 a) A figura mostra a distribuição dos blocos dentro da área de estudo e os alvos selecionados; b) A figura mostra os alvos selecionados confrontados com as estruturas mapeadas dentro do presente trabalho; c) imagem do gradiente horizontal em X medido a bordo da aeronave e d) imagem do parâmetro F integrado com os alvos mapeados nesse trabalho.	102
Figura 4.27 Figura em 3D da Mina do Mamão destacando os três corpos (<i>lode</i>) que estão sendo lavrados desde 2008. O Melechete é o corpo principal sendo garimpado no passado por garimpeiros da região em <i>open pit</i> (cor verde superfície) e também em galerias (Reinarda Mineração/Troy Resources, 2011).	104
Figura 4.28 a) Localização do bloco Mamão no Greenstone Andorinhas; b) localização dos alvos selecionados no bloco, em vermelho alvos da interpretação geofísica, em azul alvos da modelagem <i>fuzzy</i> e c) fotos de amostras coletadas em campo durante mapeamento geológico mostrando rochas cisalhadas com alteração hidrotermal como biotitização, silicificação e sulfetação.	105
Figura 4.29 Os perfis ilustram dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gy) na linha de voo L12970 e da linha de amostragem de solo para ouro. Abaixo se destacam as imagens gamaespectrométricas e magnetométricas recortadas para a área de detalhe em 2.5D. O alvo Marcinho e a Mina do Mamão estão indicados nas imagens bem como o posicionamento da linha de voo.	106
Figura 4.30 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.	107
Figura 4.31 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.	108
Figura 4.32 Validação alvo Marcinho. a) Mapa ilustrando grid das amostras de solo para Au do alvo Marcinho integrados com geoquímica de ouro em rocha, interpolado com o inverso da distância ponderada, bem como a programação de sondagem sobre dois principais <i>trends</i> anômalos. b) Perfil de sondagem ao longo da linha 629950 mE. Furo de circulação reversa (RC) com 80m de profundidade interceptando duas zonas mineralizadas associadas à formação ferrífera com sulfetação e veio de quartzo com ouro.	110
Figura 4.33 Imagem em 3D dos interceptos mineralizados do alvo Marcinho. a) visualização no sentido NE-SW, onde se observa as duas zonas mineralizadas e b) visualização de E para W, observa-se as duas zonas mineralizadas mergulhando aproximadamente 45° para norte ao longo da direção E-W.	111
Figura 4.34 a) mapa de localização do alvo Resende mostrando as duas cavas garimpeiras descobertas neste estudo; b) bloco de quartzo com ouro visível; c) veio de quartzo com pirita, calcopirita e galena; d) Cava do alvo Resende mostrando a encaixante máfica cisalhada mergulhando 55° para norte.	113
Figura 4.35 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML no bloco Oeste Rio Maria.	114
Figura 4.36 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre os principais alvos selecionados no bloco Oeste Rio Maria.	114
Figura 4.37 Imagens do parâmetro F (a) e da razão K/eTh (b) geradas na tentativa de realçar potassificação associada com processos hidrotermais. Dados de geoquímica de ouro em rocha estão apresentados por quadrados brancos. Amostras de rochas com altos teores de ouro, com até 70 g/t Au, validam o alvo Resende. As zonas de garimpo denominadas de Manoel, Anastácio e Bezerra também são mostradas.	116
Figura 4.38 Imagem da Contagem Total com os traços das linhas de voo na região do alvo Resende. Em detalhe observa-se a linha de voo (L10290) que corta a área mineralizada e área a amostragem geoquímica (polígono em vermelho) e as linhas de amostragem geoquímica para ouro em solo.	116
Figura 4.39 Dados gamaespectrométricos (Kd e parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gx) relacionados à linha de voo L10290. Destaque para a área do alvo Resende em cor cinza claro.	117
Figura 4.40 Imagem em 2,5D de dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F e razão K/eTh). Notar o alvo Resende NW e o alvo Resende ao lado.	118

Figura 4.41 a) Localização do bloco Malvinas; b) Detalhe do alvo Votuporanga em dia de mapeamento geológico; c) Contato de vulcânicas máficas e ácidas associados a finas lentes de veio de quartzo mineralizados; d) Detalhe de um veio de quartzo com ouro livre, <i>boxwork</i> e sulfetos.	120
Figura 4.42 Amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML, sobre o bloco Malvinas, alvo Votuporanga.....	120
Figura 4.43 Malha de amostragem geoquímica de ouro em solo sobre dois dos doze alvos selecionados no bloco Malvinas (Votuporanga).	121
Figura 4.44 Detalhe da amostragem geoquímica de ouro em solo no alvo Votuporanga. Observa-se extensas áreas com teores anômalos maiores que 100ppb e amostras de rochas com ouro visível no centro da área em círculo azul.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Estatística dos dados originais dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo de Andorinhas.....	27
Tabela 3.2 Estatística dos dados corrigidos dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo de Andorinhas.....	28
Tabela 4.1 Principais características dos ambientes de formação de depósitos de ouro do tipo orogênico (Robert <i>et. al</i> 2005).....	68
Tabela 4.2 Principais características dos depósitos e ocorrências auríferas do tipo <i>lode</i> arqueano e <i>stock</i> calci-alcálico do Terreno granito- <i>greenstone</i> Rio Maria, adaptado de Huhn (1992) e Santos (1995).	70
Tabela 4.3 Principais características das ocorrências auríferas do <i>trend</i> mineralizado Mamão/Babaçu. ..	77
Tabela 4.4 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Oeste Rio Maria (WRM).	79
Tabela 4.5 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Malvinas.	82
Tabela 4.6 Unidades identificadas no mapa geológico associados aos valores de pertinência fuzzy para os dois modelos: Modelo 1 – mineralização associada ao contato unidades félsicas/máficas; Modelo 2 – mineralização associada à formação ferrífera bandada/máficas.....	87

RESUMO

Integração de dados geofísicos e geológicos com ênfase na geração de alvos potenciais para exploração aurífera em terrenos granito-greenstone na região sudeste do Pará.

O Terreno granito-greenstone Rio Maria é caracterizado pela extensa cobertura superficial e pela falta de afloramentos, com isso levantamentos aerogeofísicos desempenham um papel importante na exploração mineral da região. Um levantamento aerogeofísico regional de alta resolução foi usado para auxiliar no mapeamento geológico e seleção de alvos. Este levantamento também foi essencial para melhorar o entendimento das unidades geológicas do terreno granito-greenstone da área de estudo. A integração das informações geradas pela interpretação dos dados magnéticos gradiométrico e gamaespectrométricos resultaram na discriminação de vários domínios lito-estruturais e zonas de alteração hidrotermal. A capacidade dessa técnica de identificar alvos favoráveis com potencial econômico para mineralização aurífera foi verificada comparando os novos alvos gerados com as ocorrências de ouro já conhecidas (mina do Mamão, depósito Lagoa Seca e Babaçu).

Este estudo apresenta modelos prospectivos para mineralização de ouro baseado na integração de dados aerogeofísicos (magnetométrico gradiométrico e gamaespectrométrico) e geológicos utilizando técnicas da lógica *fuzzy* na geração de modelos espaciais para seleção de alvos potenciais para mineralizações de ouro orogênicas. Regionalmente, um total de 81 novos alvos com potencial aurífero foram identificados dentro do terreno granito-greenstone Rio Maria, sendo que essa técnica também identificou com sucesso várias ocorrências já conhecidas. Vários dos novos alvos associados com mineralização do tipo *lode-gold* detectados dentro do Projeto Andorinhas foram inicialmente checados no campo com mapeamento geológico de reconhecimento e amostragem de rochas. Os alvos Marcinho, Resende e Votuporanga foram posteriormente acompanhados com avaliações de campo mais sistemáticas consistindo em mapeamento geológico de detalhe e malhas de solo programadas com base nas análises geoquímicas de amostras de rocha.

Um programa de sondagem preliminar está em andamento para avaliar os três alvos principais onde a malha de amostragem de solo e rocha delinearam tendências (*trend*) anômalas, as quais são: Marcinho, Votuporanga e Resende. Os 78 novos alvos restantes também garantem futuros trabalhos prospectivos. Integração de dados usando interpretação geofísica visual e a modelagem espacial da lógica *fuzzy* resultaram nas seguintes conclusões com respeito ao potencial para a exploração mineral de ouro do tipo *lode* na província Rio Maria: (a) baseado na análise espacial, existe um considerável potencial para depósitos do tipo *lode* ao longo do *Greenstone Belt* Andorinhas e várias áreas potenciais podem ser definidas associadas com unidades máficas e formação ferrífera; (b) vários depósitos associados aos *greenstones belts* Rio Maria e Identidade estão relacionados a unidades félsicas como demonstrado nos modelos da lógica *fuzzy*; (c) muitas das ocorrências conhecidas foram evidenciadas pelos métodos de modelagem de seleção de alvos onde deverão ser reavaliados com foco em trabalhos de mapeamento geológico de detalhe e novos dados gerados para identificar aqueles que podem ser desenvolvidos como alvos de exploração de alta prioridade.

Palavras chave: lógica fuzzy, mapas de favorabilidade mineral, Terreno granito-greenstone Rio Maria, mineralização aurífera, orogênico.

ABSTRACT

Geophysical and Geological Data Integration with emphasis in selection of potential targets for gold exploration in Granite-greenstone terrains in Southeast Para

The Rio Maria Granite-Greenstone Terrain is characterized by extensive surficial cover and a lack of outcrops, therefore airborne geophysics play a major role in mineral exploration in this region. A high-resolution regional airborne survey was used to assist in geological mapping and target selection. This regional airborne was also able to enhance the understanding of bedrock geology of greenstone terrain. The integration of information generated by the interpretation of the magnetic gradiometry and gamma-spectrometric data has resulted in the discrimination of several litho-structural domains and hydrothermal alteration zones. The ability of this processing technique to identify favorable targets with potential for economic gold mineralization was verified by comparing the new targets with known gold occurrences (i.g. Mamão Mine and Lagoa Seca Deposits).

This dissertation presents prospective models for gold targeting based on the integration of airborne geophysics (magnetic gradiometry and gamma-ray) and geological data employing fuzzy logic techniques to derive spatial models and select new potential targets for orogenic gold mineralization. Regionally within the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain a total of 81 potential new gold targets were identified and this technique successfully identified the known gold occurrences. Several of the new targets associated with lode-type gold mineralization detected within the Andorinhas Project were initially field checked with reconnaissance geological mapping and grab sampling. Marcinho, Resende and Votuporanga, were subsequently followed-up with more systematic field evaluations consisting of detailed geological mapping and grid-based soil and rock sampling.

A follow-up drilling program is underway to assess the three main target areas where grid soil and rock sampling have delineated anomalous trends, they are Marcinho, Votuporanga and Resende. Of the remaining 78 new targets warrant further investigation. Data integration using GIS and interpretation resulted in the following main conclusions with respect to lode-type gold exploration potential in the Rio Maria Province: (a) based on the GIS-based prospectivity analysis, there is considerable potential for lode-type gold deposits along the Andorinhas Greenstone Belt, and several prospective areas can be defined associated with mafic and iron formation units; (b) several deposits within Rio Maria and Identidade Greenstone Belts are associated with felsic units as demonstrated by the fuzzy logic models; (c) Many of the known occurrences were highlighted by this targeting and should be re-evaluated with a focused effort to bring together detailed geological data and new data generated to identify those which may be developed into high priority exploration targets.

Keywords: fuzzy logic, mineral potential maps, Rio Maria granite-greenstone Terrain, gold mineralization, orogenic.

1. APRESENTAÇÃO

Levantamentos magnéticos gradiométricos, associados com dados gamaespectrométricos de alta resolução, constituem um salto tecnológico dentro das tecnologias disponíveis em aerogeofísica para detecção de estruturas relevantes para a exploração mineral. A combinação dos gradientes medidos (G_x e G_y) com produtos derivados da combinação dos canais de K, eTh e eU tem mostrado eficácia na seleção de alvos para *follow up* em terrenos tropicais (Ruy 2009, Carrino 2010, Costa-Silva *et al.* 2010).

A atividade mineira no terreno granito-*greenstone* de Rio Maria (TGGRM) está historicamente ligada à mineralização aurífera. Desde o final da década de 70, o ouro vem sendo extraído das aluviões através de garimpagem manual, ou por lavra com diferentes graus de mecanização. O virtual esgotamento das reservas aluvionares, nas áreas tradicionalmente garimpadas, levou à descoberta de dezenas de mineralizações primárias nesta região, muitas das quais são exploradas até hoje (e.g. Mina do Mamão). Nas últimas décadas, apesar da utilização de técnicas de exploração consagradas, ainda não foram encontrados novos depósitos primários na região e urge o mapeamento de novos alvos não tão evidentes em superfície e em sub-superfície.

Para que essa meta seja alcançada é necessário atender as demandas atuais em exploração mineral que requerem o emprego de tecnologias bem mais avançadas e eficientes, como o uso de geofísica e sistemas especialistas (**Figura 1.1**) (Silva 1999, Teixeira 2003, Nykänen 2008, Ruy 2009, Carrino 2010, Zacchi 2010).

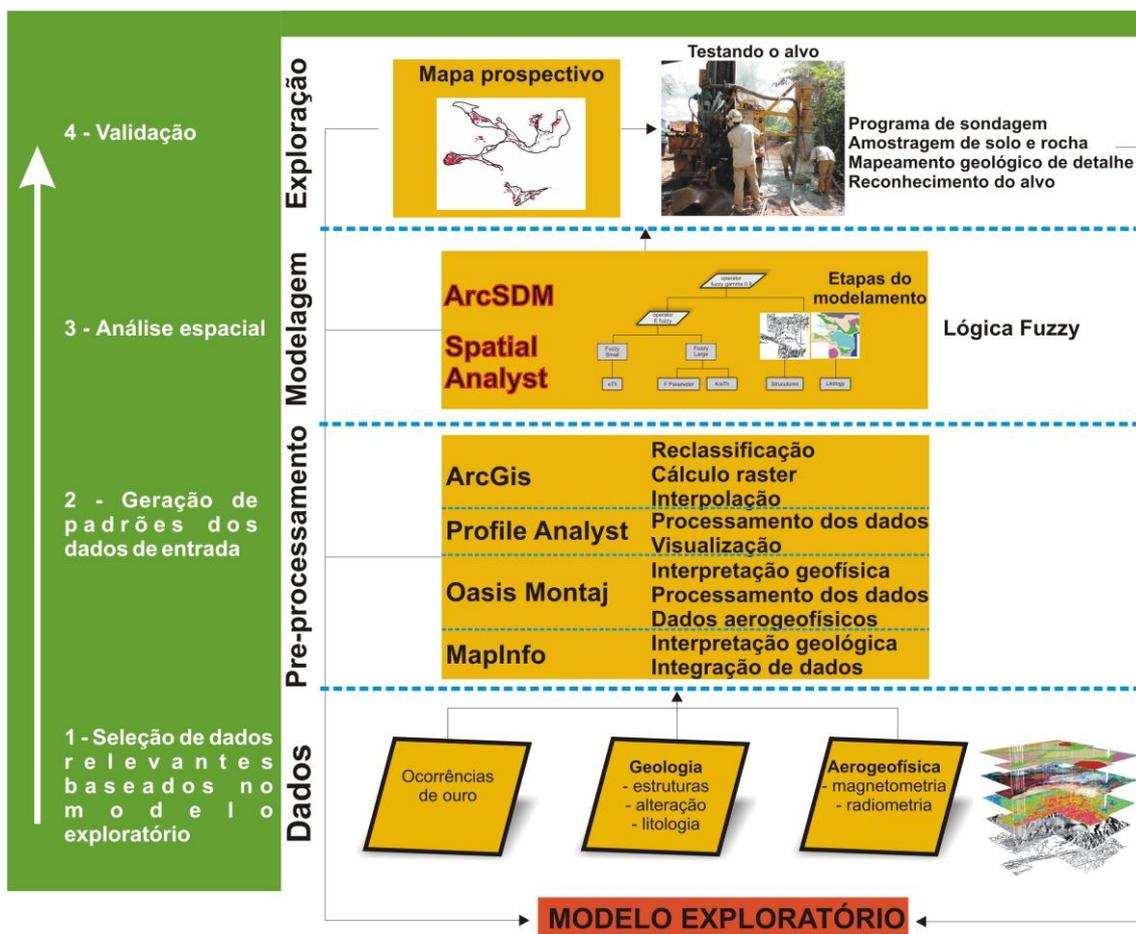


Figura 1.1 Fluxograma esquemático ilustrando os processos de integração dos dados de acordo com um modelo exploratório para a modelagem espacial e seleção de áreas favoráveis para exploração aurífera no Projeto Andorinhas, sudeste do Pará (Modificado de Pan & Harris 2000 e Nykänen 2008).

Na região do terreno granito-*greenstone* Rio Maria ocorrem alguns depósitos de ouro do tipo *lode* (Babaçu, Serrinha, Mamão, Diadema, Identidade, Malvinas e Seringa) e outros associados a intrusões calci-alcalinas como o Depósito Cumaru (Souza 1999, Dardenne & Schobenhaus 2000). Os trabalhos de pesquisa efetuados na região pela Rio Doce Geologia e Mineração S/A – DOCEGEO foram iniciados em 1973, visando a seleção de alvos para metais base. Desde então, inúmeras empresas vem realizando trabalhos de pesquisa e exploração mineral gerando um considerável acervo de dados. Em 2006, a Reinarda Mineração Ltda, empresa do Grupo Troy Resources NL da Austrália, fez a aquisição de dados aeromagnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos de alta resolução. Em 2007 a Reinarda começou a explorar a

mina de Lagoa Seca e em 2008 deu início o desenvolvimento da mina subterrânea do Mamão. Paralelo à lavra dos depósitos, uma equipe de pesquisa deu início a um programa de mapeamento geológico de detalhe acompanhado de aquisição de dados geoquímicos.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo a análise integrada de dados geológicos, aerogeofísicos e geoquímicos para geração de um modelo prospectivo para ouro, na região do *Greenstone Belt* Andorinhas, visando gerar subsídios para a definição de áreas favoráveis à exploração mineral na região de Rio Maria, Pará. Para isso foi utilizado um robusto acervo de dados, adequado a esta meta, contendo um levantamento aeromagnético gradiométrico e gamaespectrométrico de alta resolução, dados geológicos, topográficos e mapas contendo a localização e contexto geológico dos depósitos e ocorrências minerais.

1.1. OBJETIVOS

O estudo aqui proposto tem como objetivo central a aplicação de técnicas de processamento e análise integrada dos dados aerogeofísicos de alta resolução com o intuito de definir áreas favoráveis para mineralizações auríferas na Província Rio Maria.

Para tanto, será efetuada a análise espacial de variáveis indicativas da existência de concentrações minerais dentro da grande área coberta pelos dados aerogeofísicos, segundo critérios geológicos e metalogenéticos, visando atender os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e mapear estruturas regionais e locais, utilizando dados aerogeofísicos e informações de campo, com o intuito de definir zonas de influência metalogenética;
- b) entender, através da análise de dados gamaespectrométricos, o padrão de variação da concentração dos radioelementos K, Th e U e sua distribuição espacial, visando relacioná-los a eventos mineralizantes isolados ou sucessivos;
- c) refinar as técnicas de análise espacial, no ambiente de sistemas de informações geográficas, baseadas em lógica *fuzzy*, para produzir mapas prospectivos convenientes para a interpretação geológica e exploração mineral na área de estudo.

1.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO

A área estudada faz parte da Província Rio Maria, localizada no Cráton Amazônico a sudeste do Estado do Pará, norte do Brasil, entre $49^{\circ}70'W$ e $50^{\circ}40'W$ e $7^{\circ}S$ e $7^{\circ}60'S$ (**Figura 1.2**). Ocorre a sul da Província Mineral de Carajás nos municípios de Xinguara, Rio Maria e Floresta do Araguaia (PA), distando aproximadamente 260 km a sudoeste de Marabá, ao longo da PA - 150.

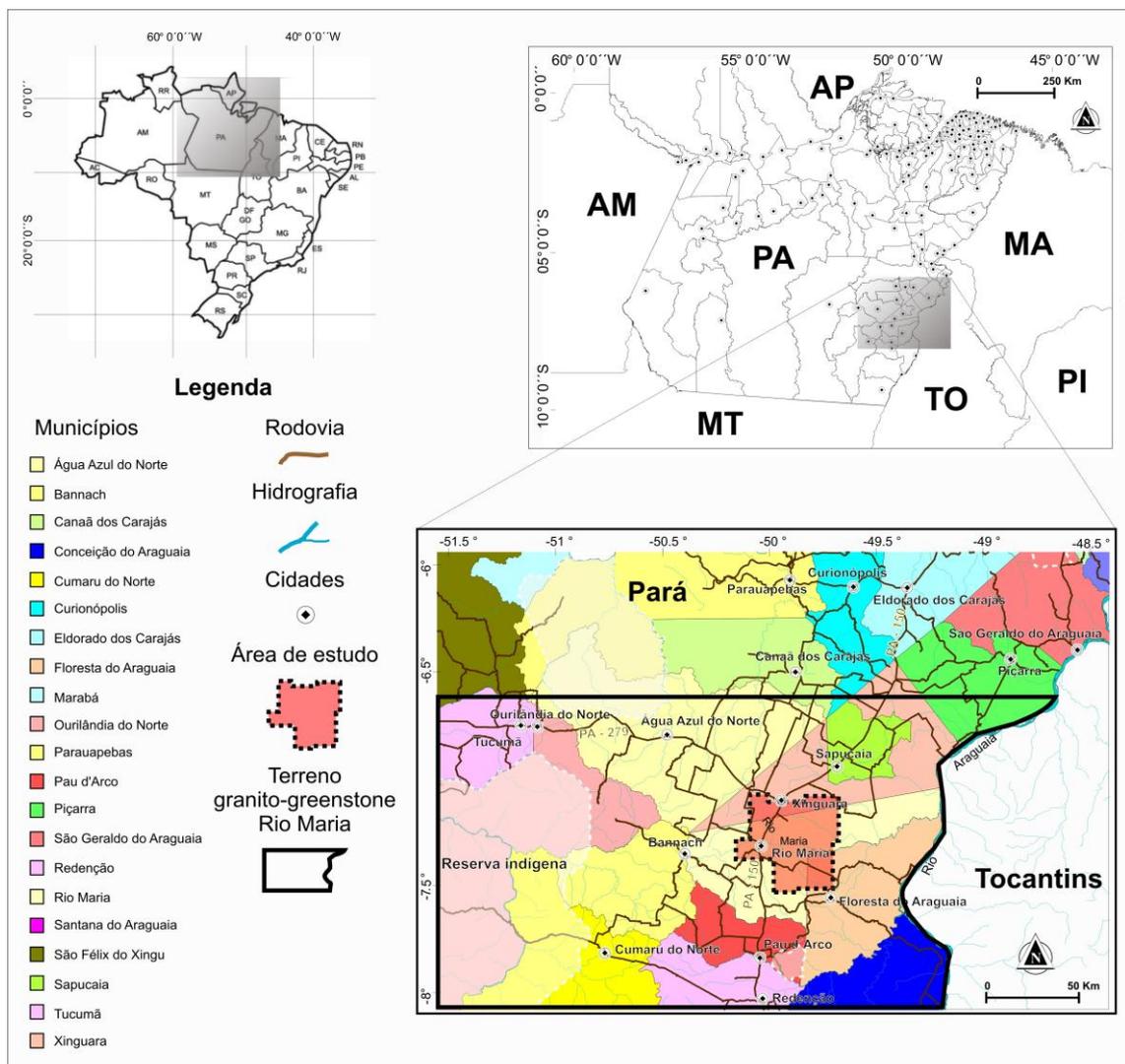


Figura 1.2 Mapa de localização da área de estudo, incluindo principais vias de acesso, rede de drenagem e a área investigada nessa dissertação (Modificado CPRM 2008).

1.3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a elaboração do presente trabalho, foram utilizados dados aerogeofísicos que passaram por diversos procedimentos para que pudessem ser extraídas informações necessárias ao realce de áreas favoráveis à prospecção de ouro em ambiente do tipo *greenstone*. Na análise proposta utilizou-se dados geológicos provenientes de levantamentos geológicos de detalhe, complementados por levantamentos de maiores detalhes realizados em áreas específicas, em associação com dados geoquímicos de solo, rocha e sedimento de corrente.

1.3.1 Dados Cartográficos

A base cartográfica consiste na folha topográfica Xinguara (SB.22-Z-C) de escala 1:250.000, além do mapa geológico e metalogenético, ambos provenientes da CPRM 2008. Também foram utilizados mapas geológicos de detalhe da Troy/Reinarda Mineração na escala 1:10.000.

1.3.2 Dados Aerogeofísicos da região do terreno granito-greenstone Rio Maria

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridas pela Reinarda Mineração Ltda, empresa do Grupo Troy Resources NL da Austrália. O levantamento aerogeofísico foi efetuado pela empresa Lasa em Dezembro de 2007. A área de estudo foi recoberta com dados aerogeofísicos magnéticos gradiométricos e gamaespectrométricos de alta densidade de amostragem com o objetivo de identificar novos alvos auríferos nesta porção do terreno granito-*greenstone* Rio Maria. As linhas de vôo e linhas de controle são espaçadas de 125 e 1.500 metros respectivamente. A altura de vôo foi fixada em 100 metros sobre o terreno. A área coberta é de aproximadamente 1.952 km², incluindo 16.924 km lineares e teve como características do levantamento:

- Intervalo entre as medições geofísicas:

0.1 segundos (magnetômetro)

0.1 segundo (gamaespectrômetro)

- Altura média de vôo: 100 metros;
- Espaçamento das linhas de vôo de direção N-S: 125 metros;
- Espaçamento das linhas de controle de direção E-W: 1500 metros;
- Área total: 1952 Km²;
- Aeronave: Cessna, modelo 208 – Grand Caravan, prefixo PR-FAZ, com velocidade média de 270 km/h. O sistema de navegação DGPS correspondeu ao receptor Trimble AgGPS 132, de 12 canais.

O gamaespectrômetro empregado é um EXPLORANIUN, modelo GR-280, de 256 canais espectrais onde o espectro de cada um dos cristais detectores é analisado individualmente para determinação precisa dos fotopicos de potássio, urânio e tório. Uma correção linear é aplicada individualmente a cada cristal, mantendo o espectro permanentemente alinhado. As radiações gama detectadas são somadas e as leituras reduzidas a uma única saída de 256 canais espectrais. Uma leitura foi realizada a cada segundo (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

O aeromagnetômetro de bombeamento ótico é constituído por 3 sensores de vapor de cézio SCINTREX, modelo CS-2, com resolução de 0,001 nT, para registro de dados de campo magnético total e dos gradientes horizontais lateral (Gx) e longitudinal (Gy). A taxa de amostragem equivaleu a 10Hz. Os sensores foram colocados nas pontas das duas asas e na cauda da aeronave. O sinal do receptor é recebido por pré-amplificadores inseridos na base do cone da cauda e enviado ao sistema de aquisição aeromagnética FASDAS. Dez leituras de dados magnetômetro foram realizadas a cada segundo (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

O cálculo dos gradientes medidos, Gx e Gy, foi efetuado pela Lasa Engenharia e Prospecções S.A. (2008). O gradiente lateral (Gx) representa a diferença dos valores medidos nos dois sensores presentes nas asas da aeronave, sendo este valor dividido pela respectiva distância entre os mesmos (15,75m). Já o gradiente longitudinal (Gy) equivale à média dos valores registrados pelos sensores localizados na asa da aeronave, posteriormente subtraída do valor adquirido pelo sensor da fuselagem (**Figura 1.3**). Este

resultado foi dividido pela distância entre a localização dos sensores da asa e o da fuselagem (12,7m) (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

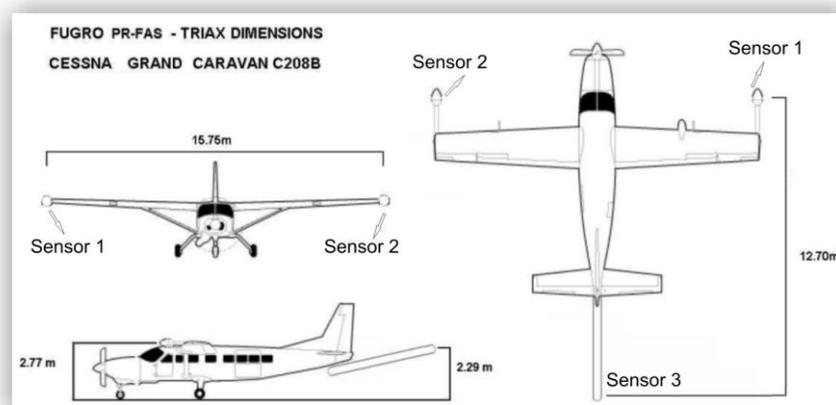


Figura 1.3 Ilustração da disposição dos três sensores magnetométricos gradiométricos e da separação entre os mesmos (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

Antecedendo a integração dos dados aerogeofísicos, geológicos e geoquímicos, foi realizado o processamento e análise dos dados em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento com a obtenção dos mapas transformados. Detalhes dessa etapa são apresentados no Capítulo 3.

1.3.3 Dados Geoquímicos

Os dados geoquímicos disponíveis referentes à concentração de ouro compreendem aqueles cedidos pela empresa Reinarda Mineração Ltda (RML). Os dados geoquímicos cedidos pela empresa são relativos a cerca de 502 amostras de sedimento de corrente, 2800 amostras de solo e 640 amostras de rocha analisadas apenas para ouro.

As análises para ouro em solo foram analisadas pelo método *Fire Assay* (fusão e copelação) para ouro somente. Essas amostras foram realizadas pela Lakefield Geosol. Já os dados geoquímicos de rochas foram obtidos a partir de análises por absorção atômica, digeridos com água régia ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$), no próprio laboratório da RML. Das 640 amostras de rocha, 24 delas foram realizadas segundo a rotina 4A e 4B do Laboratório ACME – Analítica Laboratórios Ltda, Canadá. Nestas rotinas, os elementos maiores são analisados por ICP-AES, S e C em forno Leco, e os elementos terras raras,

refratários, metais preciosos e metais base no ICP-MS. Os elementos maiores, terras raras e refratários são anteriormente fundidos por metaborato e tetraborato de Li e digeridos em ácido nítrico. Os metais preciosos e metais base são digeridos por água régia.

Cerca de 37 amostras de sedimento de corrente foram coletadas para o trabalho. Para a coleta das amostras no campo, a equipe toma a confirmação da localidade do ponto usando GPS e mapa-base. Antes de iniciar a coleta, a equipe procura se assegurar de que o ponto de amostragem está a 200 m drenagem acima de qualquer confluência. Também certifica-se que não existe a montante do ponto proposto nenhuma estrada, represa, garimpo ou outro fator antrópico que poderia influenciar na qualidade da amostragem. Segundo Carranza & Hale (1997) amostragem de sedimento de corrente pode ser realizada em regiões: *browfield* onde o controle da mineralização é conhecido; ou em regiões *greenfield* onde não há ocorrências minerais conhecidas. Este estudo se enquadra no primeiro caso, com várias ocorrências minerais com recobrimento de sedimento de corrente. Essas amostras foram realizadas segundo a rotina ICP40B da Lakefield Geosol em Belo Horizonte.

1.3.4 SRTM

Foram usados dados altimétricos com contornos de 10 metros geradas pelo SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Esses dados foram utilizados para complementar a interpretação dos dados aerogeofísicos (Globesar 2006).

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este documento de dissertação está estruturado na forma de capítulos no desenvolvimento do estudo além de um artigo, em anexo, que aborda de forma pormenorizada os principais desenvolvimento e resultados do mestrado com o título: “*Mineral Potential Mapping for Orogenic Gold deposits in the Andorinhas Greenstone Belt, Southeastern Para State, Brazil*”. O mesmo já foi submetido na revista *Economic Geology* e será apresentado em anexo.

2. O CRÁTON AMAZÔNICO

A Província Mineral de Carajás (PMC) situa-se na porção sudeste do Pará, na borda do Cráton Amazônico. O Cráton Amazônico caracteriza-se por núcleos arqueanos e proterozóicos e é limitado pelas faixas móveis neoproterozóicas do Araguaia e Tucava (Bolívia) (Tassinari & Macambira 2004).

Hasui *et al.* (1984) e Costa & Hasui (1997) propuseram uma subdivisão do Cráton Amazônico a partir de um modelo baseado no retrabalhamento de crosta antiga e rejuvenescimento isotópico de grandes blocos crustais articulados (do Arqueano ou Proterozóico), que formariam um mosaico de limites NE-SW e NW-SE (Cinturões transcorrentes ou de cavalgamento). Neste modelo, os blocos crustais compreenderiam os terrenos de médio a baixo grau (granito-*greenstone*), além dos terrenos de alto grau (cinturões granulíticos).

Propostas mais recentes para a segmentação desse cráton envolvem a diferenciação isotópica e geológica do mesmo, considerando-se a origem por meio de sucessivos eventos de acreção continental a um proto-craton arqueano a partir de episódios de subducção de crostas oceânicas entre ~1,95 e ~1,10 Ga. As Províncias geocronológicas passaram a ser definidas como grandes zonas de áreas cratônicas, nas quais há predomínio de padrões geocronológicos e similaridades de idades isotópicas (Tassinari & Macambira 2004). Neste contexto, duas propostas foram definidas, uma de Tassinari (1996) e outra de Santos *et al.* (2000), ambas posteriormente revistas.

A proposta de Tassinari (1996), revista por Tassinari & Macambira (1999, 2004), apresenta a subdivisão do cráton em seis províncias geocronológicas distintas: (a) Província Amazônia Central (>2,5 Ga); (b) Província Maroni-Itacaiúnas (2,20 a 1,95 Ga); (c) Província Ventuari-Tapajós (1,95 a 1,80 Ga); (d) Província Rio Negro-Juruena (1,80 a 1,55 Ga); (e) Província Rondoniana-San Ignácio (1,55 a 1,30 Ga); (f) Província Sunsás (1,30 a 1,00 Ga) (**Figura 2.1**).

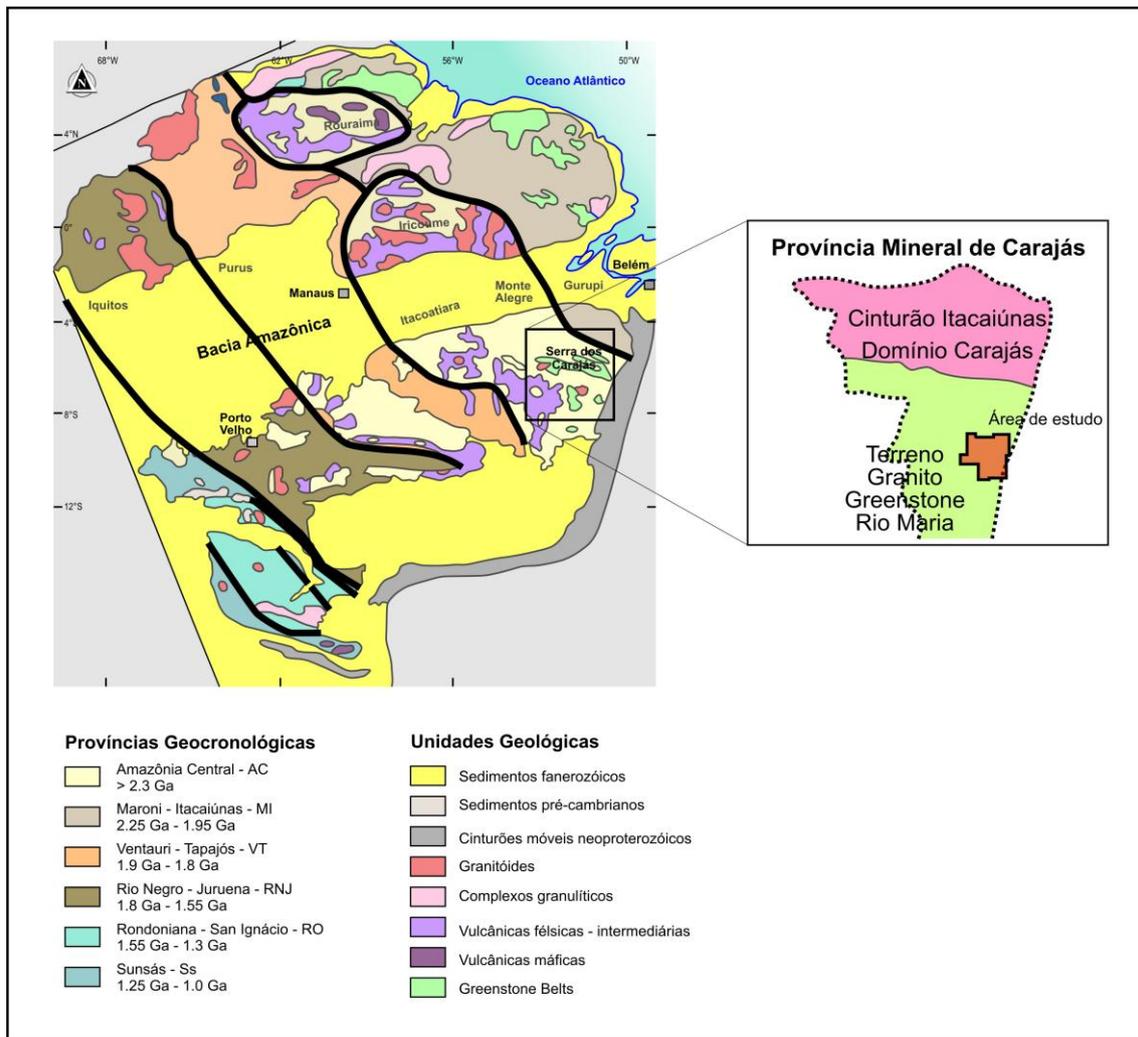


Figura 2.1 Subdivisão do Cráton Amazônico em seis províncias geocronológicas segundo a concepção de Tassinari (1996) e Tassinari & Macambira (1999, 2004). A direita, detalhamento da Província Mineral de Carajás e sua subdivisão em Cinturão Itacaiúnas e o Terreno Granito-*Greenstone* Rio Maria (Tassinari & Macambira, 2004).

As duas propostas de subdivisão do Cráton Amazônico, por meio de dados isotópicos, evidenciam que a evolução crustal envolveu a adição de material juvenil no Arqueano e Proterozóico, com retrabalhamento da crosta continental mais antiga. Aproximadamente 30% da crosta total do cráton foi originada do manto no Arqueano e o restante, no Paleoproterozóico (Tassinari & Macambira, 2004).

No atual estágio de conhecimento, a PMC compreende um segmento da parte sudeste da Amazônia Central (Tassinari & Macambira, 2004) e a área de estudo localiza-se dentro do contexto do Terreno Granito-*Greenstone* Rio Maria (TGGRM), na porção sul da Província Mineral de Carajás.

2.1. PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

A Província Mineral de Carajás apresenta trama geológica-estrutural complexa e depósitos minerais diversificados, sendo assim, denominada de Província Polimetálica de Carajás (Dardenne & Schobbenhaus 2000).

Nos últimos anos, a PMC se tornou uma das regiões melhor estudadas da Amazônia e a mais importante província mineral do país, em virtude de suas inúmeras riquezas minerais (Dall'Agnol *et al.* 2006) (**Figura 2.2**). Ela é dividida em dois domínios tectônicos: norte e sul. O primeiro se refere ao Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988), composto de rochas metavulcânicas, formações ferríferas bandadas e granitóides (Machado *et al.* 1991; Macambira & Lafon 1995; Sardinha *et al.* 2006; Dall'Agnol *et al.* 2006) e o segundo refere-se ao terreno granito-greenstone Rio Maria (Huhn *et al.* 1988). A Província Mineral de Carajás é margeada a leste pela Faixa Araguaia (Hasui *et al.* 1984), a oeste pelas rochas sedimentares e vulcano-plutônicas paleoproterozoicas do Supergrupo Uatumã (Costi *et al.* 2000), a norte pela faixa Maroni-Itacaiúnas (Tassinari & Macambira 1999) e a sul pelo contato não bem definido com o terreno *greenstone* da Serra do Inajá.

Machado *et al.* (1991) dataram o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas pelo método U-Pb e obtiveram idades entre 2,76 e 2,55 Ga. Diversos autores dataram diferentes unidades litológicas no Terreno granito-*greenstone* Rio Maria com idade entre 3,0 e 2,86 Ga (Macambira 1992, Pimentel & Machado 1994, Souza 1994 e Dall'Agnol *et al.* 1999). Rolando & Macambira (2003) dataram zircões de matabasalto da Serra do Inajá e obtiveram idades de $2,98 \pm 4$ Ga, semelhantes às idades obtidas no *greenstone belt* Andorinhas.

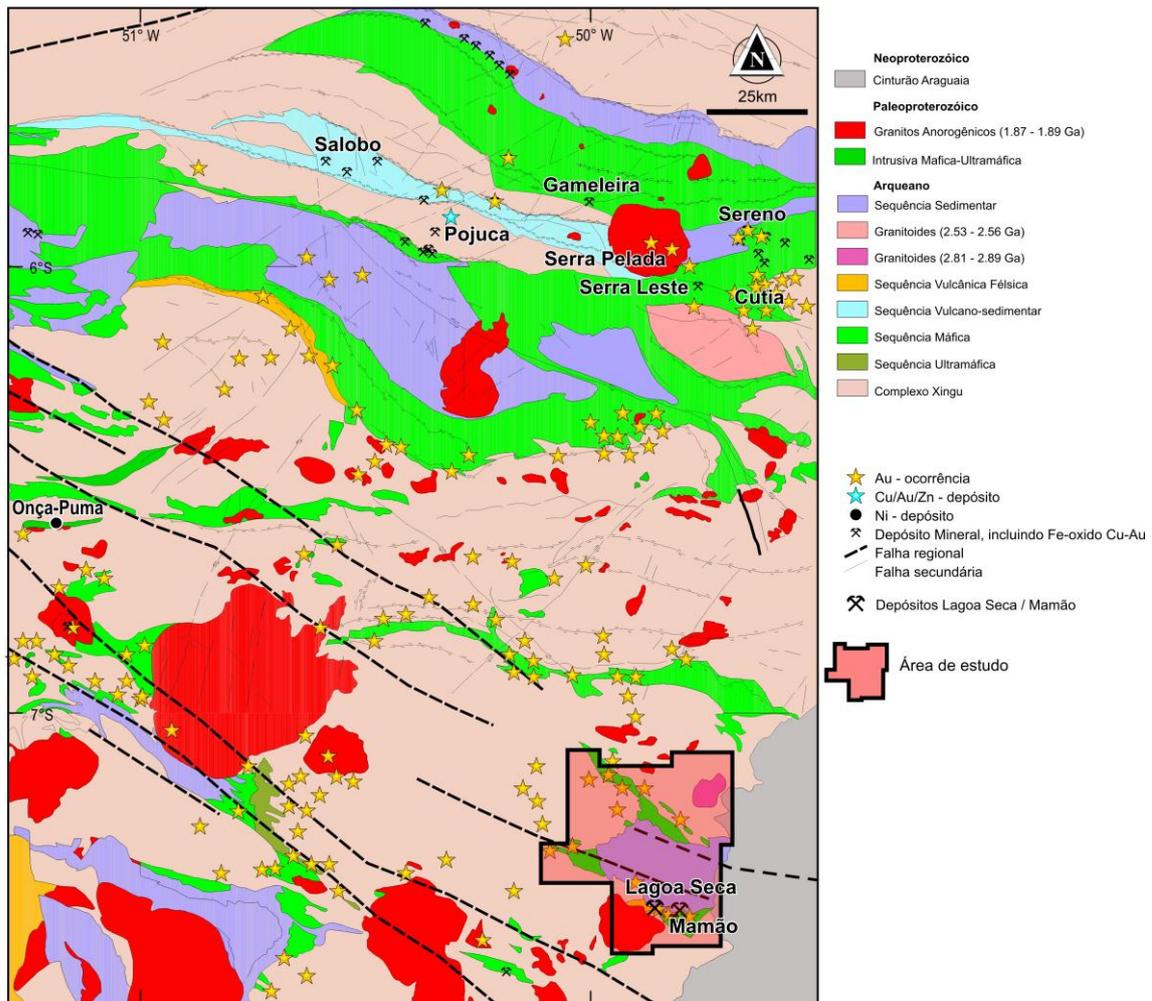


Figura 2.2 Província Mineral de Carajás (PMC) e localização de seus diferentes depósitos minerais. Em estrela de cor amarela depósitos de ouro tipo Serra Pelada e Mamão; estrelas de cor azul depósitos de Cu/Au/Zn do tipo Igarapé Pojuca; pontos de cor preto depósitos de níquel como Onça-Puma e os outros são depósitos e ocorrências do tipo IOCG (Cu,Fe,Au). Em destaque a área de estudo (Modificado CPRM 2006).

2.2. PROVÍNCIA RIO MARIA

A Província Rio Maria é formada por *greenstone belts* e granitóides, ambos de idade arqueana, sendo intrudidos por diques e *sills* do paleoproterozóico (Dardenne & Schobbenhaus 2001). Após os estudos regionais da DOCEGEO (1988), na região sul-sudeste do Pará, foi sugerido uma revisão litoestratigráfica e que todas as faixas de *greenstone belt* desta região fossem agrupadas sob uma única denominação, o Supergrupo Andorinhas, em referência as rochas que afloram na região homônima nas cercanias da cidade de Rio Maria. Esta proposta teve como base a interpretação de que

todas estas seqüências arqueanas, extensas distribuídas em faixas, tivessem sido separadas por diversas intrusões graníticas ao longo do tempo geológico e atualmente encontram-se representadas apenas por pequenas faixas que compõem típicos terrenos granito-*greenstone* (Huhn *et al.* 1988). Posteriormente, a CPRM (2000), contrariando a definição anterior, chamou as mesmas seqüências de Grupo Andorinhas e redefiniu as unidades no sentido de agrupar além das seqüências supracrustais pertencentes às seqüências Andorinhas e Gradaús (Cordeiro & Saueressig 1980), também a faixa do *Greenstone* Identidade, localizada a norte de Rio Maria (Souza *et al.* 1988) (**Figura 2.3**).

As seqüências vulcanossedimentares do tipo *greenstone belt*, agrupadas sob a denominação Supergrupo Andorinhas, consistem nas unidades mais antigas da região, compostas predominantemente por basaltos komatiíticos e toleíticos (Souza 1994, Dall’Agnol *et al.* 2006) onde são associados pequenos depósitos de ouro do tipo *lode* (Mamão, Babaçu, Lagoa Seca, Diadema, Serrinha, Seringa, dentre outros) e depósitos associados a intrusões calci-alcalinas (Cumarú) (Souza, 1999).

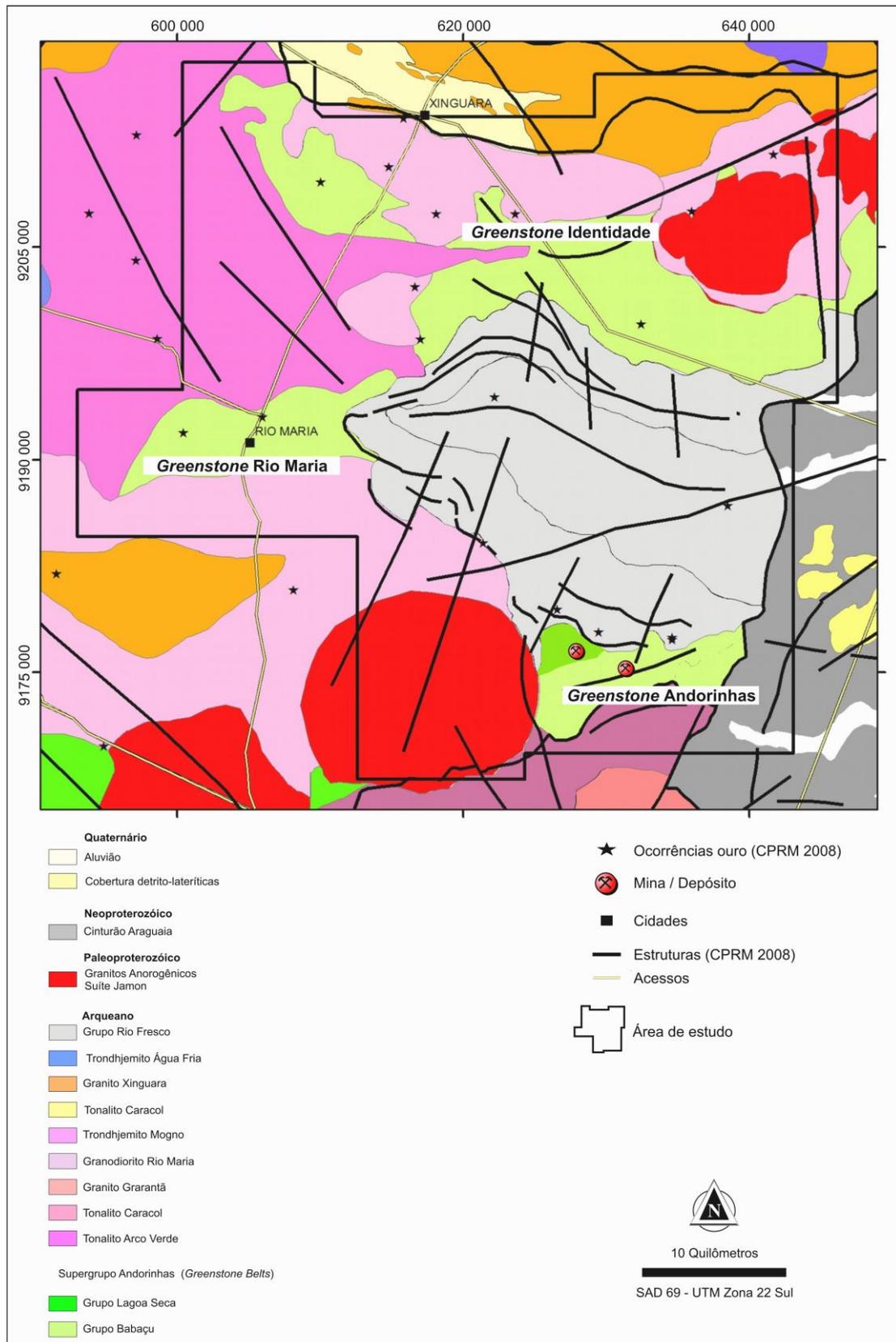


Figura 2.3 Mapa geológico e ocorrências de ouro da área de estudo elaborado pela CPRM (2008).

A área de estudo está localizada na porção sul-sudeste do terreno Rio Maria, onde o arcabouço litoestratigráfico é caracterizado por quatro conjuntos distintos: 1) unidades arqueanas, incluindo Complexo Xingu, tonalito Arco Verde, “*greenstone belts*”, metagranitóides, Supergrupo Itacaiúnas e complexos básico – ultrabásicos estratiformes e granulíticos; 2) Grupo Rio Fresco, de idade tardi-Arqueana; 3) magmatismo intraplaca, de composição ácida a intermediária, do final do Paleoproterozóico; 4) Faixa Araguaia, com evolução tectono-metamórfica no ciclo Brasileiro (DOCEGEO 1988, Araújo & Maia 1991 e Araújo *et al.* 1994). As principais características das unidades geológicas que afloram na área de estudo serão descritas a seguir.

2.2.1 Supergrupo Andorinhas

O Supergrupo Andorinhas foi a primeira seqüência vulcano-sedimentar descrita na região como uma seqüência do tipo *greenstone belt* (DOCEGEO 1988) e suas melhores exposições ocorrem principalmente a leste da cidade de Rio Maria na Serra das Andorinhas, na região de Gradaús, Sapucaia, Seringa e a sul da Serra Pelada. O conjunto de rochas vulcano-sedimentares apresenta-se sob formas de faixas estreitas e alongadas, orientadas segundo a direção geral WNW-ESSE. As inúmeras ocorrências auríferas condicionadas nestas seqüências de rochas encontram-se espacialmente controladas por extensos lineamentos regionais (Oliveira 1993).

DOCEGEO (1988) subdividiu esta seqüência em dois grupos: o Grupo Babaçu, na base, e Lagoa Seca no topo. O Grupo Babaçu é subdividido em Formação Igarapé Encantado, na base, e Formação Mamão no topo. A Formação Igarapé Encantado é constituída por derrames komatiíticos com textura *spinifex* e intercalações de formações ferríferas bandadas e compõem os *greenstone belts* de Seringa (Huhn *et al.* 1986) e Identidade (Souza *et al.* 1997). A Formação Mamão, do ponto de vista litoestratigráfico, está melhor representada na porção basal da aba sul do Sinclinal Andorinhas. É constituída por metatufos, extensos derrames de metabasaltos toleíticos variolíticos, com estruturas *pillow* e intercalação de BIF's e talco-xistos, passando em direção ao topo para metapelitos, BIF's e metachert, que estão intrudidos por diques de dioritos e doleritos (Huhn 1992). As estruturas tipo "*pillow* lava" estão bem preservadas na

sequência vulcano-sedimentar que bordejia a aba norte do sinclinal de Andorinhas. Sedimentos químicos (formação ferrífera bandada) da parte superior da Formação Mamão ocorrem sob a forma de horizontes lenticulares contínuos, podendo constituir finíssimas camadas de comprimento quilométrico (Cordeiro & Saueressig 1980). Tais litologias experimentam eventos de deformação, metamorfismo e milonitização, definindo uma foliação que se apresenta segundo *trends* variáveis, porém, com forte tendência E-W e mergulhos médios a altos, para sul e para norte, em grande parte subverticalizada. Associadas a zonas de cisalhamento transcorrente E-W ocorrem depósitos de Au em veios de quartzo, tipo *lode* arqueano, hospedados em hidrotermalitos derivados de metabasaltos (Huhn 1992).

O Grupo Lagoa Seca foi primeiramente estudado na área do garimpo homônimo, localizado na porção sul do sinclinal Andorinhas. De acordo com Nascimento & Biagini (1988), este grupo é constituído pelas Formações Fazenda do Quincas e Recanto Azul. A primeira, basal, é constituída por rochas metassedimentares clásticas (grauvacas e siltitos) intercaladas com metavulcânicas ultramáficas (talco-clorita-xistos), além de níveis restritos de metavulcânicas intermediárias a félsicas (andesitos, dacitos, riodacitos) e finas lentes de formação ferrífera. A Formação Recanto Azul (superior) é constituída de uma seqüência de rochas metavulcânicas/sub-vulcânicas intermediárias a félsicas, intercaladas com rochas metassedimentares predominantemente clásticas (grauvacas e siltitos), e níveis esporádicos de rochas metavulcânicas ultramáficas-máficas. As rochas metavulcânicas félsicas desta Formação, datadas pelo método U-Pb em zircão, revelaram idades de 2.904 ± 22 Ma (Macambira & Lancelot 1992) e 2.979 ± 5 Ma (Pimentel & Machado 1994).

Outra faixa de *greenstone*, correlacionada à parte inferior do Supergrupo Andorinhas (Souza *et al.* 2001), é denominada de Identidade e constituída de ultramáficas, metagabros, metabasaltos e metadacitos. A idade isotópica disponível é uma isócrona de referência Sm-Nd que reúne dados de 15 amostras dos três tipos litológicos principais. A idade obtida corresponde a 3046 ± 74 Ma (1V; MSWD=1.64). A elevada incerteza não permite estabelecer com segurança se o *greenstone* Identidade é correlato do Grupo Lagoa Seca (2979 Ma) ou se pode ser mais antigo que essas unidades.

2.2.2 Granitóides Arqueanos

Estas rochas graníticas ocorrem principalmente na região de Rio Maria, compondo o terreno granito-*greenstone*. Apesar de parte de eles serem reconhecidos informalmente há algum tempo (Silva *et al.* 1974, Cordeiro & Saueressig, 1980, Hirata *et al.* 1982), foi apenas em 1986 que esses metagranitóides foram mapeados e distinguidos do Complexo Xingu. Os granitóides arqueanos podem ser individualizados em quatro principais grupos (Macambira & Lafon, 1995, Dall’Agnol *et al.* 2006) a saber: 1) granitóides da Série Tonalítica-Trondhjemítica-Granodiorítica (TTG), representados pelo Tonalito Arco Verde, Complexo Tonalítico Caracol (~2,97-2,93 Ga); 2) granitóides do tipo sanukitóide de 2.87 Ga (Almeida *et al.* 2007) é representado pelo Granodiorito Rio Maria; 3) séries mais novas de TTG (2,87 Ga), representado pelo Trondjemitóide Mogno e Água Fria (Leite *et al.* 2004) e 4) leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcálica sendo representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão, Guarantã e correlatos (~2,86 Ga).

2.2.3. Grupo Rio Fresco - Coberturas plataformais

Unidades arqueanas mais jovens correspondem às rochas da cobertura sedimentar de plataforma, reunidas no Grupo Rio Fresco e Grupo Gemaque, os quais guardam posicionamento estratigráfico semelhante ao da Formação Águas Claras do Domínio Carajás. Essa deposição pode ter sido efetivada em ambiente de margem continental passiva como resultado de distensão regional (Souza *et al.* 2001). O Grupo Rio Fresco é composto por metassedimentos que constituem as Serras do Sereno, Gradaús e a Serra das Andorinhas localizada dentro da área de estudo.

Cordeiro & Saueressig (1980) e Cordeiro (1982) denominaram de Sequência Gemaque, um conjunto de sedimentos clásticos-químicos, sobrepostos discordantemente às sequências vulcano-sedimentares basais do *greenstone belt* Andorinhas, denotando incipiente grau de metamorfismo e dobrados em sinclinal aberto e com *plunge* suave para leste. Correlacionam esses sedimentos à Formação Rio Fresco de Barbosa *et al.* (1966).

Na centro-leste da área de estudo predominam os sedimentos desse grupo, abrangendo uma área de aproximadamente 450km². Apresentam-se isentos de deformação e de metamorfismo e são, via de regra, bem estratificados com mergulhos suaves. Constitui uma pequena bacia isolada, na forma de um grande sinclínório basculado de NW para SE, e cujos flancos são delimitados por falhamentos normais, que propiciam encostas abruptas, correspondendo a feições do tipo *hog backs*, com desníveis da ordem de 150 a 200 m de altura. No tocante às relações de contato, a unidade apresenta as seguintes características: 1) sobrepõe-se, em discordância angular, ao conjunto metavulcano-sedimentar do Grupo Andorinhas; 2) recobre discordantemente o Granodiorito Rio Maria; 3) apresenta sua extremidade leste sobreposta pelos metassedimentos da Formação Couto Magalhães – Cinturão Araguaia, através da atuação conjugada de cavalgamento oblíquo e transcorrência associada.

As coberturas plataformais representadas pelos Grupos Gemaque e Rio Fresco ocorrem como acumulações terrígenas nas estruturas sinformais (Andorinhas e Gradaús) desenvolvidas nas margens de zonas de cisalhamento, e em geral sobrepostas às seqüências metavulcano-sedimentares arqueanas, em discordância angular (CPRM 2000). Constituem dois tipos de seqüências sedimentares, assim consideradas: seqüência psamítica continental (Formações São Roque e Tocandera) na base e seqüência pelítica marinha (Formações Cachoeirinha e Naja) no topo.

Estratigraficamente o Grupo Rio Fresco é mais novo que o Granito Cumaru (2817 ± 4 Ma; Lafon e Scheller 1994) e anterior aos granitos paleoproterozóicos formados por volta de 1,88 Ga, como o Granito Jamon. Macambira e Lancelot (1996) encontraram zircão detrítico na Formação Tocandera com idades no intervalo de 3,67 Ga a 2,76 Ga, o que estabelece uma idade máxima neoarqueana para sua deposição.

2.2.4. Suíte Jamon e Diques - Paleoproterozóicos

A Suíte Jamon é representada pelos Granitos Jamon (Dall'Agnol *et al.* 1999), Manda Saia (Leite 2001), Musa, Marajoara (Gastal 1987), Bannach (Almeida *et al.* 2006) e Redenção (Oliveira *et al.* 2005). São caracterizados como maciços grosseiramente circulares, de dimensões variando de 4 – 50 km e composição variando de granítica-granodiorítica, geralmente com biotita associada. Estes maciços pós-

tectônicos apresentam características subalcalinas e afinidades com os granitos tipo A (Collins *et al.* 1982, Eby 1992). Essas rochas de idade paleoproterozóicas são portadoras de cassiterita, wolframita, em zonas greisenizadas, contendo ainda topázio e fluorita.

Diques máficos, intermediários e félsicos, sob forma de corpos subverticais, tabulares, seccionam as diversas unidades que compõem o terreno granito-greenstone Rio Maria. Idades geocronológicas obtidas para os diques máficos (1802 ± 22 ; K-Ar, em concentrados máficos; Silva Jr. *et al.* 1999), intermediários (1874 ± 110 Ma; Rb-Sr, isócrona em rocha total (RT); Rivalenti *et al.* 1998) e félsicos (1707 ± 17 Ma; Rb-Sr, RT; Gastal *et al.* 1987), demonstram que estes se formaram no final do Paleoproterozóico, sendo aproximadamente sincrônicos do magmatismo anorogênico, que ocorre na Amazônia Oriental. De acordo com Vasquez *et al.* (2002), nos estudos dos granitóides da porção leste da Província Tapajós, o regime extensional teria favorecido processos de fusão mantélica e da crosta inferior por *underplating*, refletindo o processo de tafrogênese que afetou o Cráton Amazônico há aproximadamente 1,88 Ga.

2.2.5. Faixa Araguaia - Neoproterozóica

A Faixa Araguaia ocorre no limite leste do cráton Amazônico, onde se registra uma forte descontinuidade gravimétrica (Hasui *et al.* 1980, Haralyi & Hasui 1982). Ela representa a porção oeste da província Tocantins sendo conhecida como faixa móvel Araguaia (Moura, 1992).

Segundo Costa (1980) e Moura (1992), a Faixa Araguaia consiste de: 1) núcleos gnáissicos; migmatíticos, referidos ao embasamento arqueano; 2) Supergrupo Baixo Araguaia, predominante na Faixa Araguaia, composto de supracrustais metamorfizadas em graus médio a leste e incipiente à oeste; 3) metaplutônicas básicas a ultrabásicas pré-sin-orogênicas; 4) granitóides brasileiros.

2.3. EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA PROVÍNCIA RIO MARIA

As seqüências do tipo *greenstone belts* pertencentes ao Grupo Andorinhas são reconhecidas como as rochas mais antigas da Província Carajás. Atualmente, os terrenos *greenstone* da Província Rio Maria (PRM) encontram-se separados por diversas intrusões graníticas neoarqueanas e paleoproterozóicas e, também, pelas coberturas sedimentares.

A sul da PRM, rochas arqueanas (estratigraficamente mais jovens) constituídas por gnaisses do Complexo Xingu, *greenstone belt* de Inajá e batólitos granitóides, formam o Cinturão Pau D'arco (DOCEGEO 1988, Huhn *et al.* 1988), considerado por muitos autores como um simples prolongamento para sul da província Rio Maria.

De acordo com Araújo *et al.* (1994), admite-se que em épocas pretéritas os *greenstone* compusessem um sistema mais extenso, tendo se depositado em torno de 3,0 Ga sob um controle tectônico oblíquo, gerando bacias transtensivas as quais evoluíram para duplexes transpressivos. Expressivos batólitos arqueanos foram gerados entre 2,8 e 2,5 Ga, cortando e separando os terrenos *greenstone belts*.

Quando a estabilidade tectônica finalmente imperou sobre a província Rio Maria, entre o final do Arqueano e mais possivelmente início do Paleoproterozóico, deu-se início a uma sedimentação fluvio-marinha originando o Grupo Rio Fresco, que recobre parcialmente a Província Rio Maria e o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas.

Já na escala da mina do Mamão, a principal deformação observada poderia ser de idade arqueana superior e seria caracterizada por um encurtamento NW-SE, com uma extensão NE-SW resultando na formação de falhas NE-ENE com movimentos dextrais e pequena componente reversa (Miller *et al.* 2010). Esse evento estaria relacionado à fase inicial de precipitação do ouro, visto na mina do Mamão e em outros pequenos corpos próximo à mina. Esta deformação também estaria associada à deformação dúctil e potassificação com presença de biotita ao longo dos *lodes* responsáveis por uma grande deposição de ouro e geração do controle principal do minério evidenciado pelo *plunge* de direção NNE.

2.4. MINERALIZAÇÃO AURÍFERA

O Supergrupo Itacaiúnas, localizado à norte da área de estudo, é conhecido por conter a maior variedade de ocorrências e depósitos minerais da Província Mineral de Carajás. Em contraste com o Supergrupo Itacaiúnas, a maioria das mineralizações auríferas do sul do Pará foi descrita na literatura como do tipo *lode* encaixados em rochas metavulcânicas básicas e intermediárias (Huhn 1992, Oliveira 1987 e Souza 1994), e do tipo stock calci-acalino no contato do Granodiorito Cumaru com o *greenstone belt* de Gradaús (Santos 1995). Os principais depósitos (<17 t Au) desse bloco incluem Sapucaia, Cumaru, Mamão-Babaçu, Malvinas, Tucumã e Inajá. São caracterizados por pequenos depósitos de metais base e ouro, em contraste com os depósitos de Cu-Au do Supergrupo Itacaiúnas, e geralmente ocorrem como veios de quartzo gerados em domínios transtensionais de zonas de cisalhamento transcorrentes destrais com posterior movimentação reversa (Huhn 1992).

A maior vocação metalogenética do TGGRM é voltada para o ouro, e tem no contexto do terreno *granito-greenstone*, principalmente nas seqüências metavulcano-sedimentares, a totalidade das ocorrências registradas para esse bem mineral. Dois tipos de depósitos tipo *lode* foram identificados na província Rio Maria: depósito tipo Lagoa Seca, hospedado em seqüência metassedimentar (turbiditos), e depósito tipo Mamão/Babaçu, hospedado em rochas metabásicas hidrotermalizadas (Capítulo 04, **figura 4.2**). A seguir serão descritas as principais características destes depósitos.

2.4.1. Mineralização Aurífera Lagoa Seca

As duas minas de ouro na região se encontram dentro dos corredores de cisalhamento conhecidos como *trend* Mamão-Babaçu e *trend* Lagoa Seca. A área do depósito Lagoa Seca localiza-se 36 km a sudeste da cidade de Rio Maria e pertence à seqüência metavulcano-sedimentar do Grupo Lagoa-Seca. O Grupo Lagoa Seca está sotoposto em discordância litológica e angular, a norte, com metassedimentos do Grupo Rio Fresco. Na porção sul, o contato é gradacional com o Grupo Babaçu. O Granodiorito Rio Maria delimita bruscamente essa seqüência, a noroeste, enquanto que o granito Jamon provoca uma auréola de metamorfismo de contato de aproximadamente 1000 m no extremo oeste.

O *trend* Lagoa Seca aloja-se numa zona de cisalhamento transcorrente sinistral NE-SW, responsável pela mineralização aurífera do depósito (Souza 1992). A mineralização e a alteração são encaixadas em uma zona de cisalhamento no contato de rochas metaultramáficas e metassedimentos como grauvacas, tufos e siltitos. O depósito é envolto por dacitos arqueanos sin/pós instalação da zona de cisalhamento principal. Pimentel & Machado (1994) dataram esses dacitos pelo método U-Pb em zircões e obtiveram a idade de cristalização de 2,97 Ga., que é interpretada também como a idade da instalação da zona de cisalhamento e, por consequência, da mineralização. O ouro está associado com sulfetos, principalmente a pirita, nos sedimentos de granulação fina intercalados com pacotes máficos-ultramáficos (**Figura 2.4**).

Os principais litotipos do Grupo Lagoa Seca que ocorrem na área do depósito compreendem: metagrauvacas, metassiltitos, metaultramáficas (actinolita-tremolita-talcoxistos, tremolita-actinolita-talco xistos e actinolita xistos) e metadacito. Petrografia de amostras das metaultramáficas, cedidas pela Troy/Reinarda, indicaram presença de flogopita e titanita. Uma vez que os metakomatiitos são rochas altamente magnesianas com teor muito baixo de titânio e potássio, essas ultramáficas tendem a ser intrusivas. Também, intrusivo nesse grupo encontra-se o Granito Jamon. Por fim, diques métricos de diabásio, seccionam o Grupo Lagoa Seca e coberturas lateríticas ocorrem na porção sudeste da área.

De acordo com Souza (1999) a alteração hidrotermal na zona de cisalhamento do depósito de Lagoa Seca é caracterizada por halos de carbonatação / propilitização, disseminado em todo o domínio da zona de cisalhamento; silicificação, limitada ao contato entre as rochas metaultramáficas e metagrauvacas; potassificação, representada por vênulas de feldspato potássico e actinolita; por fim sulfetação, principalmente pirita com secundária pirrotita. A sulfetação ocorre ao longo da foliação milonítica ou em finas vênulas.

O depósito de Lagoa Seca foi anteriormente descrito como do tipo *lode* Arqueano por Huhn (1992). O último estudo do depósito, realizado por Souza (1999), indica que o depósito aurífero de Lagoa Seca constitui um depósito do tipo *gold-only* e a sua metalogênese é singular em relação aos outros depósitos do tipo *lode* nos *greenstone belts* da Província Carajás. Todavia, o depósito estudado é o único descrito

que está encaixado na porção superior do *greenstone belt* Andorinhas, não se associando a veios de quartzo (Souza 1999) e sim a sulfeto disseminado (**Figura 2.4 e figura 2.5**). Segundo o modelo de depósitos orogênicos proposto por Poulsen *et al.* (2000) o depósito de Lagoa Seca seria do tipo hospedado em turbiditos, alojado em porções metassedimentares da sequência vulcano-sedimentar.

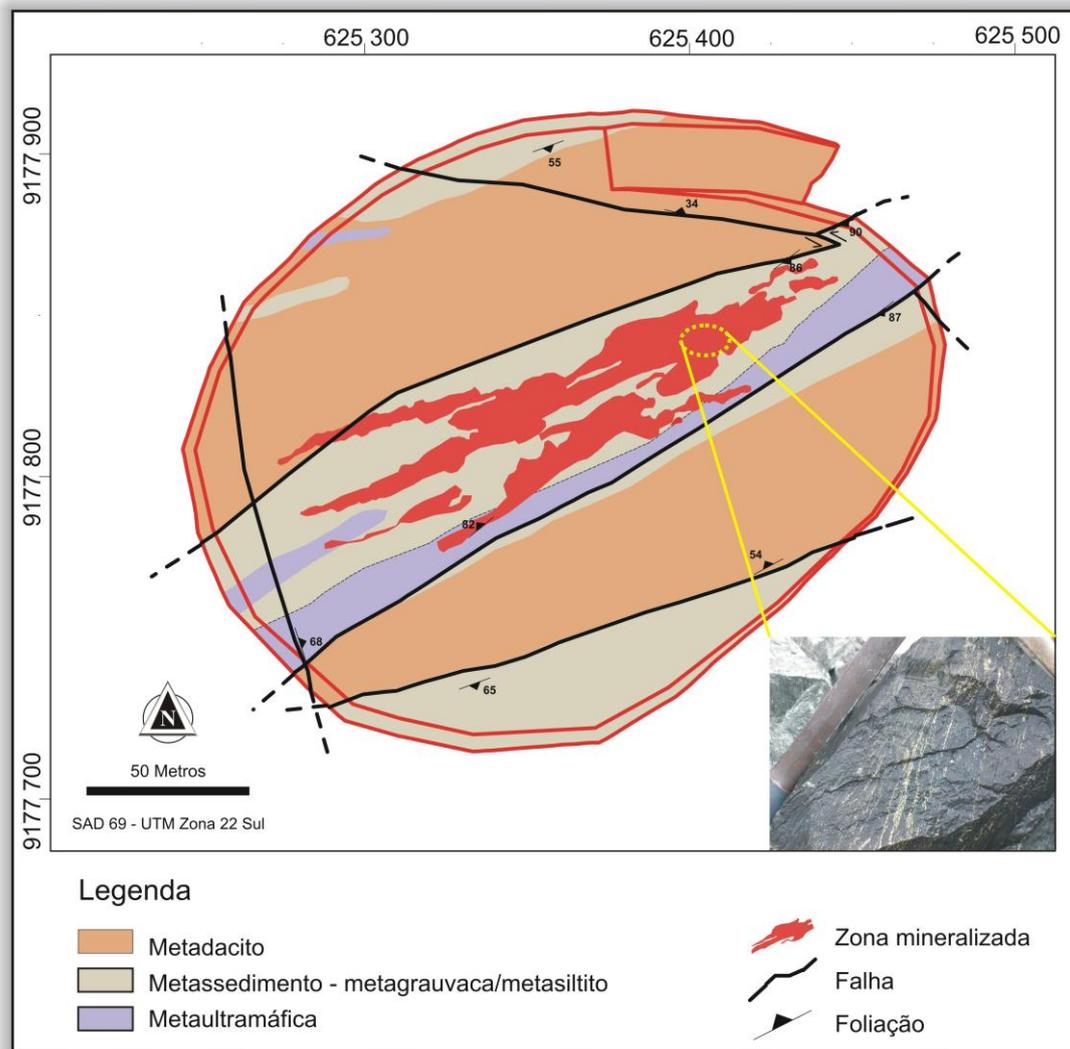


Figura 2.4 Mapa geológico do depósito Lagoa Seca. Observar a zona mineralizada ao longo da zona de cisalhamento NE, encaixada em rochas metassedimentares em contato com intrusivas ultramáficas. Detalhe ao lado do minério de alto teor sulfetado.

2.4.2. Mineralização Aurífera Mamão/Babaçu

Localizado há 6 km a SE do *trend* Lagoa Seca, a zona de cisalhamento Mamão/Babaçu intercepta rochas metamáficas e intermediárias pertencentes à base do

greenstone belt Andorinhas. Os depósitos estão distantes 2.5 km entre si, sendo que o Mamão está a SW do Babaçu. Os depósitos se encontram em um mesmo *trend* estrutural com ocorrência de zonas mineralizadas, denominado de *trend* Mamão/Babaçu (**Figura 2.5**). O *trend* Mamão/Babaçu é representado por uma zona de cisalhamento de movimento reverso a reverso oblíquo com direção regional ENE-WSW. Em escala regional, as unidades litoestratigráficas que ocorrem na região do depósito Mamão e Babaçu são: Supergrupo Andorinhas (Grupo Babaçu e Grupo Lagoa Seca), Tonalito Arco Verde, Grupo Rio Fresco e diques félsicos/máficos.

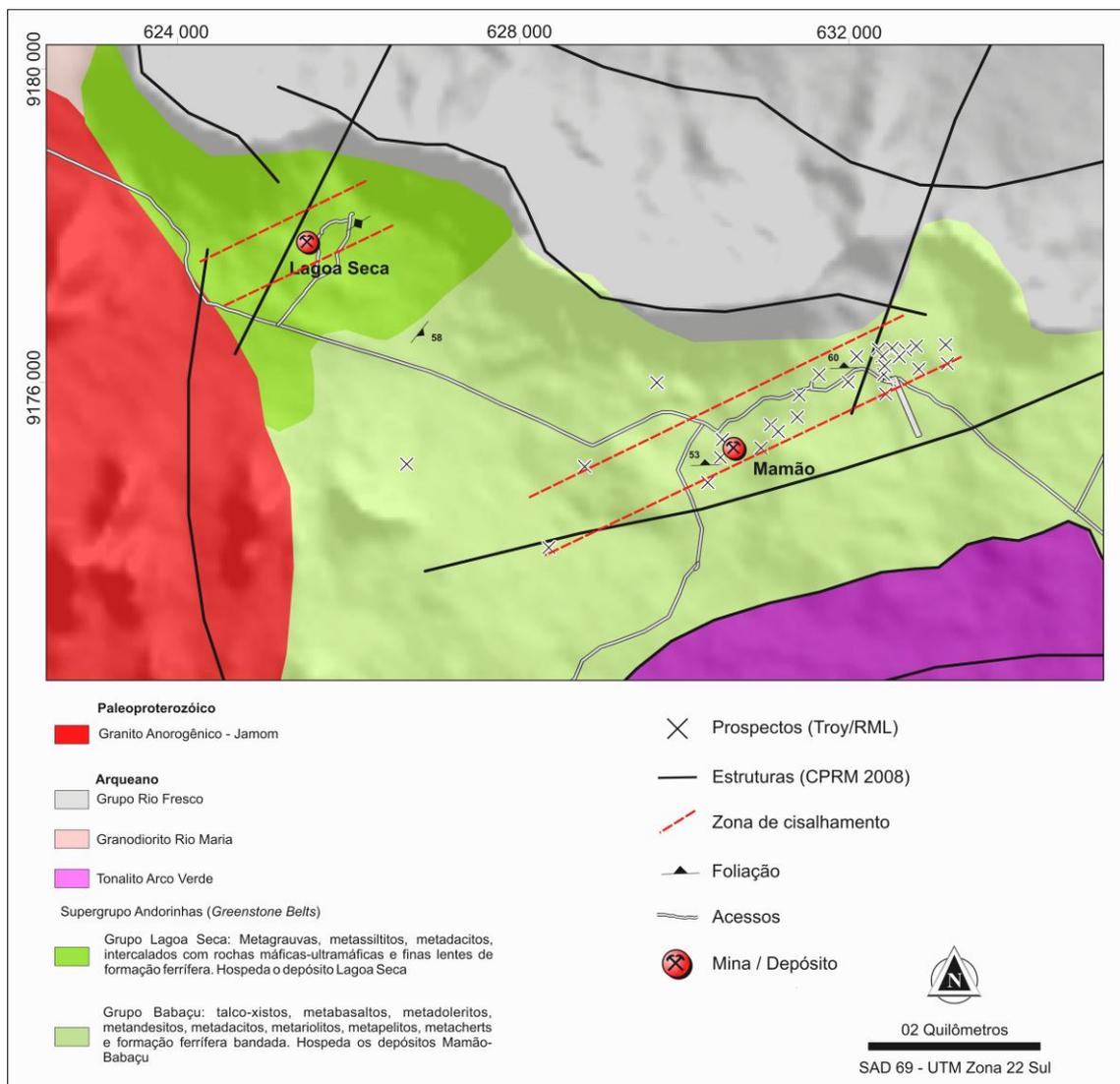


Figura 2.5 Mapa geológico, CPRM (2008), da região Mamão/Babaçu mostrando os prospectos e os dois corredores de cisalhamento: Lagoa Seca e Mamão/Babaçu. O mapa está sobreposto à imagem SRTM (DEM).

Em escala de depósito, a unidade litoestratigráfica que ocorre no Mamão/Babaçu pertence apenas ao Grupo Babaçu, sendo que os litotipos predominantes são metabasalto e metadolerito. Estas rochas vulcânicas máficas correspondem a um espesso pacote que hospeda zonas de cisalhamento que serviram de conduto para a percolação de fluidos e alteração hidrotermal. Assim, as variações litológicas nas áreas dos depósitos estão relacionadas a modificações da trama estrutural/mineralógica decorrentes da percolação de fluidos hidrotermais em zona de cisalhamento rúptil-dúctil, típica de depósitos de ouro hospedados em veios de quartzo relacionados à zonas de cisalhamento (*shear-zone-related lode-gold deposits*). Níveis sulfetados são encontrados na borda dos veios de quartzo caracterizando a alteração hidrotermal proximal, sendo comum a presença de ouro livre no veio de quartzo como mostra a **figura 2.6**.

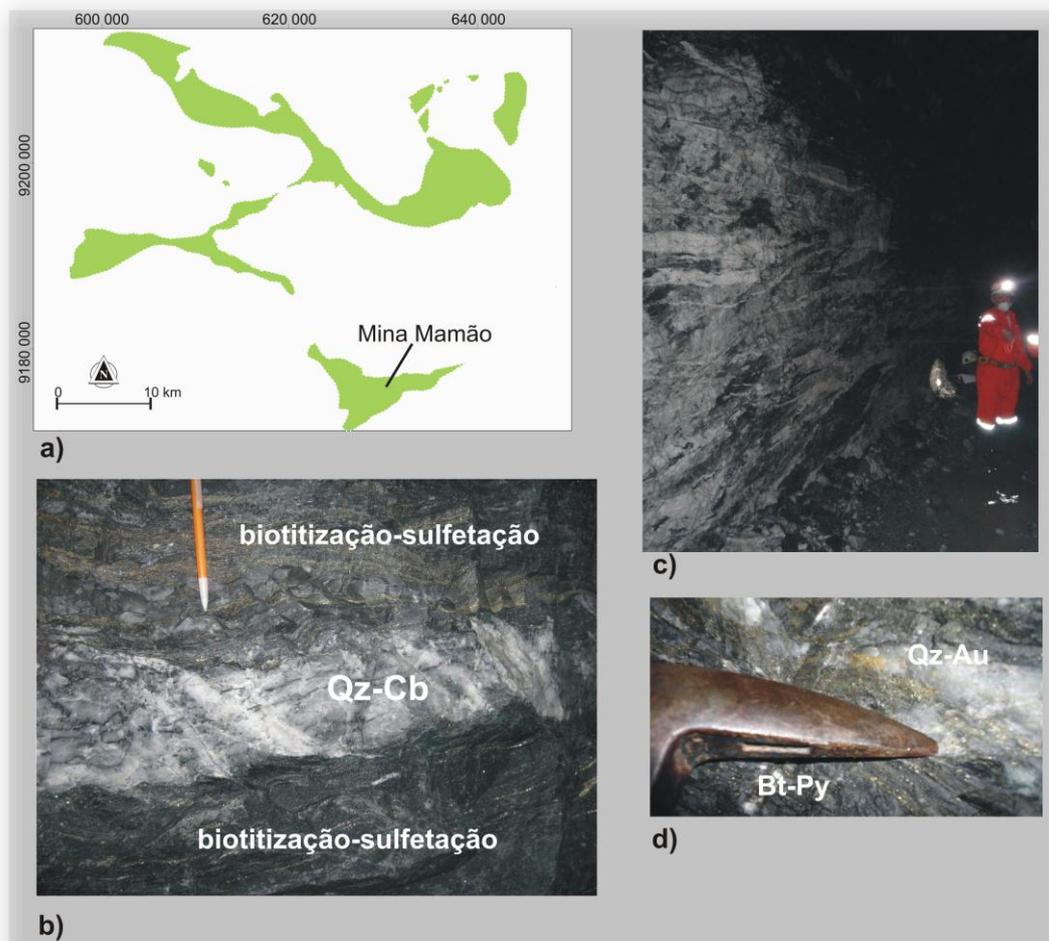


Figura 2.6 Fotos da Mina Mamão. a) distribuição das sequencias do tipo *greenstone belts* da área de estudo, b) veio de quartzo com halos de alteração com biotita e

sulfetação. Dentro do veio de quartzo mineralizado veios tardios em *echelon* com movimento dextral. c) frente de lavra do corpo Melechete, d) veio de quartzo (Qz) com ouro (Au) visível envolto pelo halo de alteração proximal, potassificação (biotita - Bt) e sulfetação (pirita - Py).

Segundo Huhn (1992) existem quatro principais zonas de alteração hidrotermal superimpostas ao metamorfismo de fácies xisto verde: (1) actinolítica, (2) clorítica, (3) carbonática e (4) pirítica. As zonas de alteração actinolítica e clorítica ocupam as porções mais externas dos halos de alteração, enquanto as zonas carbonática e pirítica ocupam as mais internas, próximas ao veio de quartzo aurífero. Estudos petrográficos de furos de sondagem, cedidos pela Troy/Reinarda Mineração, mostraram também, além das quatro zonas de alteração hidrotermal citadas pelo Huhn (1992), zonas de sericitização e biotitização como halos hidrotermais. A biotitização ocorre em zonas proximais associadas à sulfetação em halos com poucos metros de espessura. Em zonas proximais a biotita substituindo a clorita, total ou parcialmente, sugere um metassomatismo potássico.

3. APRESENTAÇÃO

Este capítulo apresenta o processamento dos dados geofísicos da região de Rio Maria - PA, bem como os produtos derivados deste processamento.

3.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

O processamento dos dados pode ser dividido nas seguintes etapas: pré-processamento, processamento (interpolação e micronivelamento) e obtenção dos mapas transformados. A etapa de pré-processamento consistiu da organização dos dados dentro do aplicativo Oasis Montaj, versão 7.0 da GEOSOFT™, com a construção de um banco de dados.

Nesta primeira fase foram avaliados os dados magnéticos gradiométricos segundo a sua distribuição espacial das linhas de vôo, densidade e quanto à presença de inconsistências, como o “efeito pepita” ou “picos”, quando comparados com os demais pontos fiduciais. Os dados em perfil do campo magnético anômalo foram verificados quanto à presença de dados espúrios, através dos testes de consistência de diferença quarta e parâmetro P.

A aplicação desses testes aos dados magnetométricos mostrou a inexistência de ruídos, em padrões e quantidade, que eventualmente possam comprometer os resultados pretendidos nas etapas de processamento e interpretação dos dados.

No caso dos dados gamaespectrométricos optou-se por uma análise estatística dos valores dos canais de K em percentagem, eTh em ppm, eU em ppm e contagem total em $\mu\text{R/h}$, conforme apresentada na **tabela 3.1**.

Tabela 3.1 Estatística dos dados originais dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo de Andorinhas.

Dados em concentração de radioelementos originais				
Estatística	Canal do K (%)	Canal do eTh (ppm)	Canal do eU (ppm)	Canal da contagem total ($\mu\text{R/h}$)
<i>Média</i>	0.68	11.60	1.74	5.49
<i>Desvio padrão</i>	0.54	10.67	1.76	4.49
<i>Máximo</i>	6.06	118.82	26.34	46.06
<i>Mínimo</i>	-0.67	-8.41	-3.53	-1.90

Nota-se que a média para o canal do K (0,68%) está abaixo do esperado, visto que a média crustal varia de 2,2 a 2,35%, e que nas condições da Província Rio Maria, que caracteriza-se por granitos, granitóides, rochas vulcânicas ácidas, máficas e intermediárias em grande distribuição, seria esperado obter uma média maior. Com base nessa tabela, é possível constatar que os dados de K (%) e eU (ppm) compreendem aqueles que fogem dos parâmetros da média crustal do planeta (respectivamente, 2 – 2,35% e 2,7 – 3 ppm). Também se observa valores negativos nos canais de K%, eU e eTh. Os dados de eTh apresenta-se coerente com a média crustal com média de 11,6 ppm.

A solução encontrada para a correção dos dados gamaespectrométricos compreendeu a somatória de constantes aos canais afetados, assegurando valores de medidas positivas e inclusas nos padrões crustais típicos (**Tabela 3.2**). Dessa forma procedeu-se da seguinte maneira:

- eliminação dos valores negativos de todos os canais e o valor mínimo passou a ser igual a zero;
- somatória das constantes 1,5% e 1,2 ppm para os canais de K% e eU, respectivamente. Os respectivos valores médios passaram para 2,18% e 2.94 ppm.

Tabela 3.2 Estatística dos dados corrigidos dos canais gamaespectrométricos do levantamento aéreo de Andorinhas.

Dados em concentração de radioelementos corrigidos				
Estatística	Canal do K (%)	Canal do eTh (ppm)	Canal do eU (ppm)	Canal da contagem total ($\mu\text{R/h}$)
<i>Média</i>	2.18	11.60	2.94	5.49
<i>Desvio padrão</i>	0.54	10.67	1.76	4.49
<i>Máximo</i>	7.56	118.82	27.54	46.06
<i>Mínimo</i>	0.82	0	0	-1.90

A interpolação dos dados (magnetometria, gamaespectrometria) foi realizada em seguida ao pré-processamento. Inicialmente testes de interpolação foram realizados a partir dos métodos da curvatura mínima e bidirecional, de forma a criar uma malha regular para os dados citados. Qualitativamente, observou-se que, para dados magnetométricos gradiométricos, o método bidirecional (*spline* Akima) aparentou

melhores resultados, pois ruídos na direção das linhas de vôo foram mais atenuados em relação ao resultado produzido pelo método da curvatura mínima. Já para os dados gamaespectrométricos, a curvatura mínima quando comparado aquele derivado pelo método bidirecional, mostrou-se superior.

Foram testadas interpolações com diferentes números de iterações (100, 500, 1000 e 5000) e tamanhos de célula da malha de 31,5m e 15,6m, para ambos os métodos. Os resultados obtidos foram comparados segundo o número de iterações, o tamanho da célula da malha e quanto à aproximação dos dados interpolados em relação aos valores originais. Foram utilizados os produtos gamaespectrométricos interpolados com tamanho de célula de 31,5m e com 1000 iterações na curvatura mínima. Ou seja, utilizando-se $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de vôo.

Após a interpolação da malha do campo magnético anômalo, dos gradientes medidos (Gx e Gy) e dos canais de K%, eTh, eU e contagem total, estes foram micronivelados para posterior geração dos produtos transformados. Para o micronivelamento utilizou-se o algoritmo de Blum (1999) com base no método de Minty (1997).

3.2 PRODUTOS GERADOS

3.2.1 Gradientes medidos e produtos derivados do campo magnético anômalo

Para o tratamento destes dados, utilizou-se técnicas eficientes para a determinação de parâmetros geométricos, como localização de limites (geológicos e estruturais), profundidades de corpos e feições estruturais, tais como: amplitude do e inclinação do sinal analítico, derivadas vertical e horizontais (X e Y) e amplitude do gradiente horizontal total. Durante a interpretação, utilizou-se também os gradientes magnéticos medidos durante o aerolevanteamento (Gx e Gy). Este produtos foram utilizados para mapear zonas de cisalhamento conhecidas por hospedar a mineralização aurífera, sua expressão em sub-superfície, bem como o prolongamento das mesmas em regiões arrasadas e que possam conter potencial para hospedar ouro. A **figura 3.1** ilustra os processos para a obtenção desses produtos.

Magnetometria

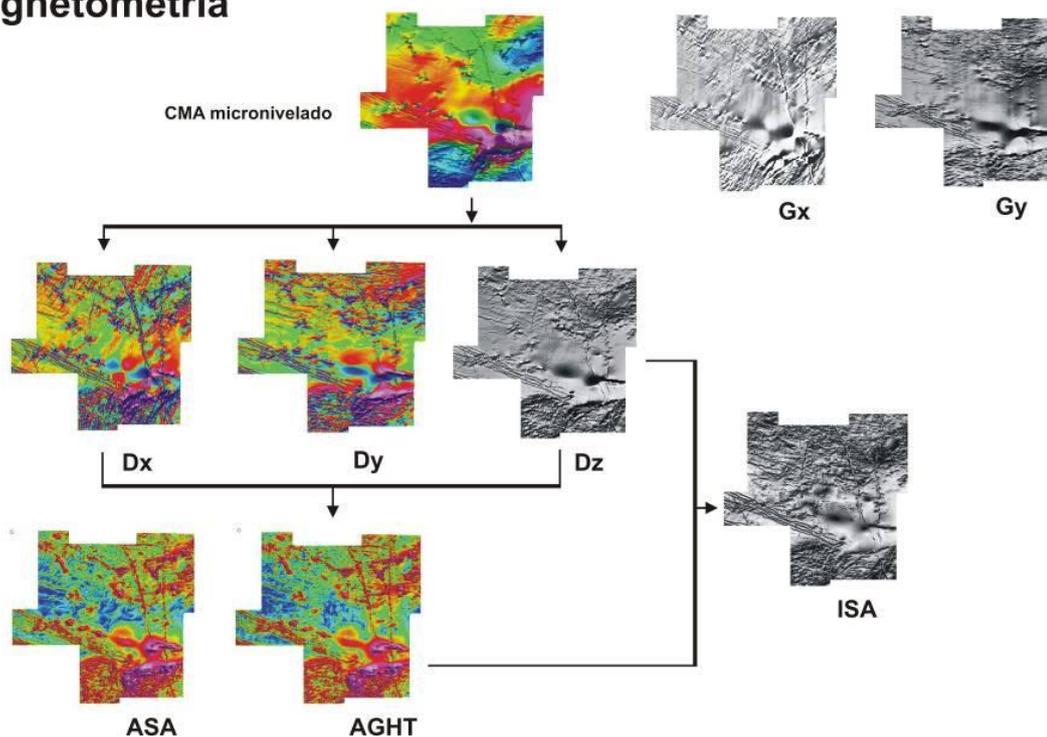


Figura 3.1 Fluxograma ilustrando as transformações lineares. CMA (Campo magnético anômalo), ASA (Amplitude do sinal analítico), Dz, Dx e Dy (Derivadas vertical e horizontais), AGHT (Amplitude do gradiente horizontal total) e ISA (Inclinação do sinal analítico).

O campo magnético anômalo representa as anomalias magnéticas situadas na crosta e acima da superfície Curie. É obtido pela remoção do campo magnético terrestre do campo magnético total medido no levantamento. A resposta magnética observada no campo magnético anômalo pode ser de natureza profunda como, por exemplo, fontes situadas na base da crosta, ou de natureza rasa. Este fato, entre outros, dificulta sua interpretação direta, sendo necessário a geração de outros produtos para interpretação adequada dos dados. A **figura 3.2** mostra o campo magnético anômalo da área do projeto Andorinhas.

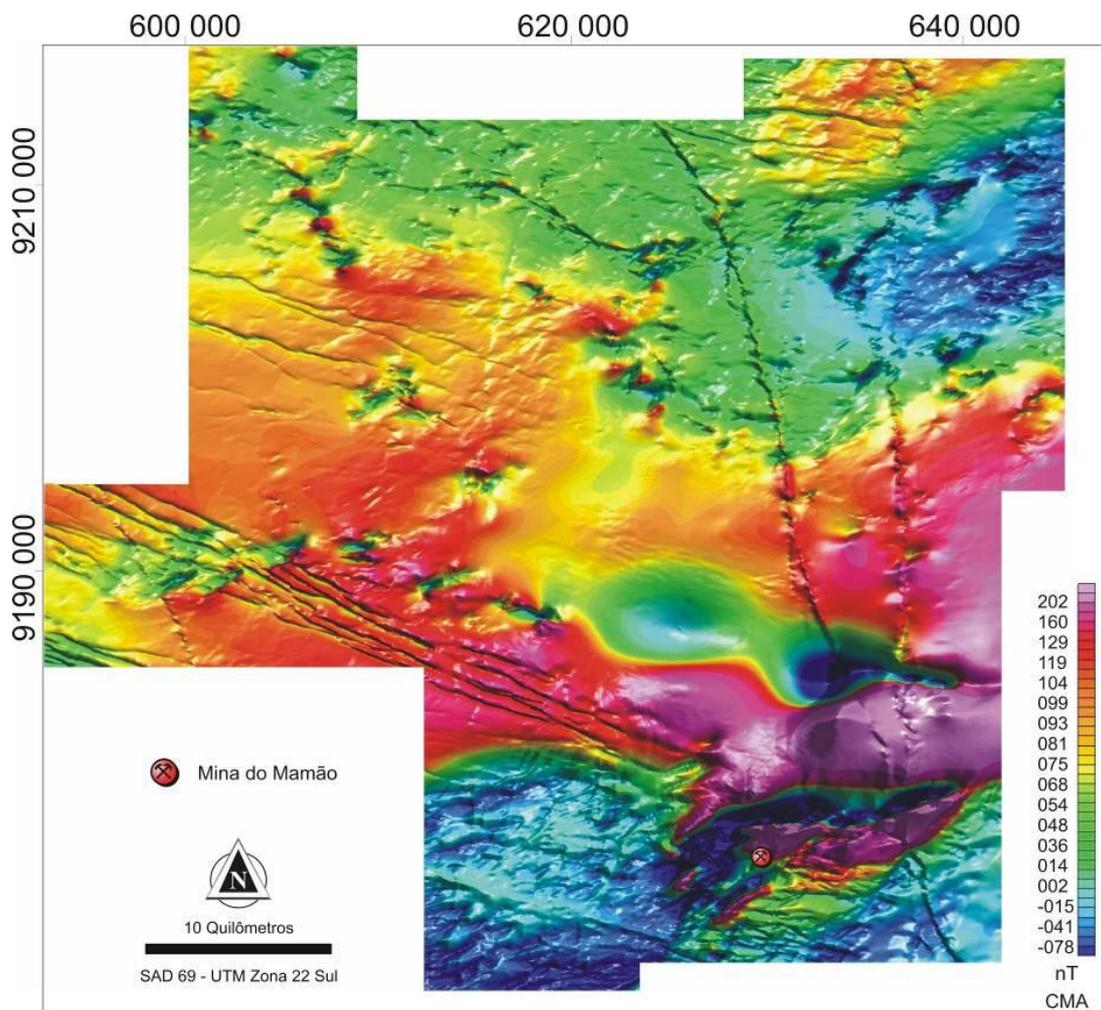


Figura 3.2 Figura do campo magnético anômalo da área de estudo.

O filtro de derivada vertical promove a amplificação do conteúdo de alta frequência em detrimento ao de baixa frequência, funcionando como um filtro passa-alta. Estes realçam as regiões de maior gradiente magnético ressaltando bordas e contatos de corpos rasos. De forma geral estes filtros são conhecidos como filtros de derivada direcional sendo também aplicados na direção horizontal. A **figura 3.3** ilustra a primeira derivada vertical do campo magnético anômalo para a região da área de estudo.

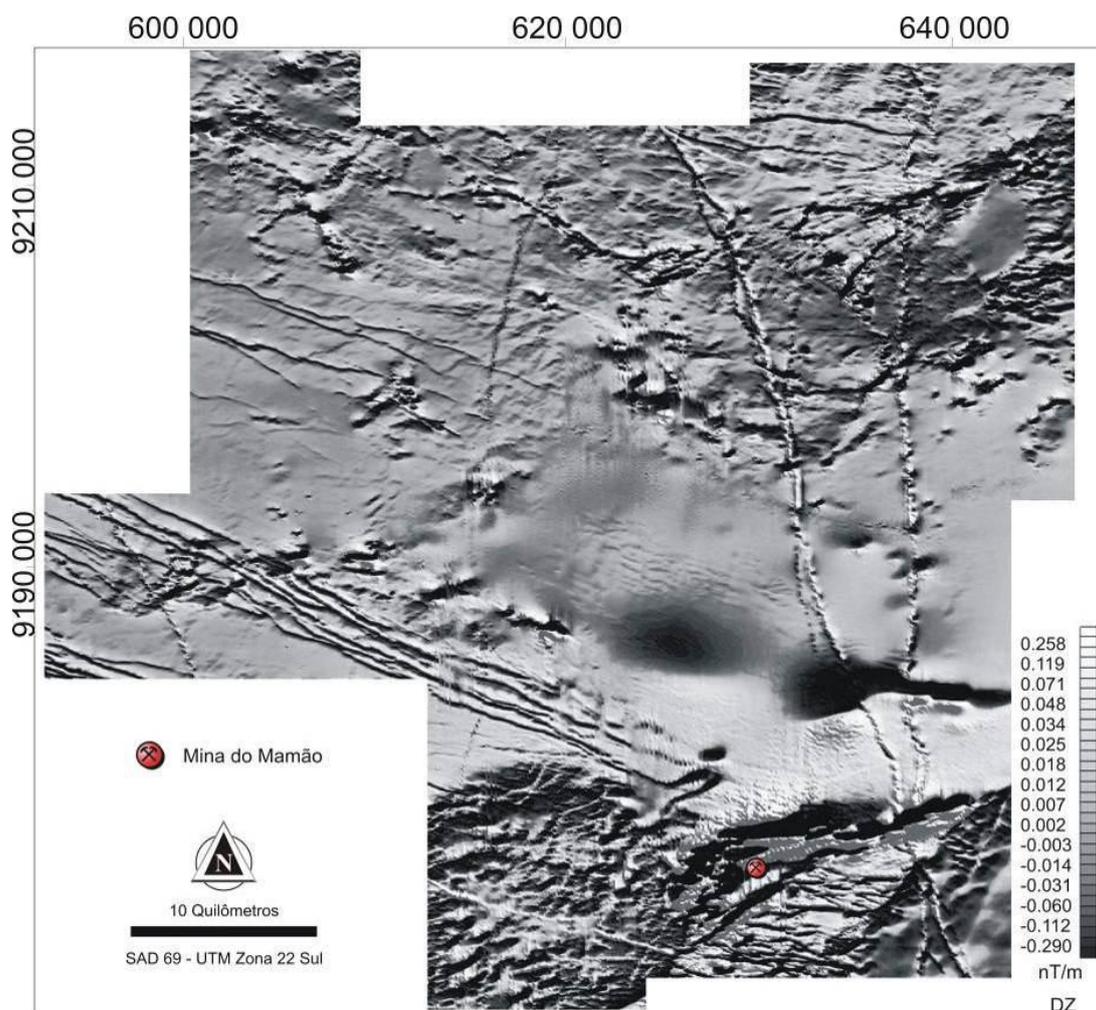


Figura 3.3 Mapa da derivada vertical de primeira ordem do campo magnético anômalo gerado para a região da área de estudo. Iluminação com 45° de inclinação e declinação. A imagem ressalta trends NW, NE e áreas com relevo magnético agitado com mais alta frequência evidenciando porções do *greenstone belt* Andorinhas, porção onde localiza-se a mina do Mamão.

A natureza dipolar do campo magnético associada a um campo induzido não vertical provoca o deslocamento da resposta magnética em relação à fonte causadora, dificultando o posicionamento correto desta. A amplitude do sinal analítico - ASA (Roest *et al.* 1992) é uma função que não depende da direção de magnetização da fonte e das características do campo magnético terrestre. Por possuir estas propriedades e ser uma função simétrica, sua resposta tem seus picos posicionados sobre as bordas do alvo ou feição geológica estudada, facilitando sua interpretação. A **figura 3.4a** mostra o mapa da amplitude do sinal analítico de ordem zero do campo magnético anômalo para

a área de estudo. O mapa realça regiões com mais alta amplitude que estão associadas as seqüências vulcano-sedimentares e outras porções com gradiente menor associadas aos metassedimentos da Bacia do Rio Fresco, dos granitos anorogênicos e granitóides.

Contatos geológicos são normalmente marcados por forte variação magnética lateral com origem na diferente magnetização das rochas. A amplitude do gradiente horizontal - AGHT (Cordell & Grauch 1985) tem a propriedade de realçar regiões onde o gradiente magnético é mais elevado delimitando melhor os contatos e estruturas lineares. Inicialmente foi utilizado em dados gravimétricos por ser tratar de um campo monopolar, o que facilita a sua interpretação. É utilizado também em dados magnéticos, principalmente para delimitar melhor os contatos já conhecidos e estruturas com menor intensidade magnética (**Figura 3.4b**).

O cálculo dos gradientes medidos, G_x e G_y , foi efetuado pela Lasa Engenharia e Prospecções S.A. (2008). O gradiente lateral (G_x) representa a diferença dos valores medidos nos dois sensores presentes nas asas da aeronave, sendo este valor dividido pela respectiva distância entre os mesmos (15,70 m) (**Figura 3.5**). Já o gradiente longitudinal (G_y) equivale à média dos valores registrados pelos sensores localizados na asa da aeronave, posteriormente subtraída do valor adquirido pelo sensor da fuselagem. Este resultado foi dividido pela distância entre a localização dos sensores da asa e o da fuselagem (12,70 m) (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008) (**Figura 3.6**). As imagens dos gradientes medidos G_x e G_y (**Figuras 3.5 e 3.6**), apresentam melhor definição das feições de baixos gradientes em relação às respectivas imagens calculadas a partir das derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo.

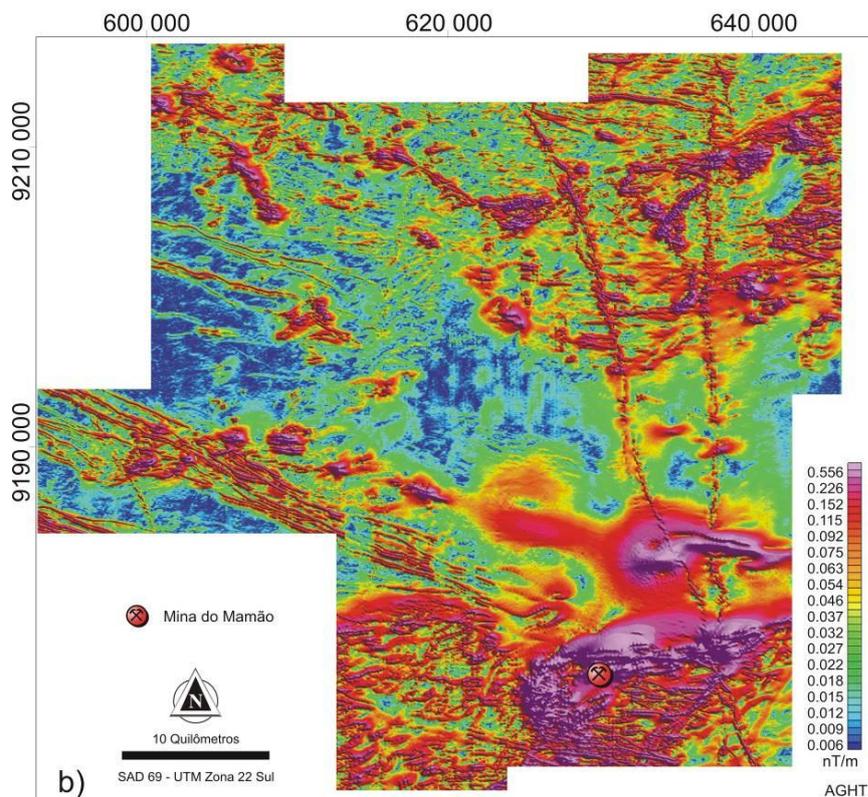
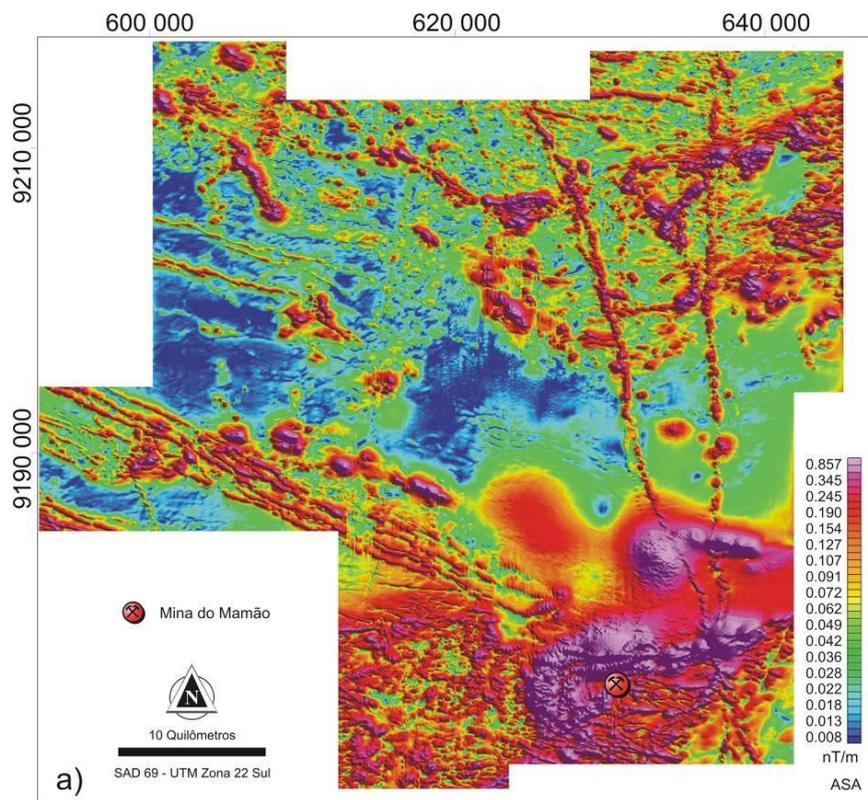


Figura 3.4 Imagens magnetométricas. a) a amplitude do sinal analítico de ordem zero do campo magnético anômalo (ASA); b) imagem da amplitude do gradiente horizontal

total usando os gradientes medidos G_x e G_y . Iluminação com 45° de inclinação e declinação.

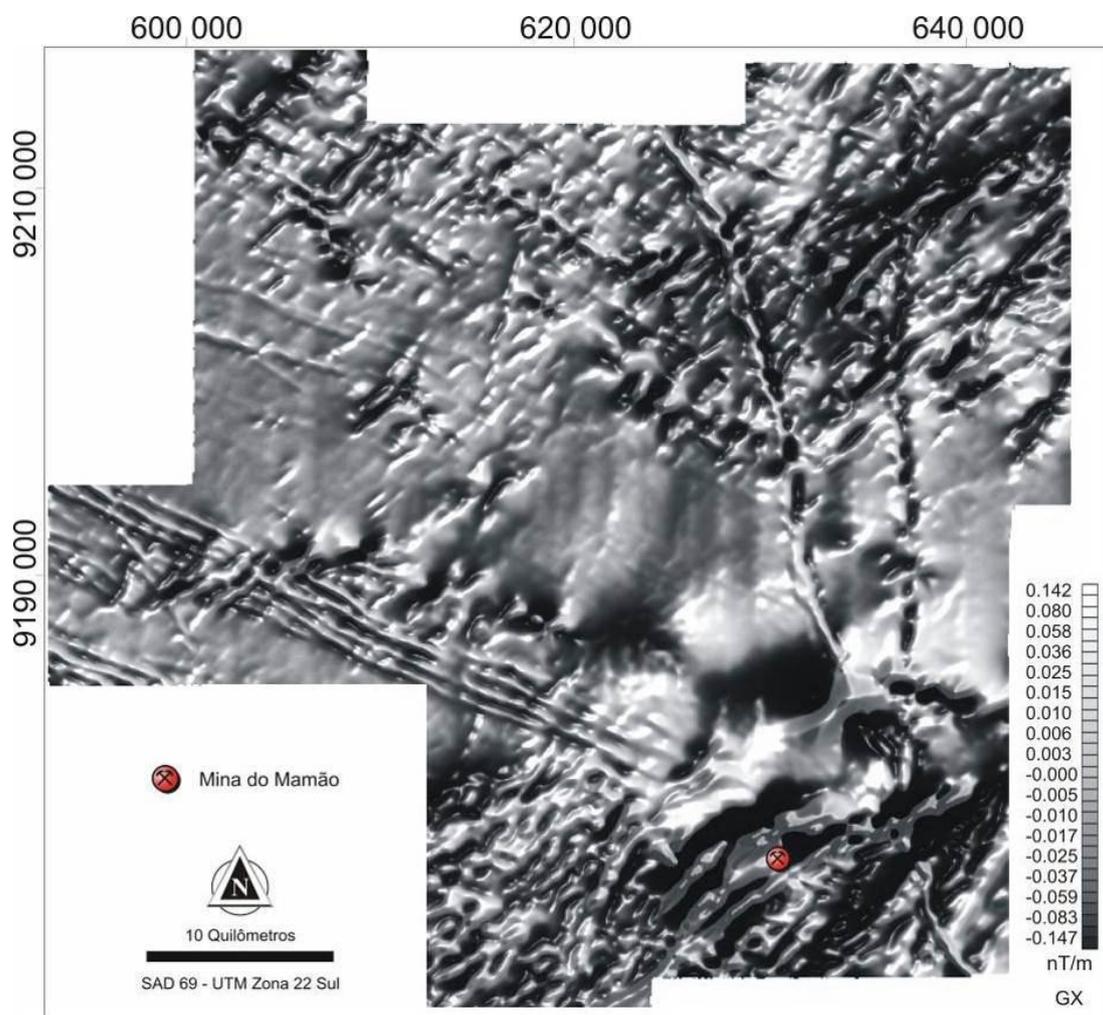


Figura 3.5 A figura apresenta o gradiente horizontal medido na direção x – G_x em tons cinza.

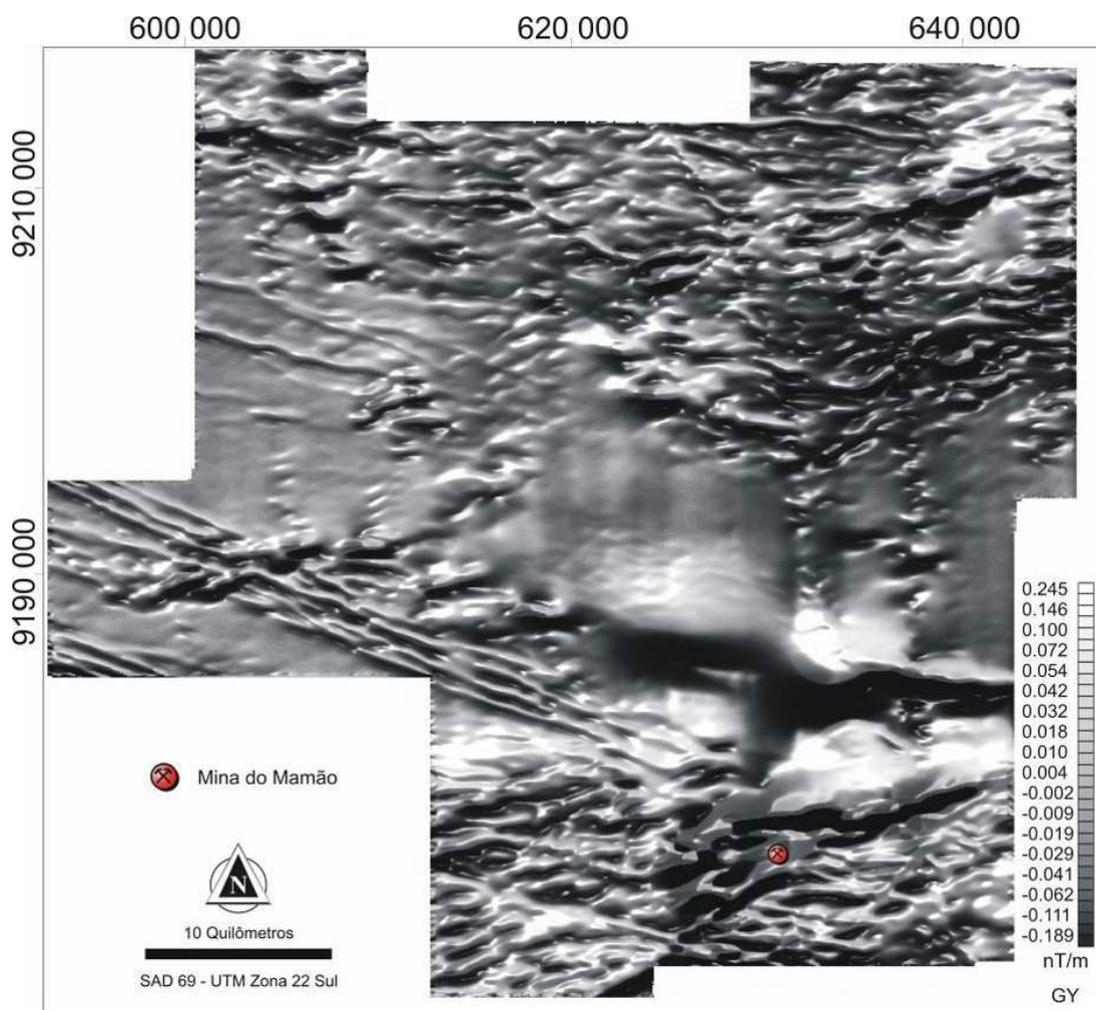


Figura 3.6 Imagem do gradiente horizontal medido na direção $y - Gy$ para a região do Projeto Andorinhas.

3.2.2 Dados Gamaespectrométricos

Os dados gamaespectrométricos são obtidos medindo-se a radiação gama emitida por determinados elementos que compõe os diversos tipos de rochas. O valor de radiação gama medido é proporcional à concentração dos elementos. Os dados gamaespectrométricos são complementares ao estudo dos produtos derivados do campo magnético anômalo. Isto por que fontes magnéticas de várias profundidades contribuem para o campo medido enquanto que os dados radiométricos representam apenas os primeiros 30 a 40 centímetros da superfície.

Foram gerados imagens a partir dos dados de contagem total corrigida ($\mu\text{R/h}$), bem como dos canais de K (%), eU (ppm), eTh (ppm) (**Figura 3.7**).

Gamaespectrometria

Canais radiométricos micronivelados

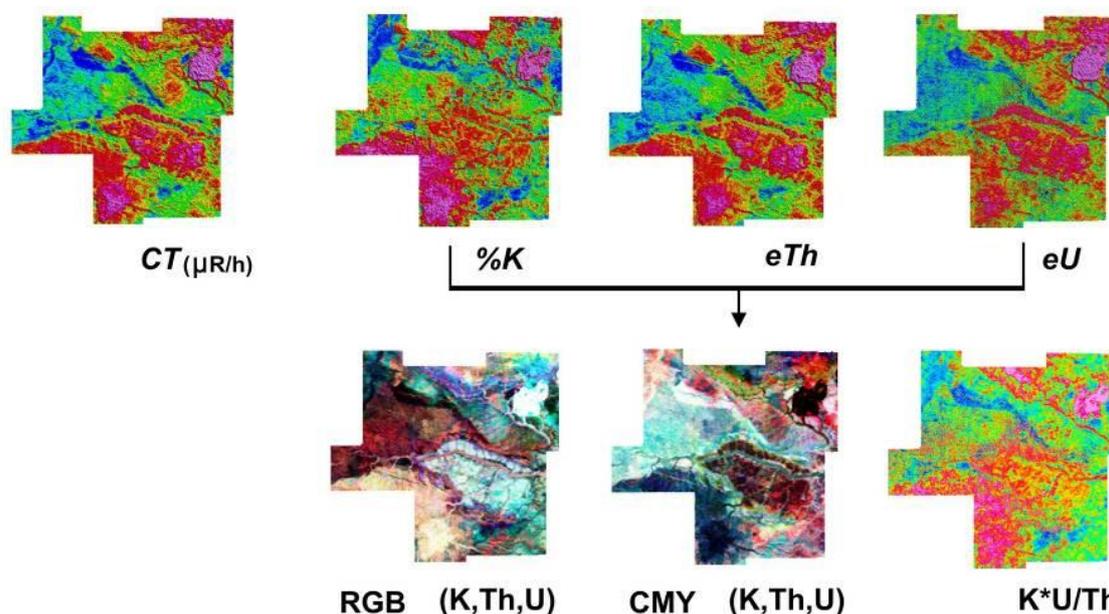


Figura 3.7 Fluxograma ilustrando as etapas de geração dos produtos gamaespectrométricos.

A partir destes três últimos canais foram elaboradas composições ternárias, em falsa cor, utilizando os padrões de cores RGB (K,Th,U) e CMY (KThU) (**Figura 3.11**). A cada canal (K, Th e U) foi atribuída uma determinada cor com sua intensidade, sendo proporcional a concentração dos elementos naquele ponto de observação. O processo de adição das cores que representam cada canal possibilitou uma diferenciação dos diversos litotipos na área de estudo. Os mapas em RGB (K,Th,U) e CMY (KThU) foram comparados com a topografia, gerado a partir dos dados derivados do modelo digital da geofísica, com o objetivo de observar o efeito desta sobre a concentração dos elementos (**Figura 3.11**). Efeitos de intemperismo químico e transporte de materiais devem ser observados para evitar interpretações errôneas. O canal de contagem total corrigida representa toda a radiação gama com energia entre 0,5 e 3,0 MeV. Este canal define os domínios com maior emissão de radiação gama.

O elemento potássio é o elemento mais abundante entre os elementos medidos em um levantamento gamaespectrométrico. É comum em diversos tipos de rochas

como, por exemplo, rochas graníticas permitindo em alguns casos a discriminação de certos litotipos. É um elemento facilmente lixiviado quimicamente podendo ser transportado para vales formando aluviões sendo carregado na forma de argilo-minerais. Seu pico de energia é 1,46 MeV. A alta concentração deste elemento (concentração média na crosta de 2,3%) possibilita maior taxa de amostragem durante o levantamento o que melhora a representação estatística deste canal. A **figura 3.8** apresenta o mapa de potássio da área estudada.

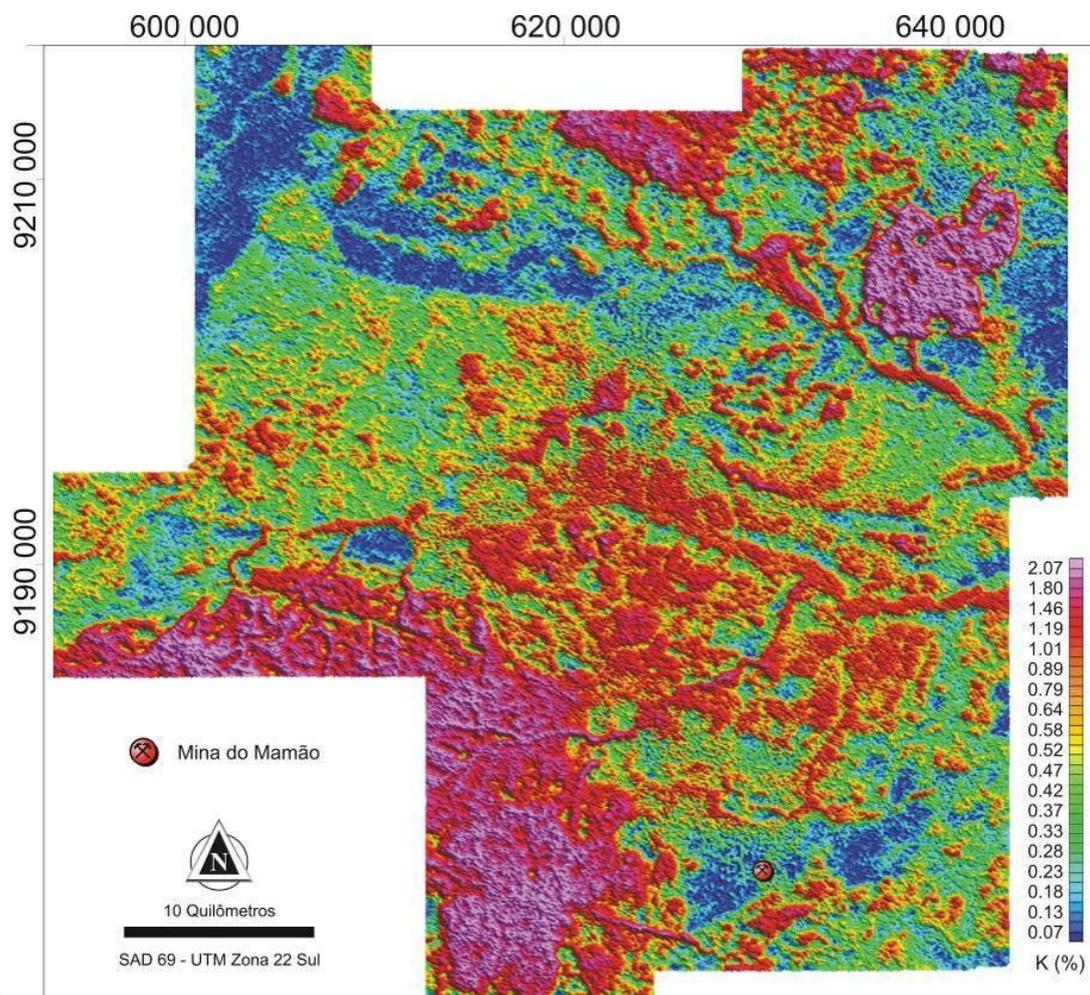


Figura 3.8 Imagem do canal do K (%) da área de estudo.

O tório (concentração média na crosta terrestre de 9 ppm) se caracteriza por ser o elemento mais inerte dos três elementos medidos. Por isso sua presença em maior

concentração que os demais, realça regiões que normalmente sofreram maior intemperismo químico marcando enriquecimento relativo deste elemento. O tório, assim como o urânio, não é medido diretamente. Sua contagem é feita a partir da medida de um elemento radioativo filho da sua série de decaimento. Normalmente o U e o Th têm suas medidas de concentração estimadas pelo ^{214}Bi e pelo ^{208}Tl respectivamente. Seu pico de energia situa-se 2,615 MeV. A **figura 3.9** apresenta o mapa de tório da área de estudo.

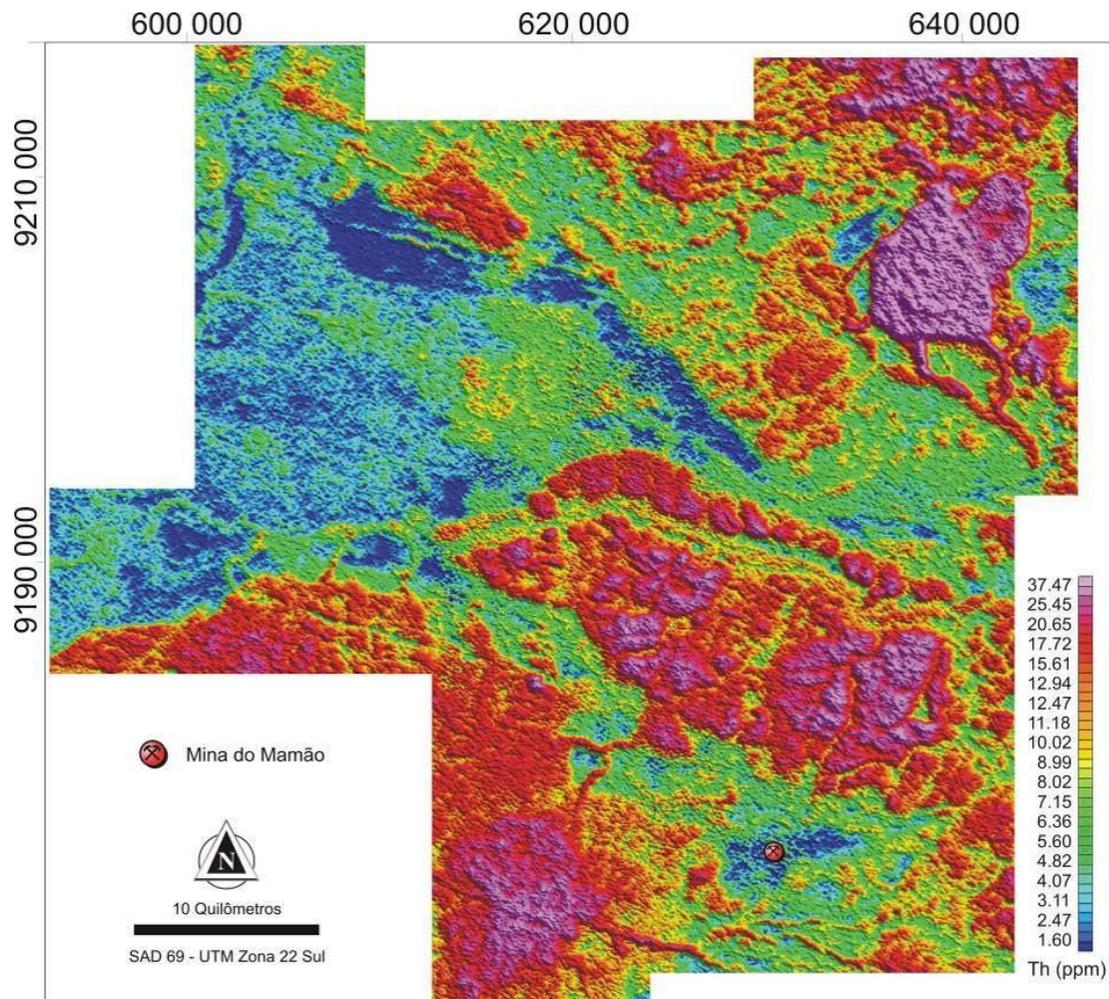


Figura 3.9 Imagem do canal do Th (ppm) da área estudada.

O urânio é o elemento com a menor concentração média na crosta terrestre de 2,5 ppm sendo, portanto, o canal de pior amostragem e com baixa relação sinal/ruído. Em ambiente oxidante é solúvel formando minerais com óxidos de ferro e com

carbonatos. Pode apresentar transporte por lixiviação se concentrando em vales. Assim como o tório sua concentração *in situ* ocorre principalmente em minerais resistentes como zircão, por exemplo, podendo ter concentrações elevadas em rochas félsicas. Seu pico de energia situa-se em 1,76 MeV. A **figura 3.10** apresenta o mapa de urânio da área de estudo.

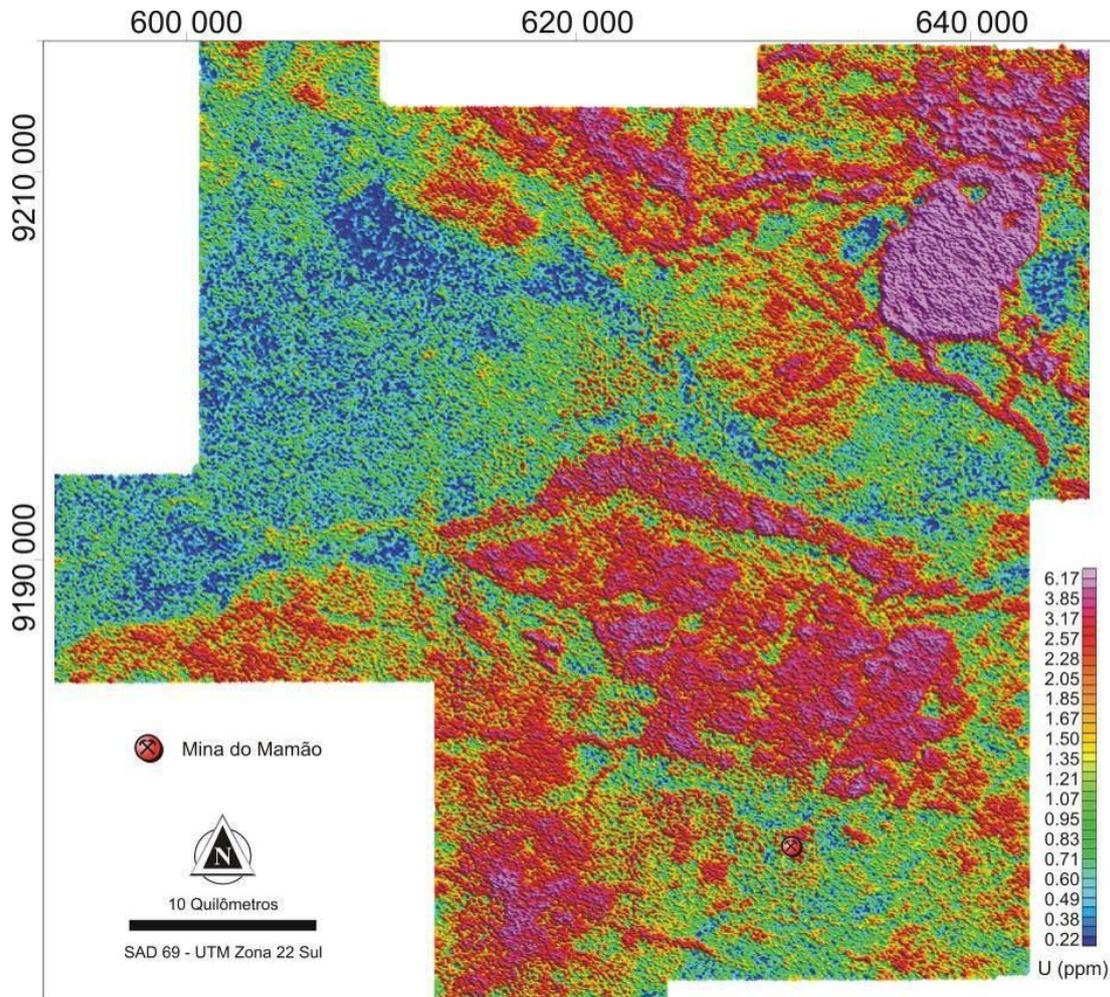


Figura 3.10 Imagem do canal do U (ppm) da área estudada.

As imagens ternárias possibilitam a visualização das concentrações dos três elementos em uma única imagem facilitando a discriminação dos domínios gamaespectrométricos. O K(%), eTh (ppm) e eU (ppm) são representados respectivamente pelas cores vermelho, verde e azul nas imagens RGB e pelo ciano, magenta e amarelo nas imagens CMY.

A composição colorida RGB representa uma das ferramentas mais utilizadas na análise e interpretação de dados gamaespectrométricos, onde tal combinação de cores pode ser representada geometricamente em um cubo pelas suas coordenadas. Os valores de brilho, ou níveis de cinza de cada componente no sistema de coordenadas RGB, constituem os eixos ortogonais no espaço de cor tridimensional.

Nesta técnica de realce digital as informações concernentes a três bandas ou imagens quaisquer são combinadas, assinalando cada uma delas uma das cores fundamentais (vermelho – **R** (*red*), verde – **G** (*green*) e azul – **B** (*blue*)). A imagem resultante obtida pelo processo aditivo destas três cores, produz uma cor branca para a soma das três informações componentes, se estas forem iguais, e cores diferentes para as combinações em pares, nas cores ciano (azul + verde), magenta (azul + vermelho) e amarelo (vermelho + verde). A percentagem de cada cor primária na imagem final indica a contribuição de cada uma das bandas na cena observada.

A atribuição das bandas aos canais deve se valer de algumas regras que facilitam a extração de informações. A sensibilidade diferencial do olho com relação às cores primárias permite definir mais tonalidades de vermelho e azul do que tons de verde. Portanto, bandas com informações texturais, marcadas por abruptas mudanças de números digitais, devem ser atribuídas à cor verde e aquelas com variações sutis alocadas às cores vermelho e azul.

Foram confeccionados mapas com as composições RGB (KThU) e CMY (KThU) sobrepostas ao modelo digital do terreno para análise do efeito do relevo sobre a concentração dos elementos. A análise destes produtos não indicaram problemas para interpretação dos dados devido à transporte de material, em regiões chaves na área de estudo (**Figura 3.11**).

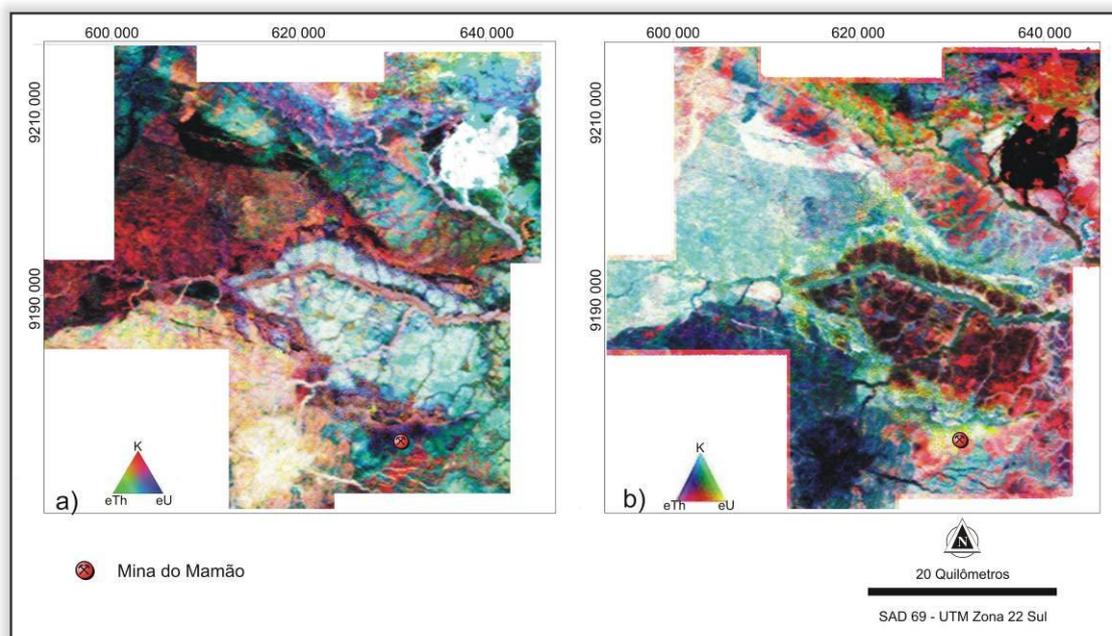


Figura 3.11 Composição ternária RGB (KThU) e CMY (KThU) para a área de estudo.

Para a interpretação de zonas de alteração hidrotermal associadas com a mineralização seguiu-se um tratamento gamaespectrométrico consistindo na geração de novas variáveis, razões Th/K, U/K, U/Th, K anômalo (Pires 1995) e parâmetro F (Efimov 1978). Essas imagens são de extrema importância para a caracterização de alterações hidrotermais em áreas enriquecidas em potássio, variando a eficiência em determinadas áreas. Ou seja, em função do contexto geológico e da qualidade dos dados. Dentre elas a mais usada foi o parâmetro F (**Figura 3.12**).

O parâmetro F, ou mesmo fator F, mostra a distribuição do potássio em relação aos elementos urânio e tório. O fator F se baseia na operação entre os dados de urânio, tório e potássio por meio da seguinte expressão: $F = K * U/Th$.

Efimov (1978 apud Gnojek & Prichystal 1985) propôs uma série de relações entre os radioisótopos, destacando que a expressão acima permite ressaltar o enriquecimento de potássio e urânio em relação ao tório, podendo indicar áreas com alteração hidrotermal associadas às mineralizações. Trabalhos como o de Fornazzari Neto & Ferreira (2003), Quadros *et al.* (2003) e Carrino (2010) exemplificam com sucesso o uso do parâmetro F para a prospecção de ouro.

Os dados aerogamaespectrométricos foram utilizados para identificar possíveis zonas de alteração hidrotermal, com concentrações anômalas de potássio, dentro das diferentes unidades que compõem o *greenstone belt*. De acordo com Dickson & Scott (1977), as assinaturas gamaespectrométricas das unidades enriquecidas hidrotermalmente dos depósitos de ouro são bem variáveis. O principal processo natural de enriquecimento do potássio deve-se à alteração hidrotermal sendo que as alterações potássicas normalmente atuam como guias indiretos de concentrações auríferas e normalmente são acompanhadas pelo enriquecimento em urânio. No *greenstone* Andorinhas, onde se encontra o *trend* Mamão/Babaçu, a alteração potássica é acompanhada de urânio. Já o elemento tório, segundo Fornazzari Neto e Ferreira (2003), apresenta uma relação inversa. O potássio ocorre naturalmente concentrado em zonas de alteração hidrotermal, sendo que o tório caracteriza-se por ser o elemento mais imóvel dentre os três detectados em gamaespectrometria, podendo ser utilizado como guia para determinar as concentrações normais de cada material. A normalização do potássio em relação ao tório permite a eliminação do efeito litológico primário e a determinação de concentrações anômalas daquele elemento (Carvalho 2006).

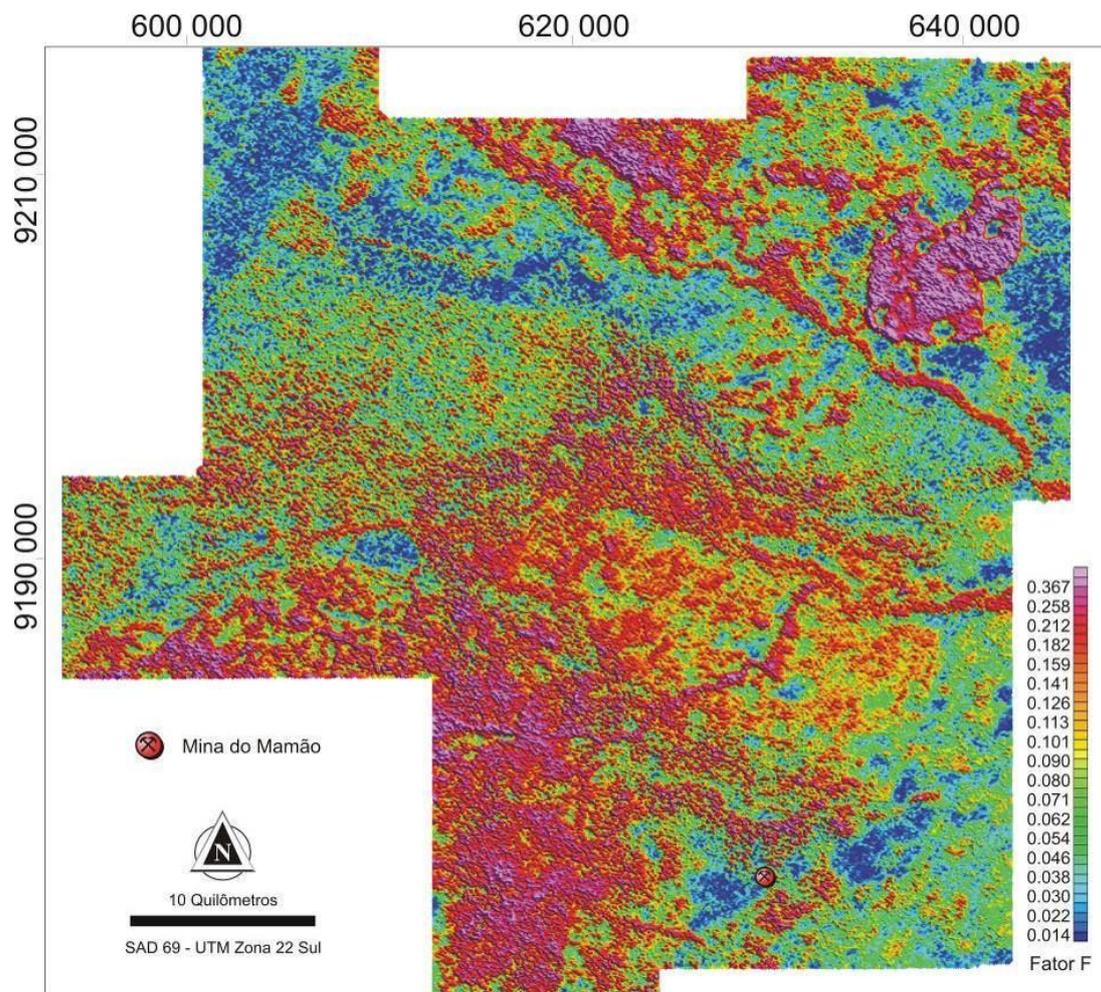


Figura 3.12 Imagem do parâmetro F (Fator F) da área estudada utilizada na tentativa de realçar o enriquecimento em potássio associados aos corredores de cisalhamento.

3.3 INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGEOFÍSICOS

A interpretação qualitativa dos dados aerogeofísicos iniciou-se com a análise dos sinais que compunham cada relevo estudado. O objetivo foi demarcar padrões que individualizassem unidades com comportamento distinto, bem como padrões de assinaturas que pudessem traduzir feições estruturais importantes. Buscou-se interpretar dados magnetométricos com auxílio da gamaespectrometria para definição de estruturas de primeira ordem e estruturas subordinadas ao longo da seqüência *Greenstone* da área de estudo. Estes dados facilitaram a individualização de corpos graníticos e suas variações utilizando os produtos gerados e sua expressão em superfície e/ou sub-superfície, bem como foram de extrema importância para o delineamento das sequências *greenstone* da área de estudo.

3.3.1 Magnetometria

A análise do campo magnético anômalo foi auxiliada por transformações lineares do mesmo, como as derivadas horizontais em x e y (D_x , D_y) e a derivada vertical (D_z), a fim da produção da imagem da amplitude do sinal analítico – ASA (Roest *et al.* 1992), bem como através da interpretação dos gradientes medidos (G_x , G_y). O produto ASA (**Figura 3.4a**) permite o posicionamento de corpos magnéticos já que a técnica compreende uma função simétrica em que os picos do sinal analítico encontram-se centrados nas bordas das anomalias magnéticas (Nabighian *et al.* 2005).

A extração e caracterização das estruturas magnéticas foram feitas a partir da utilização e interpretação da derivada vertical (D_z), da inclinação do sinal analítico – ISA (Graunch & Cordell 1987) e dos gradientes G_x e G_y , junto com as descrições de campo da geologia local. Os dados aeromagnetométricos foram utilizados para a caracterização do arcabouço estrutural com o intuito de definir zonas de influência metalogenética como mostra a **figura 3.13**.

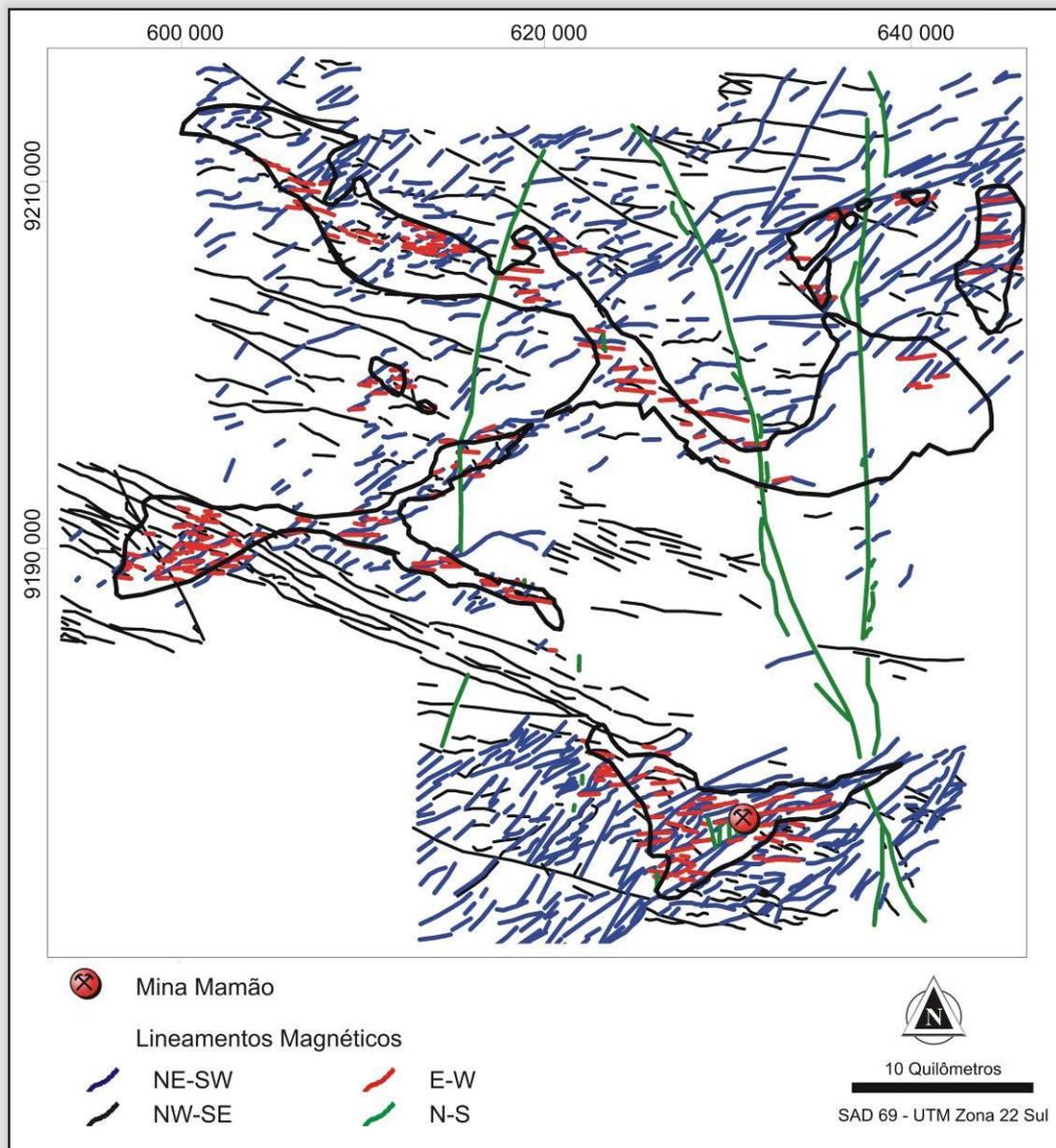


Figura 3.13 A figura mostra um mapa de lineamentos magnéticos confeccionado a partir da interpretação dos gradientes medidos (G_x e G_y) e comparação com os gradientes calculados (D_x e D_y). Para consolidar a interpretação foram utilizadas a primeira derivada vertical do campo magnético anômalo e a inclinação do sinal analítico. As diferentes direções estão indicadas acima em cores diferenciadas para facilitar o entendimento dos critérios de corte e superposição observados na interpretação e validados posteriormente em trabalhos de campo na região.

A partir da análise e interpretação dos gradientes horizontais medidos em x (G_x) e em y (G_y), da comparação com os gradientes calculados, primeira derivada vertical do campo magnético anômalo e da inclinação do sinal analítico - ISA (Miller & Singh

1994, Thurston & Smith 1997), extraiu-se os lineamentos magnéticos, os quais foram posteriormente classificados hierarquicamente em estruturas de primeira ordem, e estruturas secundárias de segunda ordem (**Figura 3.14**).

As etapas de extração e interpretação dos lineamentos estruturais foram organizadas da seguinte forma: (i) extração dos lineamentos estruturais em cada um dos produtos isoladamente; (ii) interpretação e agrupamento dos lineamentos em famílias de estruturas e (iii) interpolação com estruturas previamente mapeadas.

Cabe ressaltar que o termo lineamento aqui utilizado representa uma feição superficial mapeável, linear ou curvilínea que pode estar relacionada a falhas, fraturas ou outras estruturas (Sabins 1996). Extrapolou-se este conceito para o caso dos dados magnéticos, onde os lineamentos são mapeados preferencialmente através de cristas magnéticas. A extração de estruturas em vales magnéticos foi incorporada na interpretação para complementar o arcabouço estrutural. A metodologia de extração dos lineamentos estruturais, bem como os grupamentos de estruturas reconhecidos serão descritos a seguir.

A interpretação dos relevos magnéticos dos produtos derivados do campo magnético anômalo como a primeira derivada do campo magnético anômalo (**Figura 3.3**), da amplitude do sinal analítico (Nabighian 1972, Nabighian 1974, Roest *et al.* 1992, **figura 3.4a**), amplitude do gradiente horizontal total (Cordell & Grauch 1985, **figura 3.4b**) e os gradientes medidos G_x e G_y (**Figuras 3.5 e 3.6**) mostram que:

1. realçam extensos lineamentos em diversas direções, predominando longos lineamentos de direção NE, sendo cortadas pelas estruturas NW e outras N-S. Estruturas secundárias E-W, de segunda ordem, também são observadas. Essas estruturas são evidenciados pelo alto gradiente magnético observado na imagem amplitude do sinal analítico e contrastes entre cristas de baixa e alta amplitude observada na imagem na primeira derivada vertical do campo magnético anômalo. Em campo, as estruturas NW representam diques de diversas naturezas: máficos, intermediários e félsicos, sob forma de corpos subverticais, tabulares e dispõem-se predominantemente na direção NW a NNW, menos frequente nas direções E-W e N-S (Medeiros 1987; Ferreira *et al.* 2008). Observa-se que os diques com direção N-S são mais tardios do que os de direção NW-SE, o que é perfeitamente identificado na magnetometria (**Figura 3.3**).

Esses diques ocorrem cortando os sedimentos da bacia do Rio Fresco, bem como granitos anorogênicos paleoproterozóicos como o granito Mandassaia (**Figura 3.18**).

2. a imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) (**Figura 3.4a**), realça os diferentes domínios magnéticos e mostra altos valores na região sudeste, bem como no extremo NE. No extremo centro leste da área também apresenta um alto relevo magnético. Observou-se que as assinaturas elevadas do sudeste são associadas às composições das seqüências vulcânicas máficas e ultramáficas e de seus equivalentes alterados (e.g., magnetita gerada da alteração de olivinas). As rochas desse domínio compreendem a base ultramáfica e as unidades máficas do Grupo Babaçu nos *greenstones* Andorinhas, Rio Maria e Identidade. Esse domínio também é bem marcado nas unidades ultramáficas próximas do granito anorogênico Mandassaia, localizado no extremo NE da área. O alto relevo magnético da porção centro leste está encoberto e eventualmente pode estar relacionado a porções de formação ferrífera do *greenstone* Andorinhas.
3. na região da mina do Mamão, também na porção SE da área de estudo, o alto relevo assemelhando a um sigmóide pode estar relacionado à formação ferrífera bandada bem como o depósito Big Mac com o pacote de hematita compacta. Os domínios magnéticos relacionados a essas unidades são similares àqueles verificados em áreas com predomínios das ultramáficas da base do Grupo Babaçu, bem como nas porções NW e NE da área. Na região do *greenstone* Andorinhas há uma dispersão grande desse domínio com alto relevo magnético, todavia uma boa parte não aflora. Dois outros fatores corroboram para a disposição espacial dessa dispersão devendo-se ao extenso colúvio deste material por toda a encosta sul da Serra de Andorinhas, bem como finas lentes de formação ferrífera intercaladas com as unidades máficas e metassedimentos do Babaçu.
4. baixos relevos magnéticos são vistos no centro e oeste da área. Esses baixos estão correlacionados com os granitóides trondhjemito Mogno e granodiorito Rio Maria. Com exceção dos diques intrusivos ou influência resultante dos mesmos, os terrenos granitóides e os granitos anorogênicos estão associados a esse baixo relevo magnético. A bacia do Rio Fresco também é caracterizada por baixos magnéticos, todavia há um alto relevo magnético no extremo leste. Esse

alto relevo magnético está encoberto e eventualmente pode estar relacionado a porções de formação ferrífera do *greenstone* Andorinhas.

Diagramas de rosetas azimutais foram gerados a partir dos lineamentos estruturais observados nas imagens de GX, GY, DZ, ASA, AGHT e ISA. Como citado anteriormente, para uma melhor definição dessas estruturas os lineamentos foram classificados como de primeira ordem e segunda (Figuras 3.13 e 3.14). Os de primeira ordem possuem direção NE-SW e NW-SE. Os de segunda ordem apresentam direção aproximada E-W. De acordo com Huhn (1992) as ocorrências de ouro da região do *greenstone* Andorinhas são controladas, em sua maioria, por grandes corredores estruturais NE-SW, e essa mesma estruturação é verificada também em todo o *greenstone* Rio Maria. Este estudo mostrou que os corpos e depósitos auríferos ao longo desses corredores de cisalhamento estão alojados em zonas de dilatação E-W. Já no *greenstone* Identidade, de acordo com Souza (1994), as ocorrências são controladas por corredores estruturais NW-SE e evidências de campo dessa dissertação mostram que os depósitos também possuem direção E-W.

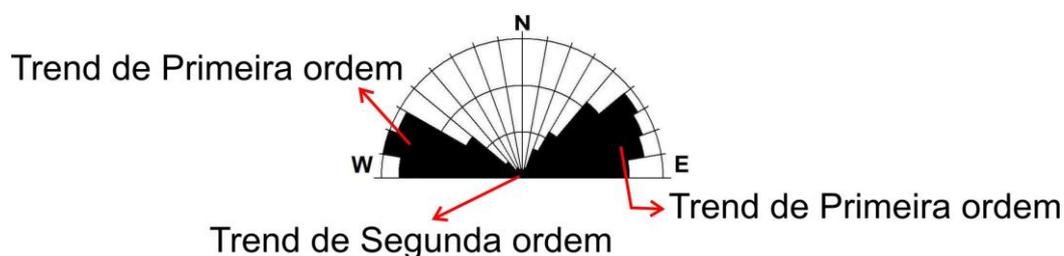


Figura 3.14 Diagrama de rosetas ilustrando as três direções principais associadas à mineralização. Sendo o trend de primeira ordem com direção NE-SW / NW-SE e o de segunda ordem com direção aproximada E-W.

Todas essas estruturas são cortadas por lineamentos rúpteis de direção N-S, onde estão encaixados diques máficos. Segundo Silva Jr. *et al.* (1999) e Gastal *et al.* (1987), estes diques se formaram no final do paleoproterozóico, sendo aproximadamente sincrônicos do magmatismo anorogênico que ocorre na Amazônia Oriental.

3.4 APLICAÇÃO DA GAMAESPECTROMETRIA NO REFINAMENTO DA CARTOGRAFIA GEOLÓGICA NA REGIÃO DO GREENSTONE BELT ANDORINHAS

Para o refinamento da cartografia geológica e, posteriormente, aplicação para fins prospectivos efetuou-se a interpretação das diferentes classes observadas na composição ternária RGB (KThU). Para a confecção do mapa litogeofísico efetuou-se uma interpretação qualitativa conjunta de todas as imagens gamaespectrométricas em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando-se uma classificação visual. Para tanto, desenvolveu-se um esquema de classificação levando em conta a variação dos teores de potássio, urânio e tório, divididos em três categorias, cada qual deles (K, U e Th), em baixo, médio e alto. Foram mapeadas unidades gamaespectrométricas representadas através de 12 classes que mostram a variação dos teores dos radioelementos K, Th e U na área estudada. A **figura 3.15** ilustra a variação destes radioelementos para a área estudada.

As unidades gamaespectrométricas foram correlacionadas com informações geológicas disponíveis. Obteve-se um mapa geológico refinado (**Figura 3.18**) com forte *input* da aerogeofísica de alta resolução validada com dados de campo. Para tanto, o mapa litogeofísico foi re-interpretado utilizando todo o conhecimento geológico disponível na literatura, dados da Troy/Reinarda Mineração oriundos dessa dissertação de mestrado e critérios de interpretação dos dados aerogeofísicos.

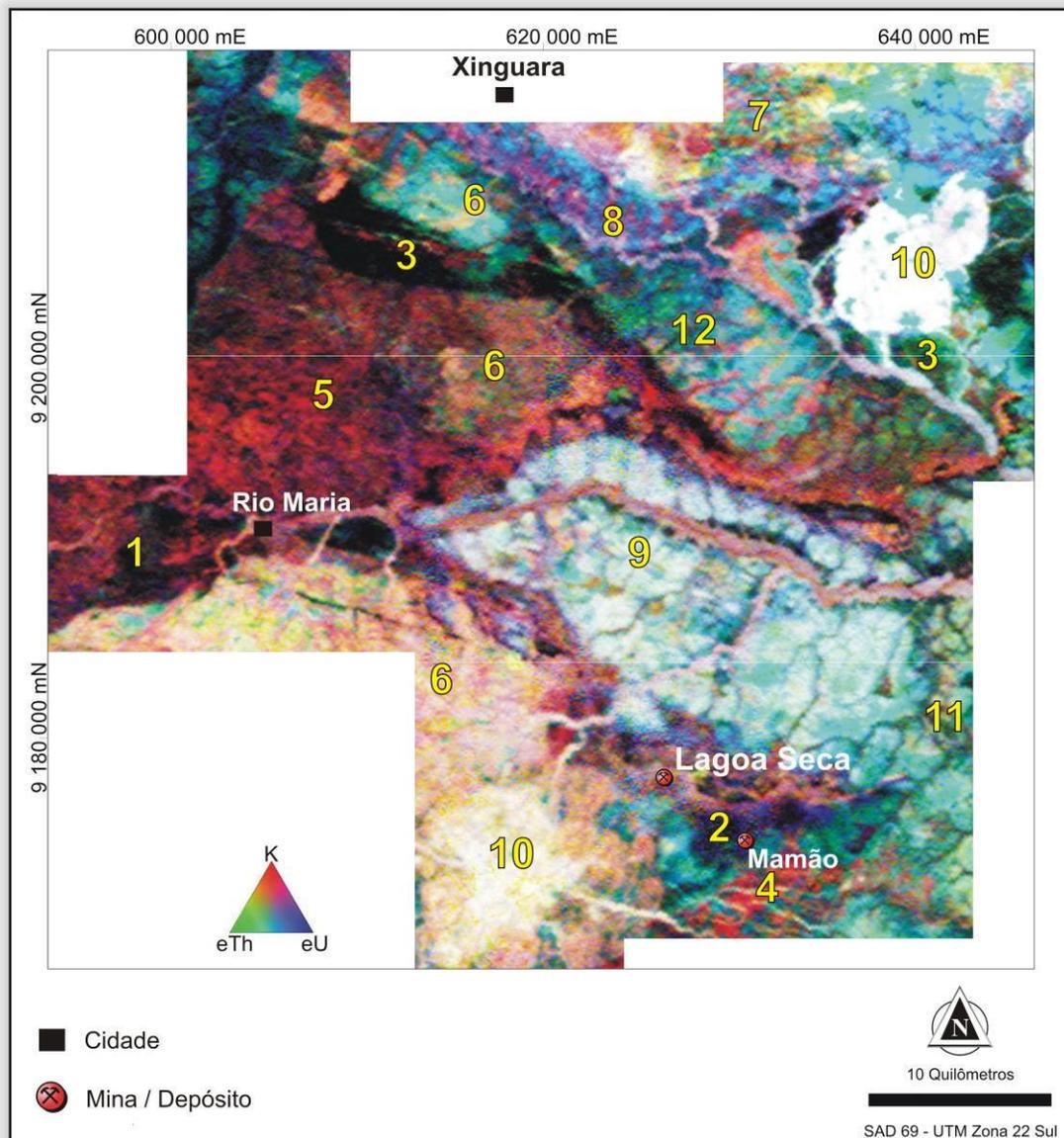


Figura 3.15 Imagem de composição ternária falsa cor RGB (K,Th,U) mostrando as diferentes assinaturas gamaespectrométricas dos domínios das unidades geológicas que são equivalentes na literatura por: 1 - *Greenstone Belt* Rio Maria; 2 - *Greenstone Belt* Andorinhas; 3 - *Greenstone Belt* Identidade; 4 - Tonalito Arco Verde; 5 - Trondjemito Mogno; 6 – Suíte Sanukitóide Rio Maria; 7 – Granito Xinguara; 8 – Tonalito Caracol; 9 - Grupo Rio Fresco; 10 - Granitos Anorogênicos; 11 - Faixa Araguaia e 12 Suíte Sanukitóide Rio Maria (porém, com assinatura distinta da porção 6). A figura mostra também a localização do depósito Lagoa Seca e da mina de ouro do Mamão hospedados no *greenstone belt* Andorinhas.

A imagem do canal do potássio (**Figura 3.8**) mostra uma alta concentração na região sudoeste e pequena porção da região nordeste da área estudada. Na porção

central há uma concentração média, já nas regiões sudeste e noroeste há uma baixa concentração desse radioelemento. A alta concentração do potássio está associada aos granitos anorogênicos Mandassaia e Jamon, seguido da Suíte Sanukitóide Rio Maria na porção SW da área. O canal do potássio também destaca os baixos valores correspondentes aos *greenstone belts* Andorinhas, Identidade e Rio Maria. Os médios valores estão associados aos quartzitos da bacia do Rio Fresco e com o trondhjemitó Mogno, todos em tons de azul ou verde, resultante das baixas proporções de potássio nestas rochas. Contudo, como mostra a **figura 3.16**, em meio aos baixos valores de potássio sobressaem pelo menos três feições que controlam valores altos (cor amarela ou vermelha). Estas compreendem:

- 1 área de ocorrência dos antigos garimpos ao longo da zona de cisalhamento Malvinas sendo resposta das intrusões ácidas de quartzo pórfiro com direção N70°W na porção NW do *greenstone* Identidade;
- 2 alvo Oeste Rio Maria (WRM) nas proximidades dos garimpos Manoel e Gilmar, onde as anomalias de potássio correspondem a rochas ácidas, alteradas hidrotermalmente, com direção N80°E na porção SW do *greenstone* Rio Maria;
- 3 intrusivas ácidas de composição dacíticas/riolíticas com direção N70°W na porção central do *greenstone* Andorinhas nas proximidades da Mina Mamão e do depósito Babaçu. Furos de sondagem mostram intensa alteração potássica com sericitização e biotitização, porém com o forte intemperismo da região e a escassez de afloramentos se torna difícil identificar essa alteração hidrotermal no campo.

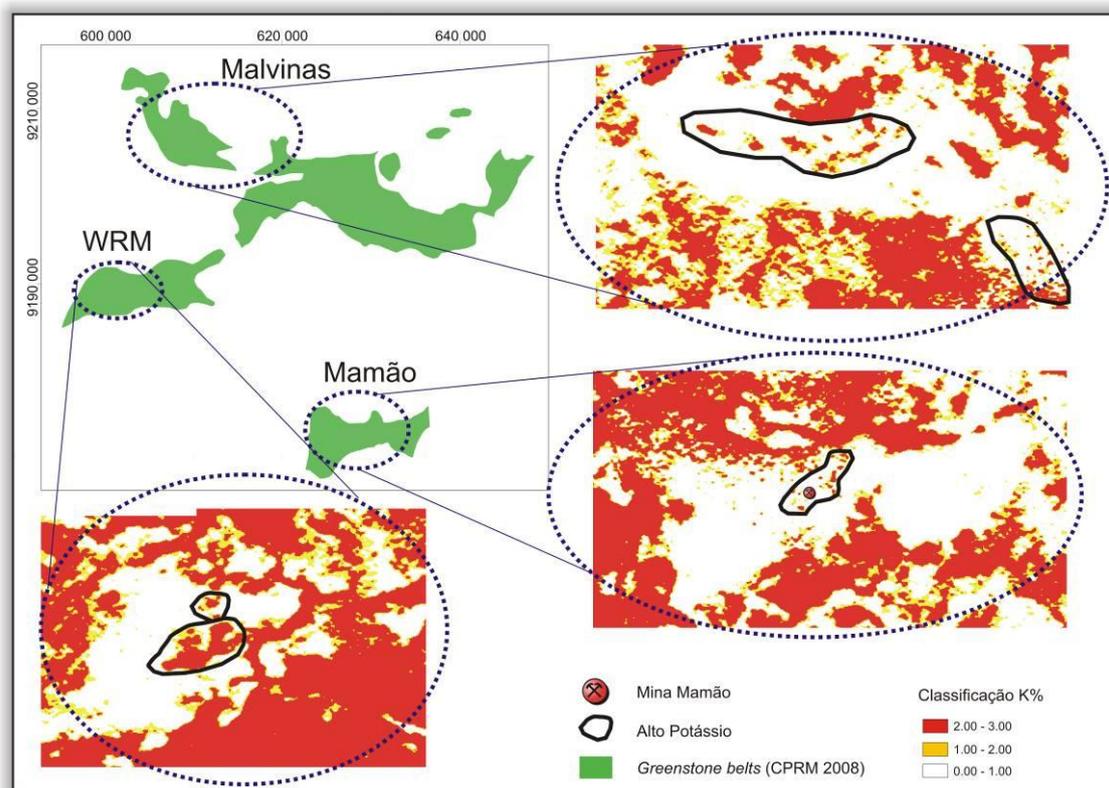


Figura 3.16 Porções de alto potássio no domínio dos *greenstone belts* (CPRM 2008) na imagem do canal do K%, em três blocos principais, Malvinas, WRM (Oeste Rio Maria) e Mamão. O canal do potássio foi classificado em três classes de acordo com a porcentagem, baixo (branco), médio (- amarelo), alto (vermelha).

A imagem do canal do tório (**Figura 3.9**) mostra a pouca mobilidade desse elemento. Alta concentração desse radioelemento pode ser observada nas regiões NE, centro-leste e sudoeste, principalmente, nos platôs. Baixos valores se concentram na região oeste e NW. Nas demais porções da área os valores variam de baixo a médio. Comparando esses dados com a geologia foi possível verificar que os baixos valores correspondem aos *greenstone belts* Andorinhas, Rio Maria e Identidade. Os baixos valores destes se distinguem dos intermediários correspondentes aos granitóides trondhjemitó Mogno que por sua vez distingue dos altos valores dos granitos anorogênicos Jamon/Mandassaia, do granodiorito Rio Maria e dos metassedimentos do Grupo Rio Fresco. O contraste do granodiorito Rio Maria e dos granitos anorogênicos resulta da maior porcentagem de Th nos granodioritos do que com tonalitos e rochas vulcânicas máficas e ultramáficas, respectivamente dos *greenstone belts* Andorinhas, Rio Maria e Identidade.

Por outro lado, unidades metassedimentares do Rio Fresco claramente se destacam das metavulcânicas pelos valores elevados dos radioelementos Th e U (**Figuras 3.9 e 3.10**), diferença esta também retratada na imagem ternária RGB (**Figura 3.15**).

A base da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo Babaçu, representando os *greenstone belts* Andorinhas, Rio Maria e Identidade, é reconhecida nas porções sudeste, extremo oeste, e noroeste da área, pelos baixos valores nos canais do potássio e do tório. Já o topo do Grupo Babaçu é claramente reconhecido na porção centro-leste da área com valores medianos de potássio e tório, tendo a mesma assinatura o Grupo Lagoa Seca na porção sudeste do *greenstone* Andorinhas.

A imagem ternária RGB (KThU) de alta resolução teve grande valia no auxílio ao mapeamento geofísico-geológico. Para a área de estudo foi possível discriminar com grande acuidade visual as maiores unidades encontradas em campo. Foi possível separar a área dominada pelos granitoides arqueanos em contato com as seqüências *greenstone belts* Andorinhas, Rio Maria e Identidade, bem como do Grupo Rio Fresco na porção central da área. O ternário marcou visivelmente o contraste (contato) entre as camadas predominantemente de caráter siltoso a argiloso com coloração azul claro, daquelas de caráter arenoso e coloração avermelhada dos quartzitos pertencentes ao Grupo Rio Fresco. Da mesma forma foi possível distinguir os granitos anorogênicos na porção centro sul e nordeste da área.

As assinaturas gamaespectrométricas dos *greenstone belts* são caracterizadas, em sua maioria, por baixas concentrações dos radioelementos de K%, eTh e eU resultando numa cor escura, porém na porção sudeste da área, o *greenstone* Andorinhas é caracterizado por altas concentrações de eTh e eU com cores verde e azul provavelmente relacionados à metassedimentos do Grupo Lagoa Seca.

De acordo com a literatura a Suíte Sanukitóide Rio Maria (anteriormente chamado de Granodiorito Rio Maria), localiza-se nas porções sudoeste e norte-nordeste da área de estudo. No entanto, observa-se diferentes assinaturas geofísicas nos dois domínios. A porção sudoeste é caracterizada por concentrações altas nos três radioelementos assemelhando à assinatura do granito anorogênico Jamom, porém com menores concentrações de eTh e eU. Já a Suíte Sanukitóide Rio Maria a norte do *greenstone* Identidade possui valores de K%, eTh e eU mais baixos do que a área tipo a

sul da cidade de Rio Maria. Em pequenas porções são evidenciados assinaturas semelhantes a área tipo, porém predomina diferentes assinaturas com grandes porções com baixas concentrações de K%, eTh e eU.

Essa diferença de resposta dos radioelementos pode se dar por ações intempéricas ou pela estreita faixa do corpo eventualmente representada por uma cristalização de magmas distintos da área tipo da Suíte Sanukitóide Rio Maria. Segundo Oliveira *et al.* (2010) a série sanukitóide, caracterizada em enclaves máficos, rochas intermediárias e granodioritos são evidenciados por uma composição metaluminosa, com altos valores de Mg, alta quantidade de Cr e Ni em adição à elevada concentração de elementos LILE (*large ion lithophile elements*), especialmente Ba e Sr. Apesar da similaridade geoquímica, Oliveira *et al.* (2009) mostrou que os granodioritos e rochas intermediárias provavelmente derivam de dois magmas distintos, ambos com afinidades sanukitóides, os quais possivelmente originaram de diferentes graus de fusão parcial de uma fonte mantélica metasomatisada. Essa diferenciação magmática explicaria as diferentes assinaturas dos granitos a norte do *greenstone* Identidade (domínio 12 da **figura 3.15**) e a sul do *greenstone* Rio Maria, mais recentemente classificadas na literatura como Suíte Sanukitóide Rio Maria (Oliveira *et al.* 2010).

O granitóide Trondhjemitó Mogno caracteriza-se por possuir valores médio/baixos de K%, eTh e eU com porções de maiores concentrações de K%.

O granito Xinguara, localizado na porção centro-norte, caracteriza-se por concentrações altas de eTh e eU. Já o granito Caracol no extremo sudeste da área caracteriza-se por altos valores de K% no ternário RGB.

Os metassedimentos do Grupo Rio Fresco possuem assinaturas diferentes para a porção dos quartzitos onde compreende valores medianos de K% e eTh e baixo eU, das porções mais finas representadas pelos metassiltitos onde possuem médio K% e altos valores nos radioelementos eTh e eU.

O granito anorogênico Mandassaia, localizado no extremo nordeste da área, caracteriza-se por conter os mais altos valores de K, eTh e eU, resultando numa forte cor branca.

Devido à alta resolução dos dados aerogamaespectrométricos com linhas de 125 metros, foi possível observar assinaturas de parte do enxame de diques máficos, intermediários à félsicos que intrudiram a região há aproximadamente 1.8 Ga (Silva Jr.

et al. 1999). De igual modo, devido às condições ambientais predominantes, aluviões de pequeno porte e regolitos também foram destacados (**Figura 3.17**).

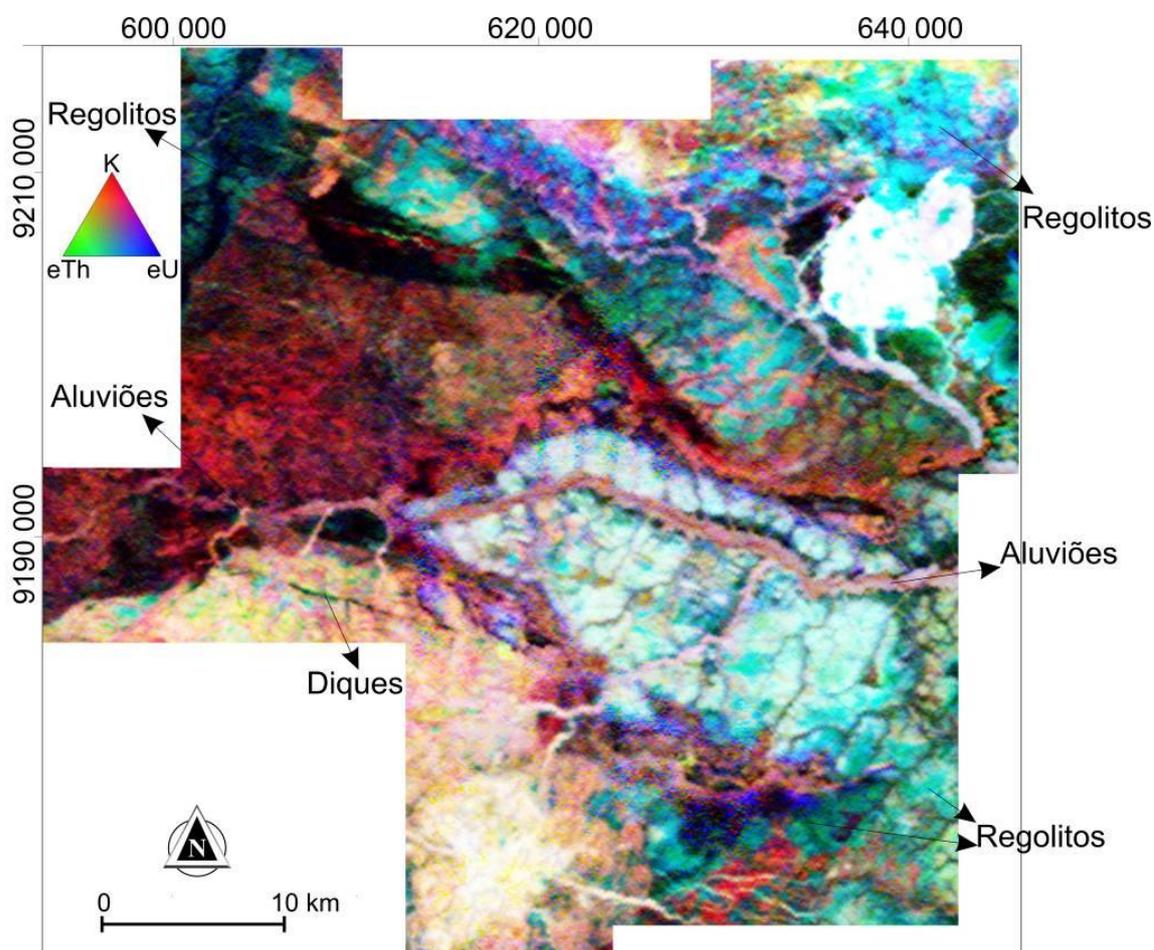
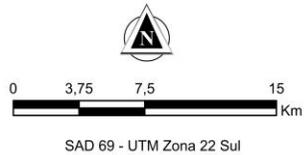
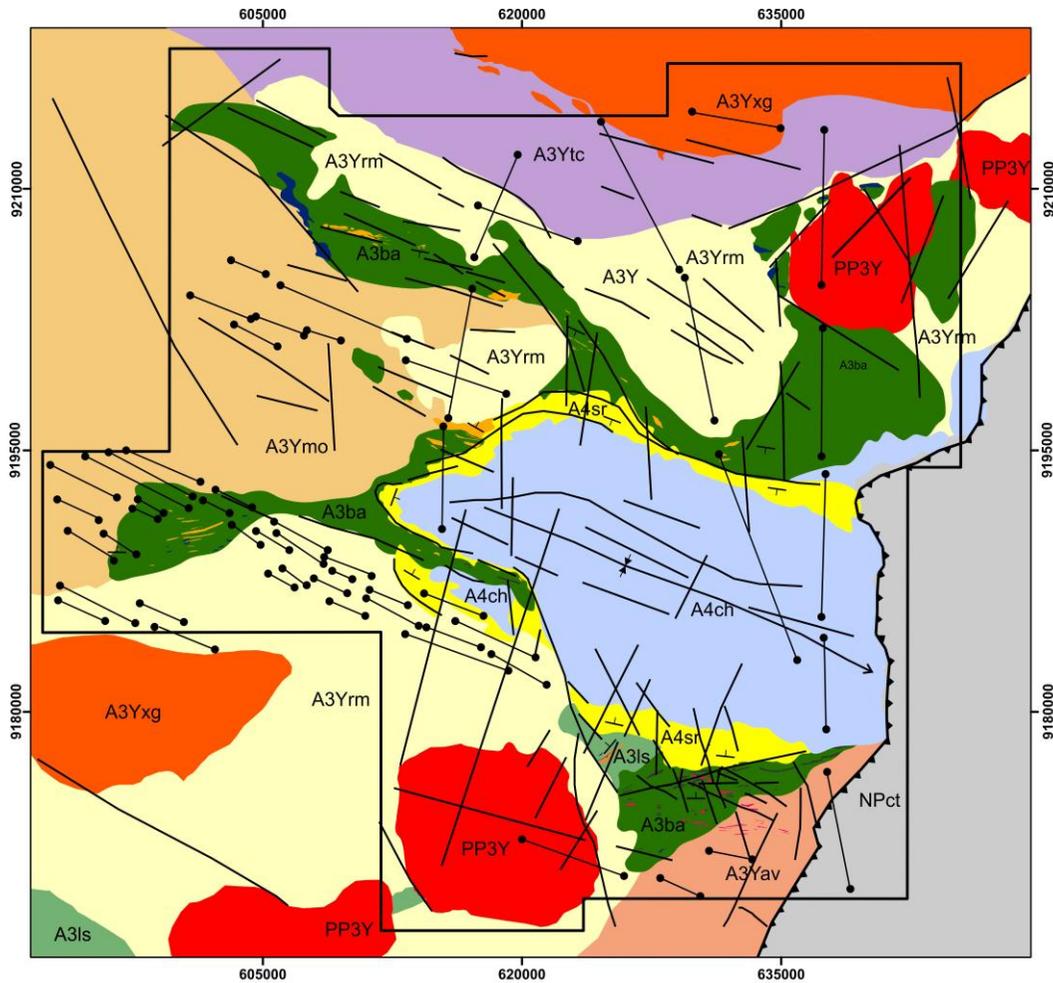


Figura 3.17 Imagem ternária falsa cor (RGB) ressaltando regolitos em azul claro, aluviões e dique tardio com direção NW .

No domínio Neoproterozóico do cinturão Araguaia predominam valores medianos de K, eTh e eU, com leve enriquecimento em Th associado a coberturas supergênicas (TQDL).

O produto final é um mapa geológico integrado baseado em dados geológicos disponíveis na literatura, dados geológicos levantados pela Reinarda/Troy e dados geofísicos. Propõe-se uma litoestratigrafia associada com unidades litogeofísicas que foram verificadas em campo. Estes domínios permitiram o refinamento da cartografia 1:250.000 (CPRM, Folha Xinguara) do Terreno Granito-*greenstone* Rio Maria como mostra a **figura 3.18**.




Área de estudo
 Inserida na Folha SB.22-Z-C Xinguaçu



Unidades	Símbolo	Litotipos
Formação Couto Magalhães	NPct	Metapelitos (ardósias e filitos) dominantes com subordinadas lentes de quartzitos e mais raramente metaconglomerados
Diques		Diques subvulcânicos com variedades litológicas subordinadas
Granitos anorogênicos (Suíte Jamon)	PP3Y	Granitos exemplificados pelos maciços Jamon, Mandasaia e Musa. Compostos essencialmente de monzogranitos com sienogranitos associados.
Formação Cachoeirinha	A4ch	Sequências rítmicas de sedimentos predominantemente metapelíticos, laminados às vezes carbonosos e intercalados por subordinadas fácies arenosas de geometria tabular
Formação São Roque	A4sr	Sedimentos predominantemente psamíticos e psefiticos (quartzitos, quartzitos arcoseanos, metagrauvacas, arenitos conglomeráticos) e mais subordinadamente lentes de pelitos (siltilos, argilitos)
Granito Xinguaçu	A3Yxg	Composição predominantemente granodiorítica, com subordinados termos tonalíticos, monzograníticos e trondhjemiticos
Suíte Sanukitóide Rio Maria	A3Yrm	Série Sanukitóides. Composição predominantemente granodiorítica.
Tonalito Caracol	A3Ytc	Tonalitos e trondhjemitos com bandamento magmático e xenólitos de rochas supracrustais
Trondhjemitó Mogno	A3mo	Gnaisses essencialmente trondhjemiticos, mais raramente tonalíticos e granodioríticos. Migmatização praticamente ausente.
Tonalito Arco Verde	A3Yav	Granitoides gnaissificados de composição predominantemente tonalítica e subordinadamente granodiorítica e monzogranítica, com migmatização localizada.
Grupo Lagoa Seca	A3ls	Metadacitos Intrusivas Ultramáficas Metassiltitos/Metagrauvacas/Metachert *Hospeda o depósito Lagoa Seca
Grupo Babaçu	A3ba	Quartzo pórfiro Metadacitos/Metariolitos Formação Ferrifera Bandada Metabasaltos/Doleritos/Andesitos Peridótilos/Talco vistos *Hospeda a mina do Mamão e depósitos Babaçu

-  Estruturas
-  Falha de empurrão
-  Siclinal com caimento
-  Foliação

Figura 3.18 Mapa geológico integrado, baseado na análise e interpretação dos dados aerogeofísicos de alta resolução espacial, bem como no conhecimento geológico disponível. Parte das unidades interpretadas não possui uma correspondência com os dados geológicos disponíveis e foram checadas em trabalho de campo. Importante observar que a área da Sequência Vulcano-sedimentar interpretada no produto em apreço se difere da conhecida na literatura possuindo uma área pouco maior. Sugere-se uma validação de detalhe com trabalho de campo, pois caso seja confirmado, isto aumentaria a potencialidade da área da Província Rio Maria no que tange a discriminação de rochas hospedeiras potenciais.

3.5 PRODUTOS DERIVADOS DA GAMAESPECTROMETRIA E SUA APLICAÇÃO NO ENTEDIMENTO DE ZONAS DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E SUA INTEGRAÇÃO COM DADOS AEROMAGNÉTICOS

Um dos objetivos deste trabalho foi a tentativa de realçar indícios de alteração hidrotermal dentro das unidades que compõem os *greenstone belts*. Dickson & Scott (1997) constataram que as assinaturas gamaespectrométricas de depósitos de ouro são muito variáveis, porém o enriquecimento de potássio constitui um guia indireto para a localização de concentrações auríferas. Apesar das mineralizações em geral ocorrerem em veios de quartzo, as rochas encaixantes hidrotermalizadas podem ser detectadas através de halos potássicos.

O resultado imediato da alteração hidrotermal é a destruição da magnetita e, sob determinadas condições, esta destruição pode ser intensa. Entretanto magnetita também pode ser produzida por processos de alteração, como serpentinização ou alteração potássica relacionada com fluídos félsicos oxidantes (Clark 2001).

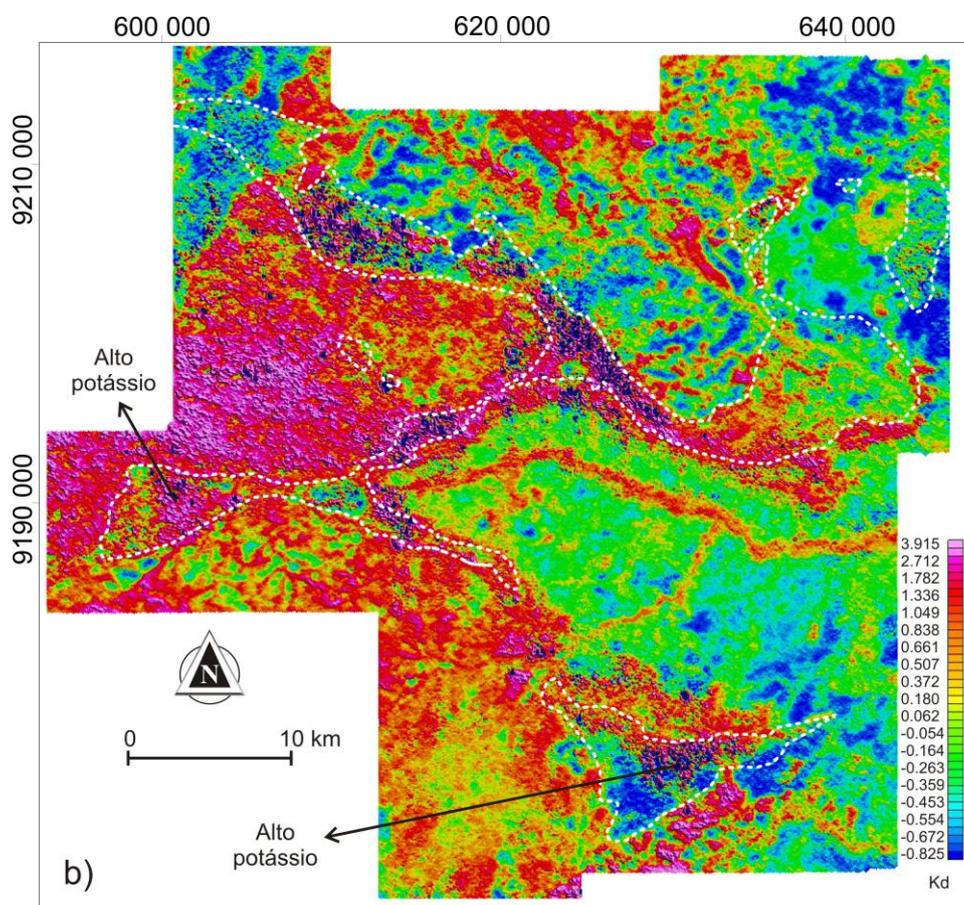
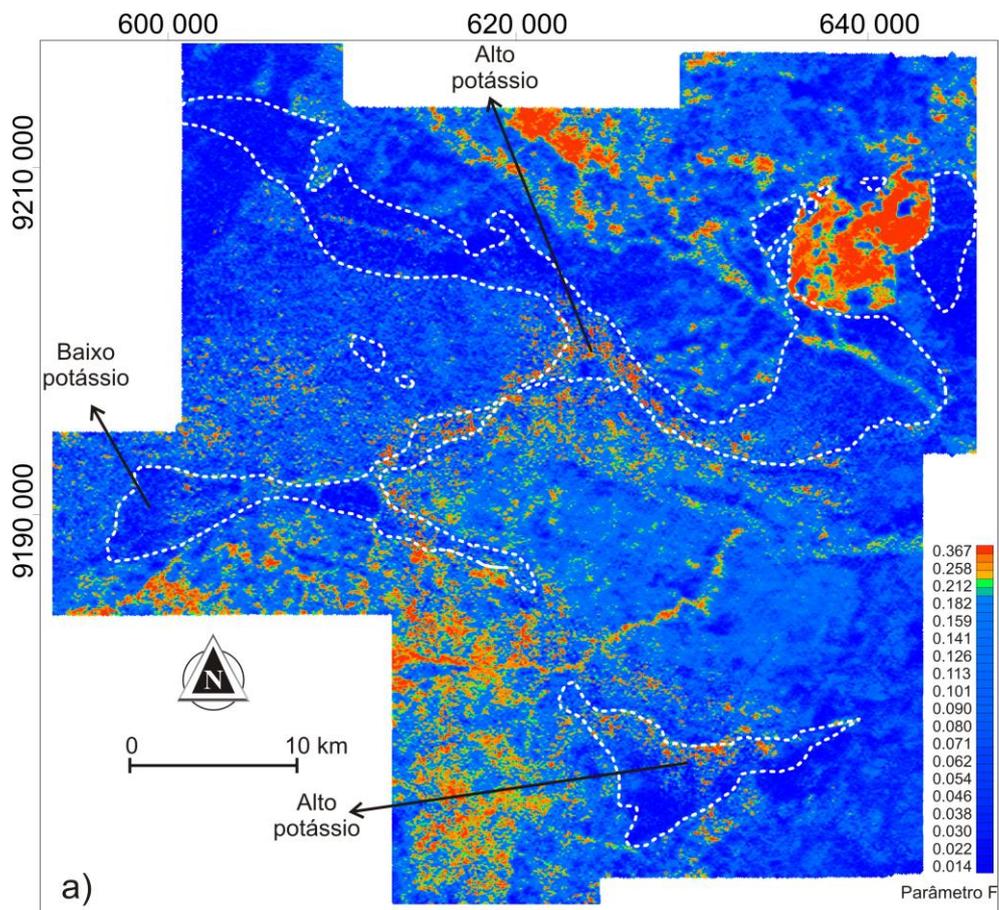
Hoover & Pierce (1990) também apontam para a importância do potássio nos processos hidrotermais em áreas mineralizadas. Tais processos são marcados por intensa interações fluido-rocha, com lixiviação de alguns elementos e concentração de outros em sistema físico-químico aberto com reações de troca (metassomatismo), as quais imprimem modificações mineralógicas, texturais e químicas nas rochas afetadas.

Além da mineralogia magnética, as concentrações dos radioelementos também podem ser alterados durante a alteração hidrotermal. Dados aerogeofísicos gamaespectrométricos resultam numa imagem de três elementos possivelmente refletindo episódios de deformação mais recentes do que os dados magnéticos. Ao estimar a abundância média de K, U e Th das rochas do embasamento é possível avaliar as mudanças nas zonas alteradas.

A alteração potássica geralmente produz os efeitos mais importantes, uma vez que K é o mais abundante dos três radioelementos na crosta terrestre. Os efeitos do enriquecimento de K são particularmente evidentes nas rochas máficas, devida a pequena quantidade de minerais portadores de potássio (Hoover & Pierce 1990). Elevadas concentrações de K em rochas máficas ou ultramáficas podem indicar alvos promissores para a exploração do ouro.

As imagens do Parâmetro F (Efimov 1978, **Figura 3.19a**), da razão K/eTh (**Figura 3.19c**) e do Potássio Anômalo (Pires 1995, **Figura 3.19b**) foram correlacionadas entre si numa tentativa de realçar o potássio anômalo relacionado com o hidrotermalismo dentro das unidades máficas e ácidas que compõem as supracrustais dessa região. A integração dessas imagens se fez necessária para encontrar zonas enriquecidas em potássio usando a nova distribuição geométrica dos *greenstone belts* baseados nos dados gamaespectrométricos.

Observa-se nessas imagens o comportamento do potássio. No Parâmetro F (**Figura 3.19a**) há algumas áreas consideradas de alto potássio dentro das unidades que compõem os *greenstone belts*. Essas áreas podem estar relacionadas à alteração hidrotermal ou mesmo vulcânicas ácidas do Grupo Babaçu. Na área da mina Mamão é possível observar também porções de médio/alto potássio. Na imagem do Potássio Anômalo (**Figura 3.19b**) são encontradas as mesmas áreas de concentração de alto potássio do Parâmetro F, porém no potássio anômalo há uma concentração areal maior. Já a imagem da razão K/eTh (**Figura 3.19c**) mostra que na mina do Mamão o comportamento é inverso, ou seja, a imagem apresenta uma concentração mais baixa dessa razão.



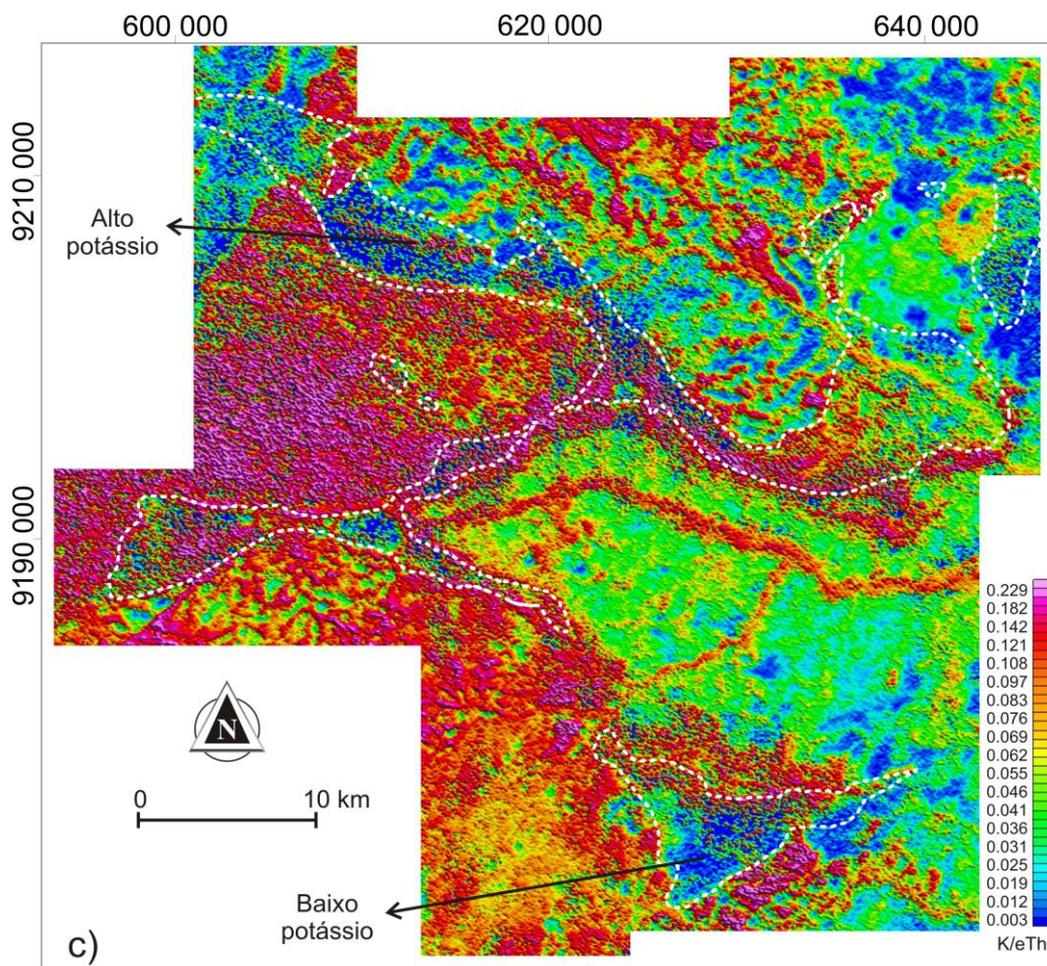


Figura 3.19 Produtos gamaespectrométricos para realçar quantidades anômalas de potássio. a) Parâmetro F; b) Potássio anômalo (Kd) e c) razão K/eTh.

3.6 ANÁLISE VISUAL INTEGRADA E SUA APLICAÇÃO NA EXPLORAÇÃO MINERAL

O modelo conceitual proposto para esta região da Província Rio Maria compreende a associação da mineralização com altos valores de K, além de condicionamento estrutural baseando-se nas descrições de campo e de alguns depósitos (Huhn 1992). Baseando-se nos parâmetros definidos pelo modelo descritivo, foi possível direcionar o processamento dos dados geológicos, geofísicos e geoquímicos de modo a extrair informações úteis para a análise espacial guiadas pelo conhecimento (*knowledge-driven*).

Para a seleção dos alvos integrou-se alguns produtos da gamaespectrometria e magnetometria citados acima, sendo eles a razão K/eTh , parâmetro F, potássio anômalo, gradiente horizontal medido em x e y (G_x , G_y) e o mapa de lineamentos magnéticos.

Dos produtos gamaespectrométricos gerados na tentativa de realçar K anômalo que possa estar relacionado com hidrotermalismo dentro das unidades que compõem os *greenstone belts* o que obteve um resultado mais coerente foi o parâmetro F onde o mesmo salientou o enriquecimento de potássio dentro das unidades que compõem os *greenstone belts* (**Figura 3.20**). Sendo assim, a integração desse produto com as componentes do gradiente horizontal medido em x e y (G_x , G_y), realçando a desmagnetização do sistema, e os lineamentos magnéticos mostram que zonas mineralizadas conhecidas são mapeadas por médio/alto valores no parâmetro F e baixos gradientes magnéticos segundo a direção NE-SW e NW-SE das estruturas de primeira ordem e principalmente segundo a direção E-W das estruturas de segunda ordem.

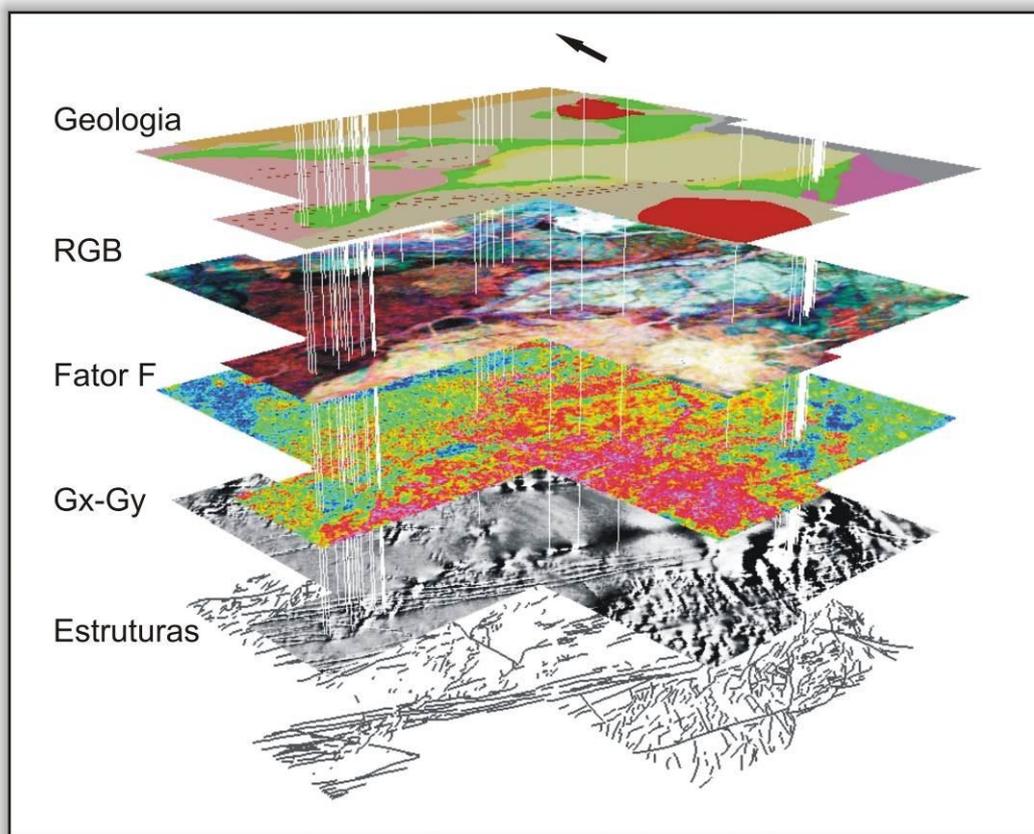


Figura 3.20 Fluxograma dos produtos usados na análise visual para a seleção de alvos.

Com base nessa premissa vinte e sete novos alvos exploratórios foram selecionados para serem investigados em campo. A priori, os alvos estão estruturalmente controlados segundo as três direções principais dos lineamentos magnético (**Figura 3.21**).

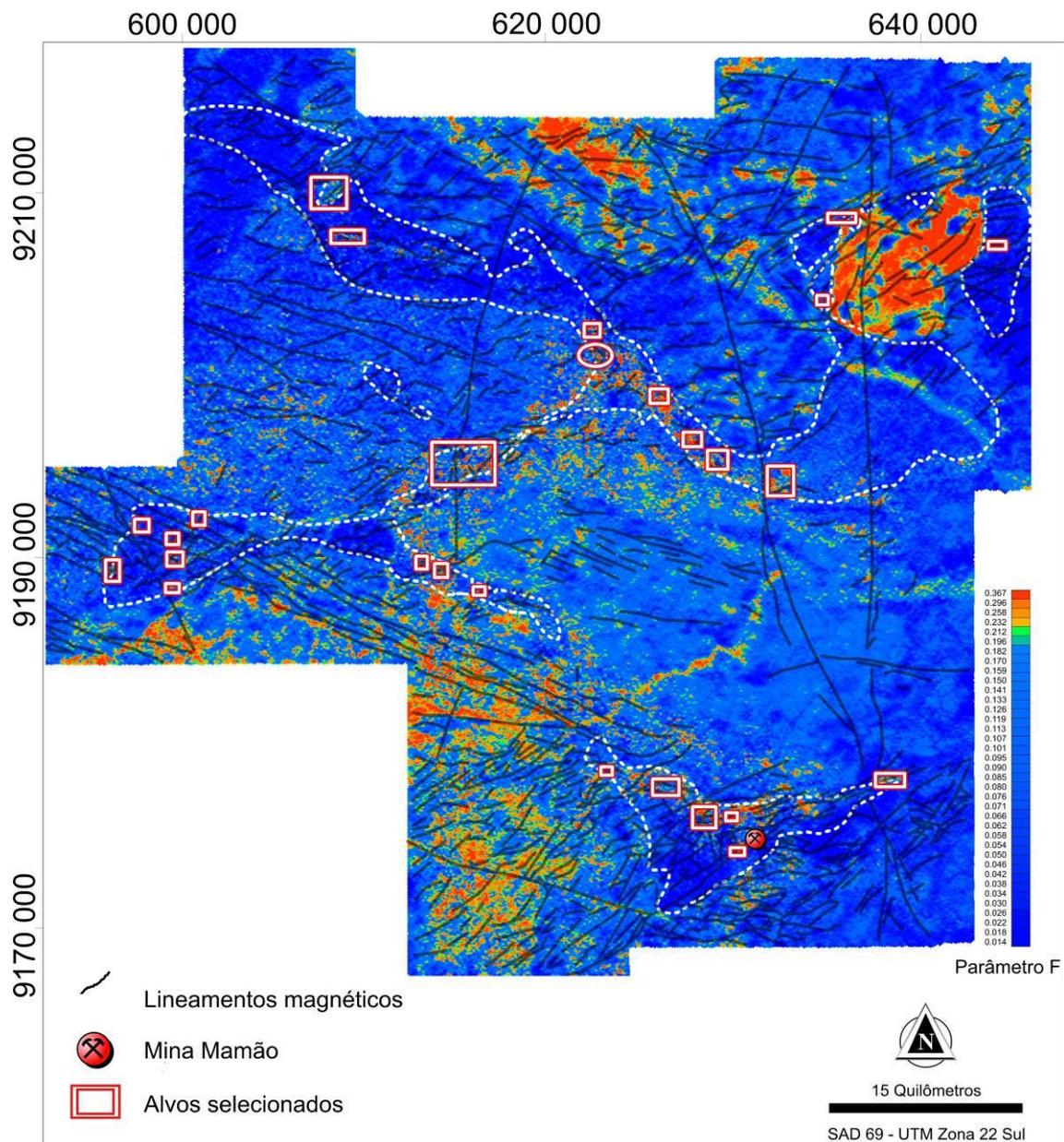


Figura 3.21 Imagem do parâmetro F com a localização dos 27 alvos exploratórios gerados. Os alvos foram selecionados baseados na inspeção visual de uma avaliação da configuração estrutural e de geologia favoráveis.

CAPÍTULO 4. MODELAGEM ESPACIAL UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO NO TERRENO GRANITO-GREENSTONE RIO MARIA, SUDESTE DO PARÁ

4. APRESENTAÇÃO

A exploração mineral envolve várias etapas de aquisição, análise e integração de dados oriundos de várias fontes. Um dos grandes desafios de hoje para a prospecção é como integrar e analisar de forma significativa a quantidade enorme de dados coletados durante os programas de exploração em *greenfield* e *brownfield* (Robert *et al.* 2007). A integração digital de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, de sensoriamento remoto e de outras informações georreferenciadas voltadas à prospecção mineral, atualmente é realizada através de *software* e *hardware* específicos, aproveitando o grande avanço das geotecnologias presenciado nas duas últimas décadas. Assim, os sistemas de informações geográficas (SIG) e sistemas especialistas (SE) surgem como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação georreferenciada, as quais permitem o gerenciamento de dados espaciais com realização de análises complexas, facilitando a tomada de decisões em exploração mineral (Bonham-Carter 1994, Silva 1999, Nykänen *et al.* 2008).

No presente estudo buscou-se aplicar técnica de modelagem espacial nos dados geológicos, geoquímicos e geofísicos visando a seleção de áreas potenciais para exploração aurífera na região da Província Rio Maria – PA, nos domínios das áreas de concessão da Troy/Reinarda Mineração Ltda como exemplifica a **figura 1.1** do Capítulo 1.

4.1. MÉTODOS DE ANÁLISE

Existem basicamente dois tipos de modelos utilizados para o mapeamento do potencial mineral: modelos guiados pelos dados (*data-driven*) (e.g. Pesos de Evidência, Regressão Logística e Redes Neurais Artificiais) e modelos guiados pelo conhecimento (*knowledge-driven*) (e.g. Lógica Boleana, Lógica *Fuzzy*, *Index Overlay*) (Bonham-Carter 1994). Em uma modelagem dirigida pelos dados, a associação espacial entre ocorrências minerais conhecidas (áreas teste) e o conjunto de dados estudados (geofísicos, geoquímicos, etc) é definida computacionalmente e determina pesos

associados ao grau de favorabilidade de cada um destes conjuntos. Já os métodos guiados pelo conhecimento não requerem uma área teste, mas necessitam de conhecimento geológico da área estudada e do modelo descritivo do depósito, já que utiliza pesos subjetivos determinados por um *expert* (Bonham-Carter 1994).

No presente trabalho, será explorado o método de análise espacial conhecido como lógica fuzzy (Carranza & Hale 1997, Cheng & Agterberg 1999, Quadros *et al.* 2006, Lee 2007) através de combinações usando operadores ou controladores nebulosos com enfoque na produção de mapas de favorabilidade para depósitos de ouro nos *greenstones* da área de estudo.

4.2. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS DO TIPO LODE HOSPEDADO EM GREENSTONE BELT

Para realizar a análise espacial do tipo *knowledge-driven* é necessária a definição de um modelo descritivo de depósitos auríferos, principal metal de interesse nesse estudo. Segundo Oliveira (1987), Huhn (1992), Souza (1994), Santos (1995) e Souza (1999), os metalotectos de ouro encontrados no Terreno Granito-*greenstone* Rio Maria estão associados a pequenos depósitos de ouro do tipo *lode* (Mamão, Babaçu, Malvinas, Lagoa Seca, Diadema, Serrinha, Seringa, dentre outros).

Globalmente os depósitos de ouro mais abundantes ocorrem em terrenos granito-*greenstone* arqueanos, em terrenos vulcano-sedimentares ou em margens de placas convergentes (Goldfarb *et al.* 2001). Segundo Groves *et al.* (1998) esta classe de depósitos de ouro, previamente chamadas de mesothermal, mas recentemente renomeadas para depósitos de ouro orogênicos, são relacionadas à fase final de terrenos acrescionais em ambientes de subducção. O termo orogênico foi originalmente introduzido por Groves *et al.* (1998) em reconhecimento ao fato que depósitos de ouro em veios de quartzo-carbonato em ambiente *greenstone*, incluindo os associados à formação ferrífera, tem características semelhantes e foram formados por processos similares. Tipos de depósitos orogênicos incluem os hospedados em turbiditos, em *greenstone belt* e os hospedados em formação ferrífera bandada, como destaca a **figura 4.1**.

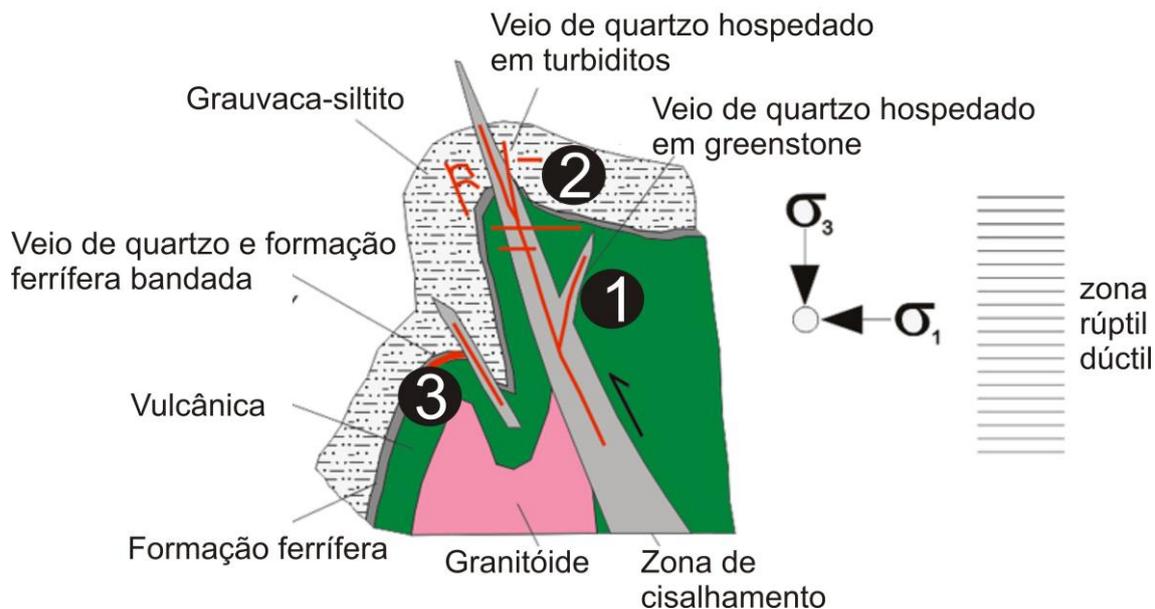


Figura 4.1 Diagrama esquemático, proposto por Poulsen *et al.* (2000), ilustrando os tipos de depósitos orogênicos. A figura também mostra os três tipos de depósitos encontrados na área de estudo: (1) depósito do tipo *lode* hospedado em *greenstone*, na área de trabalho representado pelos depósitos do trend Mamão/Babaçu, (2) depósito hospedado em turbiditos como o caso do depósito de Lagoa Seca, (3) depósitos associados à formação ferrífera bandada como o alvo Marcinho.

Em escala local, as características favoráveis para este tipo de depósito representam uma combinação de fatores estruturais e litológicos (Groves *et al.* 1990; Robert 2004). Segundo o modelo proposto por Hodgson (1993), os depósitos auríferos do tipo *lode* mesotermal caracterizam-se por constituírem depósitos exclusivamente de ouro, relacionados a veios de quartzo, sistemas de vênulas ou zonas de mineralização disseminada encaixadas em rochas carbonatadas. Os veios de quartzo carbonato nesses depósitos, normalmente, combinam veios laminados de mergulho moderado em zonas de cisalhamento reversas com veios hospedados em sítios extensionais, de baixo mergulho, adjacentes às rochas competentes. O caráter reverso da zona de cisalhamento com veios hospedados e o baixo mergulho dos veios extensionais atestam a sua formação durante o encurtamento crustal (Sibson *et al.* 1988; Robert & Poulsen 2001).

Ainda, segundo Hodgson (1993), a maior parte das zonas mineralizadas estão associadas a estruturas, tais como falhas de grande escala, zonas de cisalhamento dúcteis ou fraturas rúpteis de alto ângulo. Frequentemente, as estruturas que hospedam as mineralizações estão associadas a contatos entre domínios litológicos contrastantes,

marcados por rochas deformadas ou indicadas indiretamente por uma variedade de feições tais como discordâncias estruturais, zonas de alteração hidrotermal ricas em carbonatos, sulfetos, quartzo dentre outros.

A razão pela qual os depósitos de ouro do tipo *lode* se relacionam a grandes falhas reside no fato destas agirem como eficientes condutos de fluidos hidrotermais (**Tabela 4.1**). As mineralizações, em geral, concentram-se ao longo dessas estruturas em campos específicos, localizados em *jogs* ou nas confluências das dilatações principais, – favorável à dilatação, à circulação dos fluidos e à precipitação do minério, e onde ocorrem depósitos tipicamente associados a estruturas de segunda ordem (Goldfarb *et al.* 2005; Robert *et al.* 2005).

Tabela 4-1 Principais características dos ambientes de formação de depósitos de ouro do tipo orogênico (Robert *et. al* 2005).

	Tipo de depósito	Principais características dos ambientes de formação do minério		Zonas de alterações do depósito (por proximidade)	Exemplos	Referências
		Escala regional	Escala local			
Orogênico	Hospedados em <i>greenstone belt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>greenstone belts</i> predominantemente vulcânico ou sedimentar - zonas de cisalhamento em escala crustal - rochas conglomeráticas 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de cisalhamento, deformadas e interseções de estruturas relacionadas ao cisalhamento - heterogeneidade reológica - litologias ricas em Fe - intrusões porfíricas félsicas 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de alteração carbonática, com sericita-pirita proximal - concentrações de veios auríferos ou zonas de sulfetos disseminados - Au>Ag, As, W 	<ul style="list-style-type: none"> Dome, Norseman, Mt. Charlotte, Sigma Lamaque 	<ul style="list-style-type: none"> Groves <i>et al.</i> (2003) Goldfarb <i>et al.</i> (2005) Robert <i>et al.</i> (2005) Dubé e Gosselin (2006)
	Hospedados em turbiditos	<ul style="list-style-type: none"> - sequências turbidíticas dobradas - intrusões graníticas - falhas crustais - fácies xisto verde 	<ul style="list-style-type: none"> - anticlinais - falhas reversas de alto ângulo - estruturas cruzadas 	<ul style="list-style-type: none"> - alteração Fe-Mg-Cb - concentrações de ouro em veio de quartzo - Au>Ag, As 	<ul style="list-style-type: none"> Bendigo Stawell, Juneau 	<ul style="list-style-type: none"> Hodgson (1993) Bierlein <i>et al.</i> (1998) Goldfarb <i>et al.</i> (2005)
	Hospedados em formação ferrífera bandada	<ul style="list-style-type: none"> - <i>greenstone belts</i> predominantemente vulcânico ou sedimentar com espessos pacotes de formação ferrífera - dobrado e metamorfoisado 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de dobras - falhas ou zonas de cisalhamento intersectando formações ferríferas - alguns controles estratiformes 	<ul style="list-style-type: none"> - sulfetação da formação ferrífera - alteração clorita-carbonato ou anfibólio - Au>Ag, As 	<ul style="list-style-type: none"> Homestake, Lupin, Cuiabá, Hill 50 	<ul style="list-style-type: none"> Caddy <i>et al.</i> (1991) Kerswill (1996) Goldfarb <i>et al.</i> (2005)

A maioria dos depósitos conhecidos de ouro do tipo *lode* situa-se em cinturões caracterizados pela conjunção de assembléias litológicas que incluem: rochas ricas em Fe como os basaltos toleiticos, *sill* de doleritos diferenciados e BIFs, *stocks* de pórfiro de composição intermediária a ácida quer seja intrudindo rochas vulcânicas ultramáficas ou rochas sedimentares clásticas.

Segundo Huhn (1992) e Souza (1994) a maioria dos depósitos do tipo *lode* que ocorrem na área de estudo estão associados a veios de quartzo encaixados na base do *greensonte belt*, em rochas metavulcânicas básicas e intermediárias que sofreram carbonatização e sulfetação (**Tabela 4.2**). O depósito de Lagoa Seca é o único depósito de ouro do tipo *lode* conhecido na região situado na seqüência metassedimentar de topo do *greenstone belt* Andorinhas, onde não se associa a veios de quartzo, mostrando sua natureza singular em relação aos depósitos auríferos arqueanos do tipo *lode* associados aos *greenstone belts* da região (Souza 1999). Os principais controles estruturais do minério são as estruturas secundárias de zonas de cisalhamento transcorrentes, com posterior movimentação reversa (Huhn 1992). Estudos realizados pela equipe da Reinarda/Troy, bem como pelo mapeamento de campo desse estudo, demonstram que a mineralização está concentrada em zonas de dilatação com direção preferencial E-W, funcionando como sítios de deposição de veios mineralizados, dentro de corredores de cisalhamento NW ou NE.

Tabela 4-2 Principais características dos depósitos e ocorrências auríferas do tipo *lode* arqueano e *stock* calci-alcalino do Terreno granito-*greenstone* Rio Maria, adaptado de Huhn (1992) e Santos (1995).

Depósito	Geologia	Tipologia	Alt. hidrotermal	Controle estrutural
Mamão/ Babaçu	Metavulcânicas máficas (Metabasaltos do Grupo Babaçu)	Veios de quartzo associados à zona de cisalhamento E-W	Cloritização, Carbonatação, Potassificação, Silicificação, Sulfetação	Estruturas de segunda ordem associadas as zonas de cisalhamento, no domínio transtensional
Serrinha	Metavulcânicas máficas (Metabasaltos do Grupo Babaçu)	Veios de quartzo associados à zona de cisalhamento N70E/60NW	Carbonatação, Albitização, Sericitização, Piritização	Zona de cisalhamento de direção N70E/60NW, dobras assimétricas reclinadas de eixo subhorizontal
Tatu-Frango	Metabasaltos cortados por quartzo pórfiros do Grupo Babaçu	Veios de quartzo associado a zona de cisalhamento E-W na interface rochas ácidas /máficas	Cloritização, Carbonatação, Sericitização, Albitização, Silicificação, Turmalinização	Zona de cisalhamento dúctil anastomosada de alto ângulo
Sequeiro1	Contato entre metabasalto (Grupo Babaçu) e o Trondjemito Mogno	Veios de quartzo em zona de cisalhamento	Carbonatação, e Silicificação,	Zona de cisalhamento de direção N70E/60NW
Peladinha	Contato entre o os metassedimentos do Grupo Rio Fresco com o Granodiorito Rio Maria	Veios de quartzo em zona de cisalhamento ao longo de conglomerados alterados hidrotermalmente	Sericitização e silicificação	Clivagem extensional e lineação de estiramento em zona de cisalhamento
Cumaru	Contato do granito Cumaru com o <i>Greenstone belt</i> de Gradaús	Veios de quartzo associados ao granito Cumaru	Fílica, Propilítica e Potássica	Falhas e fraturas secundárias a zona de cisalhamento dextral da Serra do Puim

4.3. OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DA ÁREA DE ESTUDO

Todas as condicionantes apontadas por diversos pesquisadores, destacadas acima, ocorrem na área de estudo, sendo cinco prospectos associados à metassedimentos, trinta e quatro associados à intrusivas vulcânicas félsicas e trinta e cinco associadas à zonas de cisalhamento em vulcânicas máficas como mostra o diagrama abaixo (Figura 4.2, Figura 4.3).



Figura 4.2 Diagrama mostrando as rochas hospedeiras da mineralização aurífera do *greenstone belt* Andorinhas, Identidade e Rio Maria. A figura ilustra os valores das respectivas porcentagens ressaltando a importância das ocorrências minerais associadas à metavulcânicas máficas, metavulcânicas félsicas e metassedimentos em termos de quantidade de depósitos individuais.

Para efetuar uma análise espacial do tipo *knowledge-driven* é necessária a definição de um modelo descritivo de depósitos de ouro. Diversos modelos podem ser encontrados na literatura, como os propostos por Groves & Barley (1994). A pesquisa foi realizada em detalhe sobre três blocos que serão descritos a seguir. A figura abaixo (Figura 4.3) e as tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 salientam algumas informações dos tipos de ocorrências e depósitos encontrados nos três blocos detalhados da área de estudo.

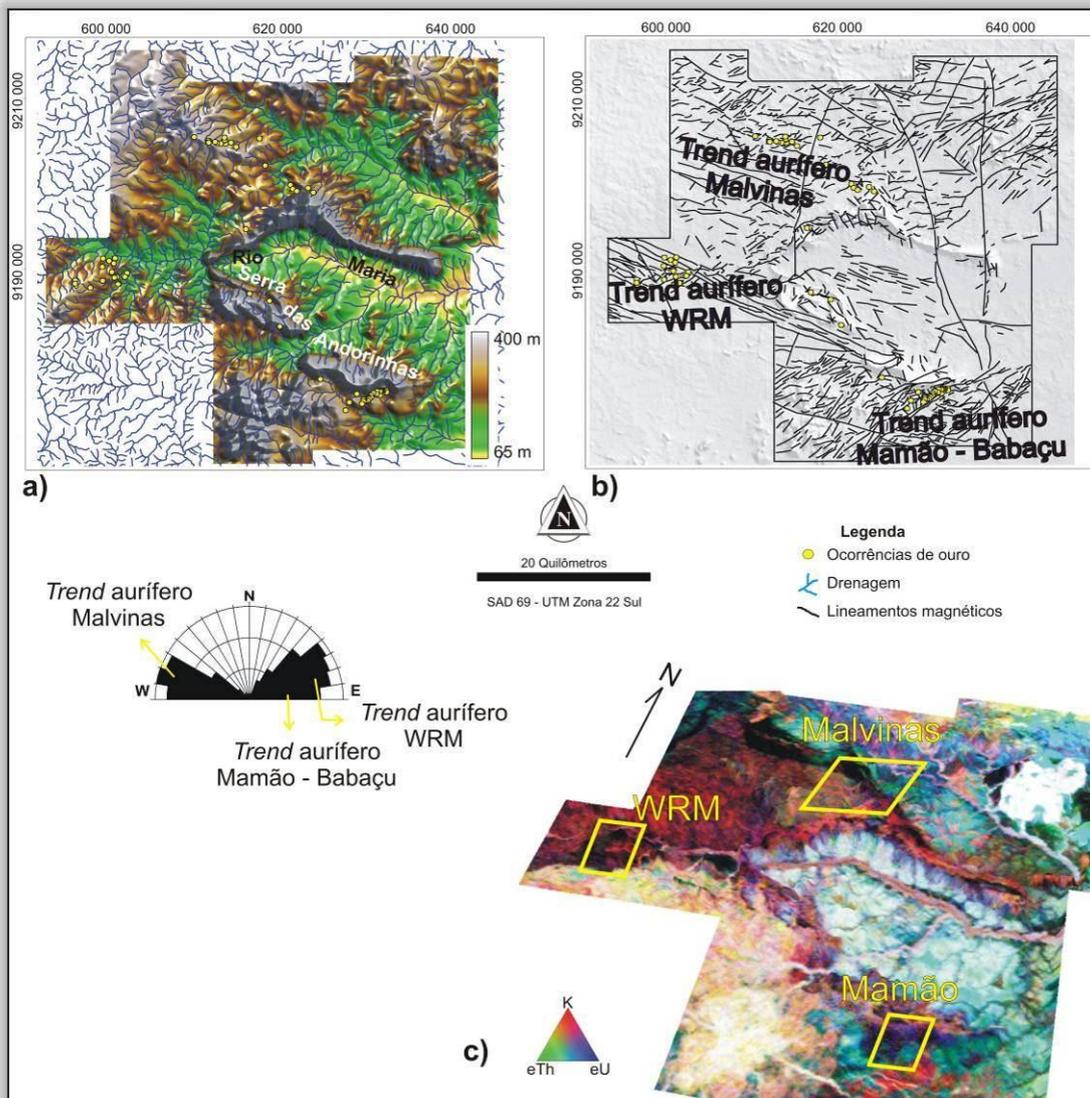


Figura 4.3 Localização da área de estudo onde se observa: a) a rede de drenagem e ocorrências sobrepostas ao modelo digital do terreno da área estudada; b) principais lineamentos magnéticos ressaltando os *trends* auríferos Mamão/Babaçu na direção predominante ENE, WRM (Oeste Rio Maria) na direção predominante ENE-WSW e o *trend* Malvinas (Votuporanga) com direção predominante WNW. Lineamentos sobrepostos à imagem SRTM (DEM); c) disposição dos três blocos pesquisados em detalhe, indicados pelos polígonos em amarelo a partir da imagem ternária (RGB).

A primeira área detalhada nesse estudo é o bloco Mamão. A região abrange o *trend* Mamão/Babaçu e é caracterizada por mineralizações de ouro em veios de quartzo situados em estruturas de segunda ordem relacionados aos lineamentos regionais (Huhn 1992). O *trend* consiste num corredor de cisalhamento NE-SW, classificadas no presente estudo como estruturas de primeira ordem, com diversos depósitos do tipo *lode*

com veios de quartzo alojados em zonas de dilatação secundárias com direção E-W, chamadas aqui de estruturas de segunda ordem. Dentre esses depósitos se destacam, Coruja NE, Luiza, Piauí, Cava T, Cava 5 e Jatobá.

A mina do Mamão, bem como os depósitos do trend Mamão/Babaçu, é do tipo *lode gold* em zona de cisalhamento com forte alteração hidrotermal. A mineralização é associada a veio de quartzo com pirita, pirrotita e ouro livre encaixadas em rochas metavulcânicas máficas. O hidrotermalismo do depósito é caracterizado por assembléias minerais de alteração de carbonatização, cloritização, epidotização, potassificação (sericita/biotita), silicificação e sulfetação (pirita e pirrotita). Porém as concentrações de ouro restringem-se aos locais com percolação de veios quartzo carbonáticos (**Figura 4.4**).

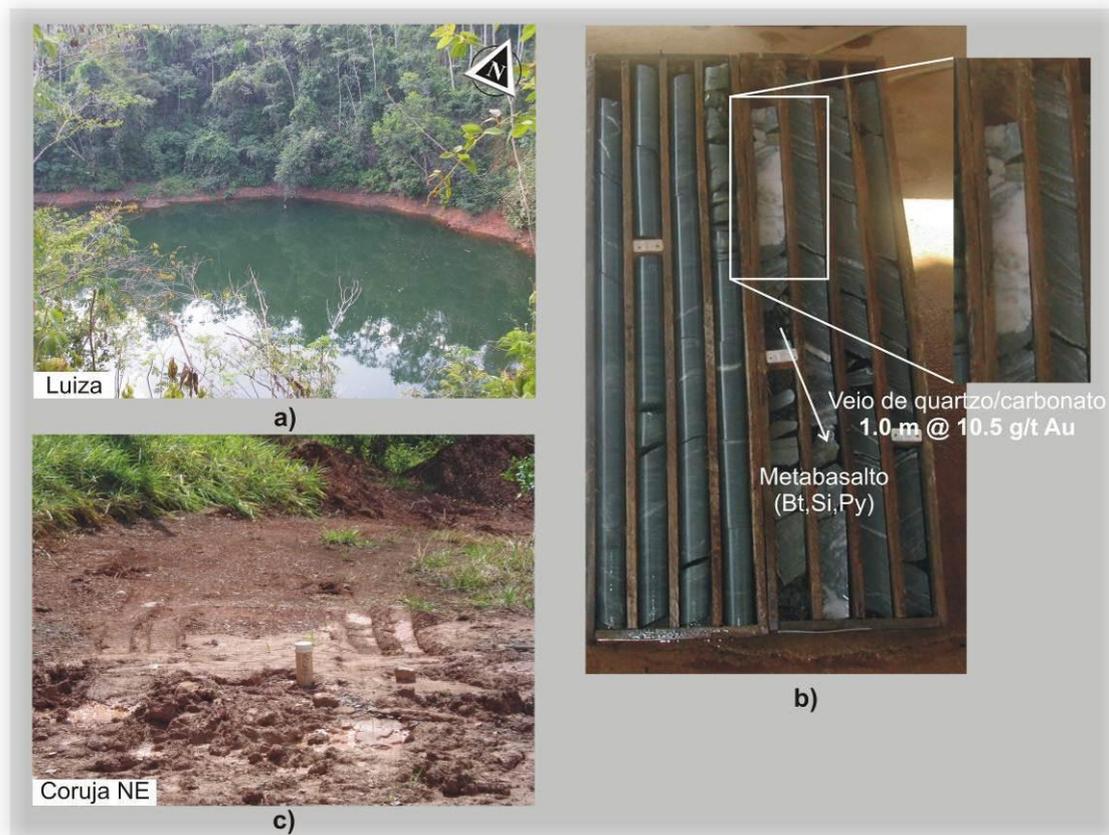


Figura 4.4 Fotografias de alguns dos prospectos do *trend* Mamão-Babaçu cedidos pela Troy/RML. a) Cava do Garimpo Luiza lavrado por garimpeiros nos anos 80. Atualmente tem-se uma reserva, ainda em aberto em *down deep* ao longo do plunge para o norte; b) detalhe de testemunho de sondagem mineralizado com metabasalto alterado hidrotermalmente com biotitização, silicificação e piritização com veio de

quartzo/carbonato; c) Alvo Coruja NE mapeado com geoquímica de solo, e confirmado com sondagem. Observar a ausência de afloramentos.

Observa-se que a região central do bloco Mamão é caracterizada por grande densidade de lineamentos de direção NE-SW, com aproximadamente 2 a 4 km de extensão, com lineamentos E-W que configuram o principal controle estrutural das mineralizações auríferas. Esta configuração estrutural pode ser visualizada na **figura 4.5**, e através dos altos valores do parâmetro F (**Figura 4.6**) na porção centro-norte do bloco, caracterizando-a como a principal zona de influência metalogenética deste bloco.

Com relação às assinaturas magnetométricas, a região é caracterizada por altos valores da amplitude do sinal analítico (ASA), associadas com lentes de formação ferrífera intercaladas com metabasaltos e metapelitos do Grupo Babaçu, bem como com as porções ultramáficas da base do Grupo. A **figura 4.5c** mostra um detalhe da imagem da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) na região do bloco Mamão-Babaçu, onde observa-se uma forte anomalia dobrada. Mapeamento de campo mostrou que grande parte da área com valores de amplitude magnética mais elevada, representadas nessa figura, não aflora, sendo encobertos por metapelitos do Grupo Babaçu e metassedimentos do Grupo Rio Fresco. Diversas lentes de formação ferrífera foram mapeadas em campo associadas à alta amplitude magnética.

Na porção nordeste do alto relevo magnético encontra-se o depósito de ferro *Big Mac* descoberto em 1996, pelo Geólogo Elton João Zimmermann. Desde 2005 a mina é explorada pela Mineração Floresta do Araguaia S/A (**Figura 4.5c**). O depósito contém cerca de 20 milhões de toneladas de minério de ferro cubadas como reserva medida. O minério de ferro está relacionado à zonas de charneira de formação ferrífera enriquecidas em ferro. Não há nada disponível na literatura sobre a metalogênese do depósito. Miller e Mol (2010) sugerem que um evento hidrotermal de idade paleoproterozóica possa ter enriquecido partes da formação ferrífera e filitos hematíticos do Grupo Babaçu através de estruturas tardias NNW. Os corpos de hematita/magnetita compacta e formação ferrífera bandada estão cortados por enxames de fraturas N-S, relacionados ao evento extensional E-W e ao magmatismo anorogênico de 1.8 Ga. Outros pequenos afloramentos de hematita compacta também são encontrados cerca de 3 km para oeste ao longo da direção 260° Az, bem como um extenso colúvio de hematita contendo cerca de 7 milhões de toneladas.

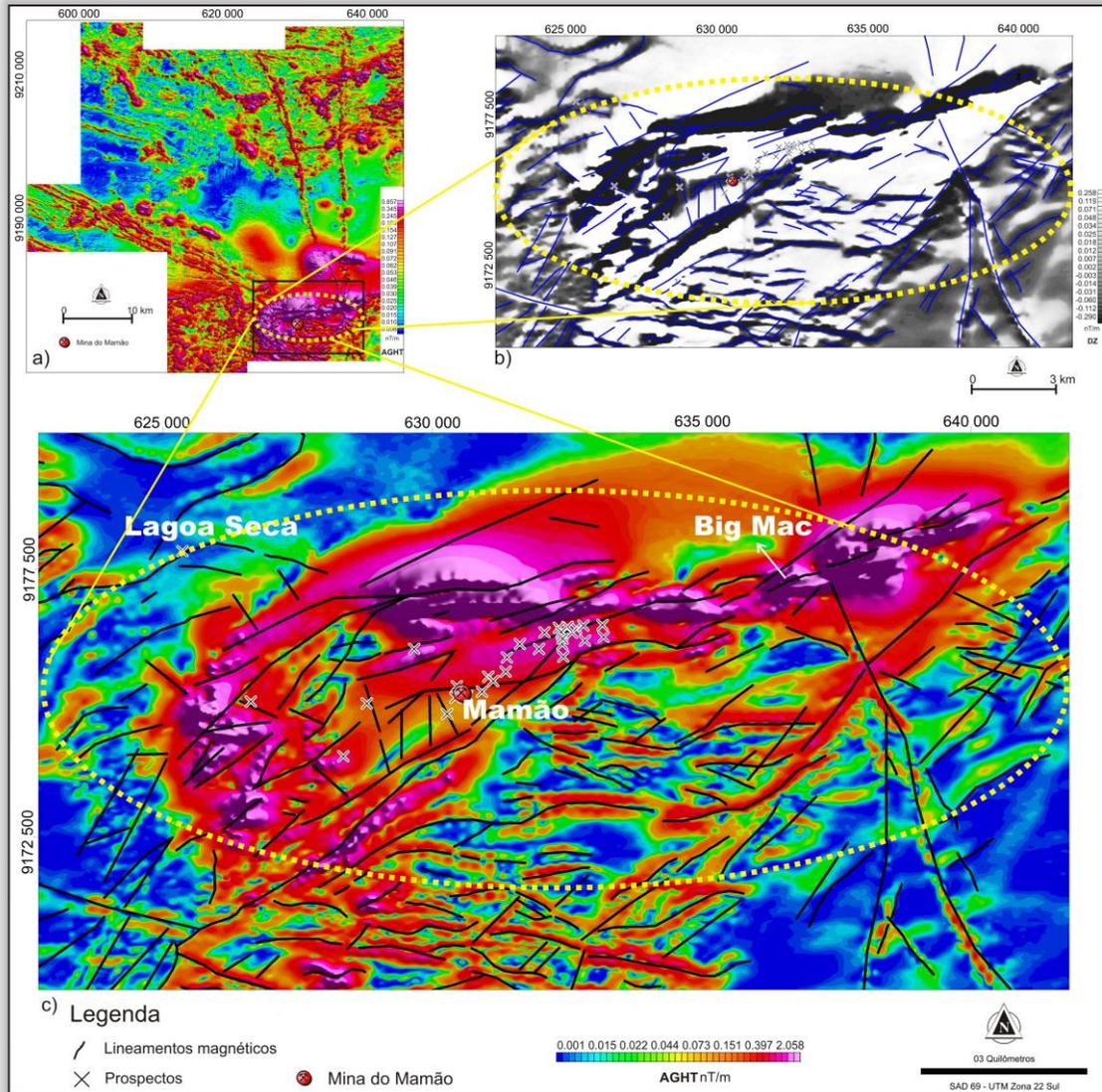


Figura 4.5 Imagens magnetométricas da área de estudo. a) Amplitude do gradiente horizontal total área de estudo; b) detalhe da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz); c) detalhe da amplitude do gradiente horizontal total (calculada com uso dos gradientes medido G_x e G_y) integradas com os principais lineamentos magnéticos.

Adicionalmente, a partir da imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo, é possível identificar o domínio mineralizado como associado a relevo magnético movimentado (**Figura 4.5b**). Lineamentos magnéticos interpretados com base nas imagens das derivadas e da inclinação do sinal analítico (ISA) estão apresentados sobrepostos as imagem da derivada vertical e da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) (**Figuras 4.5.b e 4.5c**).

A integração das ocorrências auríferas com a imagem do parâmetro F mostra que há forte correlação de altos valores dessa variável com a maioria dos prospectos da região (**Figura 4.6**). Em virtude da dificuldade de boa caracterização de alteração hidrotermal em campo, a não ser a presença de sulfetação com predomínio de pirita, é complicado distinguir algum enriquecimento em K. De toda forma, dados de estudos petrográficos, cedidos pela Troy/Reinarda Mineração, confirmaram a presença de sericita e biotita, sendo a biotitização próximo a zona mineralizada de veio de quartzo, possuindo halo de alteração pouco espessos, geralmente entre 1 e 4 metros (**Tabela 4.3**).

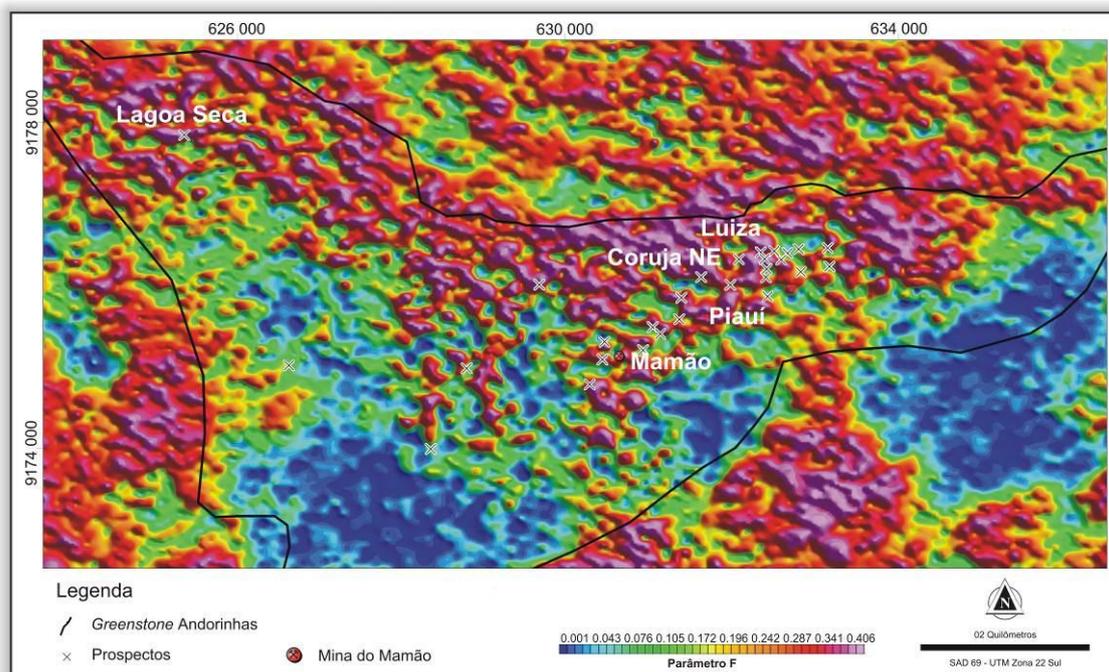


Figura 4.6 Detalhe da imagem parâmetro F sobre o bloco Mamão-Babaçu. Notar que a maioria dos prospectos da região estão associados a altos valores do parâmetro F. O produto permite auxiliar na caracterização de zonas enriquecidas em potássio hidrotermalmente.

Tabela 4-3 Principais características das ocorrências auríferas do *trend* mineralizado Mamão/Babaçu.

Mamão/Babaçu	
Rochas hospedeiras	Rochas máficas (metabasaltos)
Estrutura principal	Corredores transcorrentes
<i>Trend</i>	N70E / E-W
Assinatura magnética	Valores intermediários de amplitude do ASA
Assinatura gamaespectrométrica	Porções com alto potássio na imagem do parâmetro F
Ambiente geológico	Greenstone belt
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo + finas lâminas de pirita proximal
Alteração hidrotermal	Biotitização + silicificação + sulfetação (pirita, pirrotita)
Estruturas rúpteis	Zona mineralizada deslocada por falhas normais tardias
Alteração de contato	Sem evidências. Algumas intrusões dioríticas sem correlação com a mineralização

O segundo bloco corresponde ao WRM - Oeste Rio Maria que faz parte do *greenstone* Rio Maria e localiza-se no extremo oeste da área de estudo (**Figura 4.3**). Na região, a sericitização compreende o principal tipo de alteração hidrotermal, conforme observado na principal área mineralizada. A região garimpada, denominada Manoel, também é conhecida como Tatu-Frango pela CPRM/DNPM (**Figura 4.7** e **Tabela 4.2**). As áreas mineralizadas dessa região são caracterizadas por intensa sericitização e moderada silicificação das rochas vulcanoclásticas em contato com as rochas metavulcânicas máficas (**Figura 4.8**). Nesse contexto, foram identificadas zonas de cisalhamento NE-SW sinistrais, com forte alteração hidrotermal e veios de quartzo-carbonato encaixados. Nesse domínio observa-se sulfetação com predomínio de pirita. A foliação regional é aproximadamente N70°E mergulhando entre 60°-90° para norte. Os veios de quartzo geralmente são E-W com mergulhos entre 30° e 45° para norte.

Regionalmente, o bloco Oeste Rio Maria é afetado por estruturas de direção NW-SE (**Figura 3.3**), representadas por extensos enxames de diques de diabásio, além

de estar encaixado no domínio de rochas vulcânicas máficas representadas por metabasaltos e doleritos, bem como unidades ácidas arqueanas do Grupo Babaçu (Tabela 4.4).



Figura 4.7 Fotografias de alguns dos prospectos do bloco WRM. a) *shaft* no garimpo Manoel; b) visada E-W do garimpo Bezerro; c) garimpo do Anastácio em atividade com lavra em pequenos *shafts*.



Figura 4.8 Chip de sondagem RC do alvo Manoel. Em destaque a intensa silicificação da encaixante máfica (Dados cedidos pela Troy/Reinarda Mineração)

Tabela 4-4 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Oeste Rio Maria (WRM).

WRM (Oeste Rio Maria)	
Rochas hospedeiras	Rochas máficas (metabasaltos) e félsicas
Estrutura principal	Corredores de cisalhamento NE
<i>Trend</i>	N70E; estruturas secundárias E-W
Assinatura magnética	Baixos gradientes magnéticos
Assinatura gamaespectrométrica	Porções com alto potássio na imagem do parâmetro F
Ambiente geológico	<i>Greenstone belt</i>
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo
Alteração hidrotermal (minerais)	Clorita + biotita + sílica + pirita ± galena ± esfalerita
Estruturas rúpteis	Zona mineralizada deslocada por falhas normais tardias
Alteração de contato	Sem evidências. Algumas intrusões dioríticas sem correlação com a mineralização
Contato litológico	Próximo de intrusivas félsicas

O terceiro bloco, Malvinas, dista cerca de 16 quilômetros em direção a Xinguara, a norte da região de Oeste Rio Maria (**Figura 4.3**). O *trend* Malvinas faz parte do *greenstone* Identidade e foi detalhado por Souza (1994). Inúmeras ocorrências são conhecidas na região, sendo que boa parte delas já foram pesquisadas com furos de sondagem e amostragem de rocha pela Troy/Reinarda Mineração LTDA. A silicificação e sulfetação compreendem os principais tipos de alteração hidrotermal. A estruturação predominante é segundo a direção NW-SE (Souza 1994), classificadas como de segunda ordem nesse estudo.

Diques intrusivos félsicos de quartzo pórfiro possuem orientação geral NW como mostra a **figura 4.9** do parâmetro F no *trend* Malvinas – prospectos e da **figura 4.10**. A foliação regional é aproximadamente N70°W mergulhando entre 50°-80° para sul. Nessa região também se encontra *sills* E-W de feldspato pórfiro, de composição riolítica, isotrópico, bem como diques intrusivos máficos N-S, ambos aparentemente sincrônicos do magmatismo anorogênico de 1.88 Ga (Figura 4.11). Os principais controles da mineralização são listados na **tabela 4.5**.

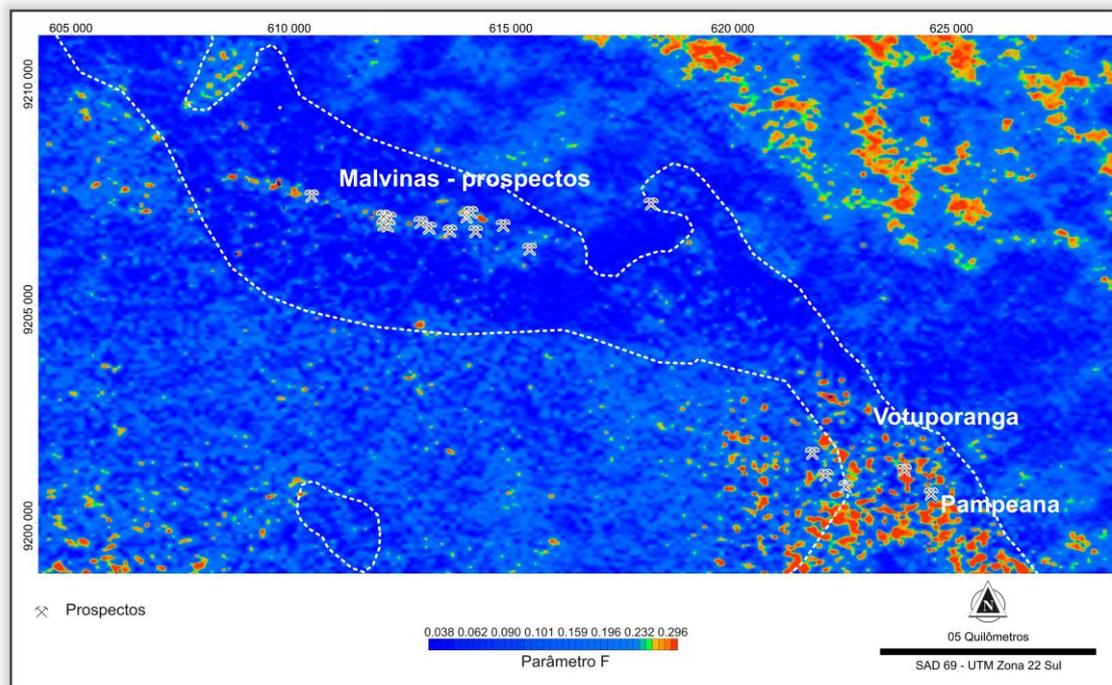


Figura 4.9 Imagem do parâmetro F com transformação linear para melhor visualização dos alto valores. Em destaque o *trend* NW-SE dos prospectos Malvinas, Votuporanga e Pampeana.

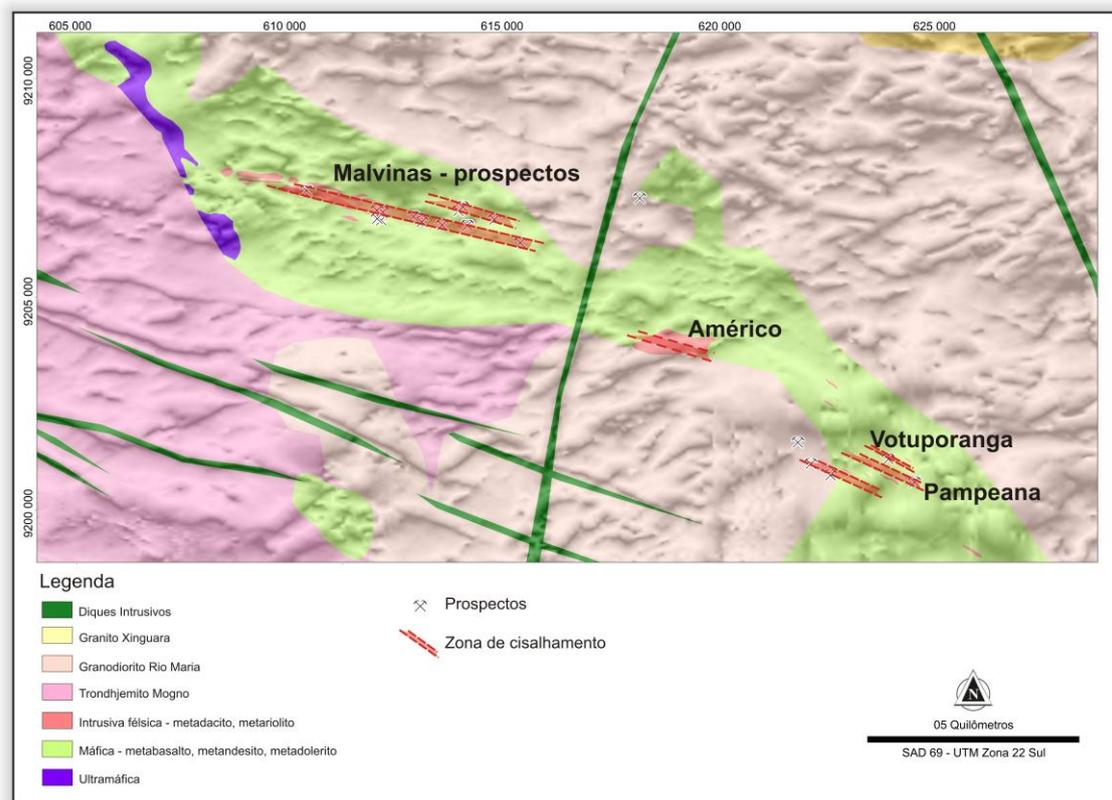


Figura 4.10 Mapa geológico do bloco Malvinas destacando as zonas de cisalhamento NW-SE. O mapa está sobreposto à imagem da inclinação do sinal analítico (ISA).

Diversos garimpos encontram-se alojados em zonas de cisalhamento NW-SE, em contato com encaixante máfica e quartzo pórfiro intrusivo, podendo estar associadas a veio de quartzo ou não (**Figura 4.10**). Como característico na região da área de estudo, os depósitos do bloco Malvinas estão alojado em *splays* E-W.

Tabela 4-5 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Malvinas.

Malvinas (Votuporanga)	
Rochas hospedeiras	Contato entre metamáficas e metadacitos
Estrutura principal	Corredor de cisalhamento NW / alto mergulho
Trend	Corredor NW; estruturas secundárias E-W
Assinatura magnética	Baixos gradientes magnéticos
Ambiente geológico	<i>Greenstone belt</i>
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo no contato entre metamáficas e félsicas
Alteração hidrotermal	Cloritização + biotitização + silicificação + sulfetação (pirita)
Contato litológico	Muito importante / próximo de intrusivas félsicas

Todo o acervo de dados mencionadas no *tópico 4.3* foram utilizados para a construção da modelagem espacial e a produção de mapas de favorabilidade com base na lógica *fuzzy*. Ou seja, vários critérios foram estabelecidos e são sumarizados a seguir:

- ✓ seqüências vulcânicas máficas, félsicas e formações ferríferas (critério litológico);
- ✓ contato vulcânicas máficas/félsicas;
- ✓ extensos corredores de cisalhamento de primeira ordem;
- ✓ estruturas aproximadamente E-W (segunda ordem);
- ✓ zonas enriquecidas em potássio (alteração hidrotermal) mapeados utilizando o fator F;
- ✓ anomalias magnéticas;
- ✓ teores anômalos de ouro em amostras de sedimento de corrente, solo e rocha.

4.4. ANÁLISE POR LÓGICA FUZZY

Uma possibilidade para a geração de mapas de favorabilidade mineral é através da utilização de funções matemáticas que expressem o grau de pertinência de um dado sem a necessidade de pontos de treinamento. Este método, que utiliza o conhecimento de um especialista para definir as relações entre as evidências e as funções, é conhecido como lógica fuzzy (Bonhan-Carter, 1994, Cheng & Agterberg 1999, Luo & Dimitrakopoulos 2003, Karimi & Valadan Zoej 2004, Porwal *et al.* 2004, Lee 2007, Nelson *et al.* 2007). A lógica fuzzy fornece uma maneira conveniente de interpretar e transferir o conhecimento de um especialista numa análise espacial quantitativa dentro de uma plataforma GIS como expressa a **figura 4.11**.



Figura 4.11 Metodologia da modelagem espacial para a Lógica Fuzzy (Nykänen *et al.* 2008).

O grau de pertinência de um dado, é definido em uma série contínua de valores entre 0 e 1, onde 0 e 1 são os valores mínimo e máximo da função e correspondem a não-pertinência e a pertinência total, respectivamente (**Figura 4.12**). Esta figura representa uma função linear de pertinência fuzzy:

$$\mu_{\text{saída}} = (\mu - \text{min.}) / (\text{máx.} - \text{min.})$$

onde μ = valor do pixel e min. e máx. = valores mínimo e máximo do mapa de entrada, respectivamente. Valores muito altos serão certamente anômalos, possuindo uma pertinência fuzzy (*fuzzy membership*) “1”, enquanto valores muito baixos ou abaixo do *background* terão pertinência fuzzy “0”. Entre estes dois extremos existe toda uma faixa de possíveis valores de pertinência.

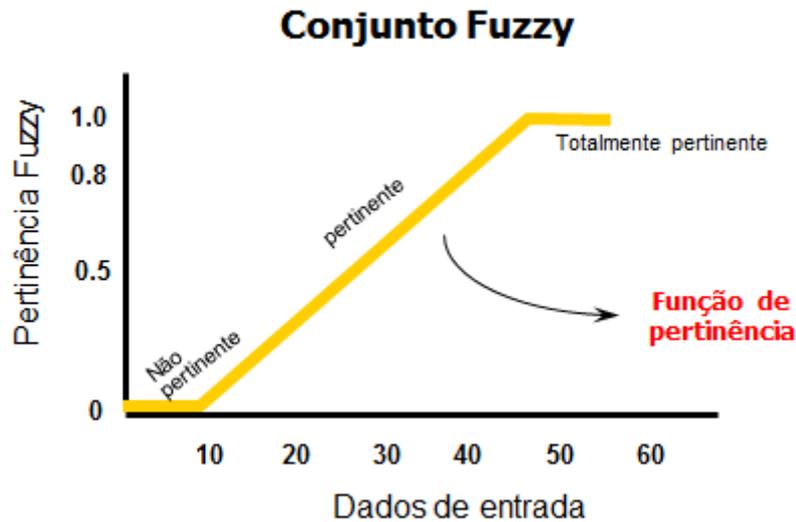


Figura 4.12 Gráfico da função de pertinência fuzzy para um conjunto de dado de entrada. Os valores no mapa menores que 10 correspondem ao zero da função de pertinência, ou seja, não apresentam relação com o objeto de pesquisa. Em contraste, os valores acima de 48 apresentam pertinência total (Pertinência fuzzy = 1).

Várias funções podem ser utilizadas na definição dos valores de pertinência *fuzzy*, sendo sua escolha baseada no julgamento do especialista e aplicada a cada mapa evidencial que irá constituir o mapa integrado. Esta etapa corresponde à fuzificação dos dados, que consiste basicamente em uma simplificação de dados de natureza distintas, de forma que possam ser utilizados conjuntamente (Quadros *et al.* 2006, Nelson *et al.* 2007, Magalhães, 2008). An *et al.* (1991), Bonham-Carter (1994) e Raines *et al.* (2010) apresentam os operadores de lógica fuzzy ou nebulosa mais úteis para a combinação de mapas em exploração mineral: interseção lógica (*fuzzy-AND*), união lógica (*fuzzy-OR*), produto algébrico ‘fuzzy’ (*fuzzy-Produto*), soma algébrica ‘fuzzy’ (*fuzzy-Soma*) e operação gama (*fuzzy-Gamma*)

4.4.1. Fuzificação dos dados

A fuzificação dos dados foi empregada na tentativa de gerar mapas evidenciais considerando-se os tipos de ocorrências minerais da área de estudo de acordo com a rocha hospedeira como mostra a **figura 4.2**. O primeiro refere-se às mineralizações auríferas hospedados em *greenstone belts* em zona de cisalhamento com influência de

rochas encaixantes máficas e félsicas. O segundo tipo refere-se à mineralizações hospedado em vulcânicas máficas e formações ferríferas do tipo algoma. Os vetores litológicos e estruturais apresentados guiaram os modelos efetuados para a área de trabalho, bem como para os três blocos estudados em detalhe.

Os dados empregados no primeiro modelo foram: mapa geológico com grau de pertinência alto para unidades félsicas e máficas, dados aerogeofísicos na tentativa de realçar potássio anômalo e lineamentos magnéticos E-W. O segundo modelo caracteriza-se pelo alto grau de pertinência para os BIFs do mapa geológico e do uso da imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) nos produtos aerogeofísicos, além dos mesmos lineamentos magnéticos E-W. Considerando que os halos de alteração são pouco espessos, destaca-se que as distâncias dos *buffers* para todos os modelos equivaleram aos intervalos de 0-100 m e 100-200 m.

Para essa etapa de fuzificação os dados foram previamente rasterizados, com tamanhos de célula de 30m, para a determinação de pertinências *fuzzy* que permitem o escalonamento dos dados originais em graus de variabilidade entre 0 (pertinência ausente) e 1 (pertinência total). Posteriormente, estes resultados são combinados por meio de operadores *fuzzy* (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994) para se obter o mapa final de favorabilidade.

Litologia

Por ser um dado categórico, não é possível estabelecer uma função matemática para transformar um mapa geológico em um conjunto *fuzzy*. Entretanto, a partir do modelo metalogenético do depósito e da relação do potencial aurífero com as rochas hospedeiras, é plausível atribuir valores relativos entre 0 - 1 para cada litotipo, tornando o mapa geológico um produto fuzificado. Neste estudo os valores de pertinência foram ponderados livremente para cada litotipo, conforme sua importância relativa segundo a favorabilidade de cada unidade de acordo com o modelo exploratório da região (**Figura 4.2**). Assim, atribuiu-se maior pertinência às litologias do Grupo Babaçu e Lagoa Seca que hospedam a mineralização aurífera, como as metamáficas, intrusivas félsicas e lentes de formação ferrífera e baixas pertinências são atribuídas para as classes associadas às litologias do Grupo Rio Fresco, granitóides e granitos anorogênicos, onde

há pouca ou nenhuma favorabilidade em hospedar mineralização aurífera do tipo *lode* (Figura 4.13, 4.14, Tabela 4.6).

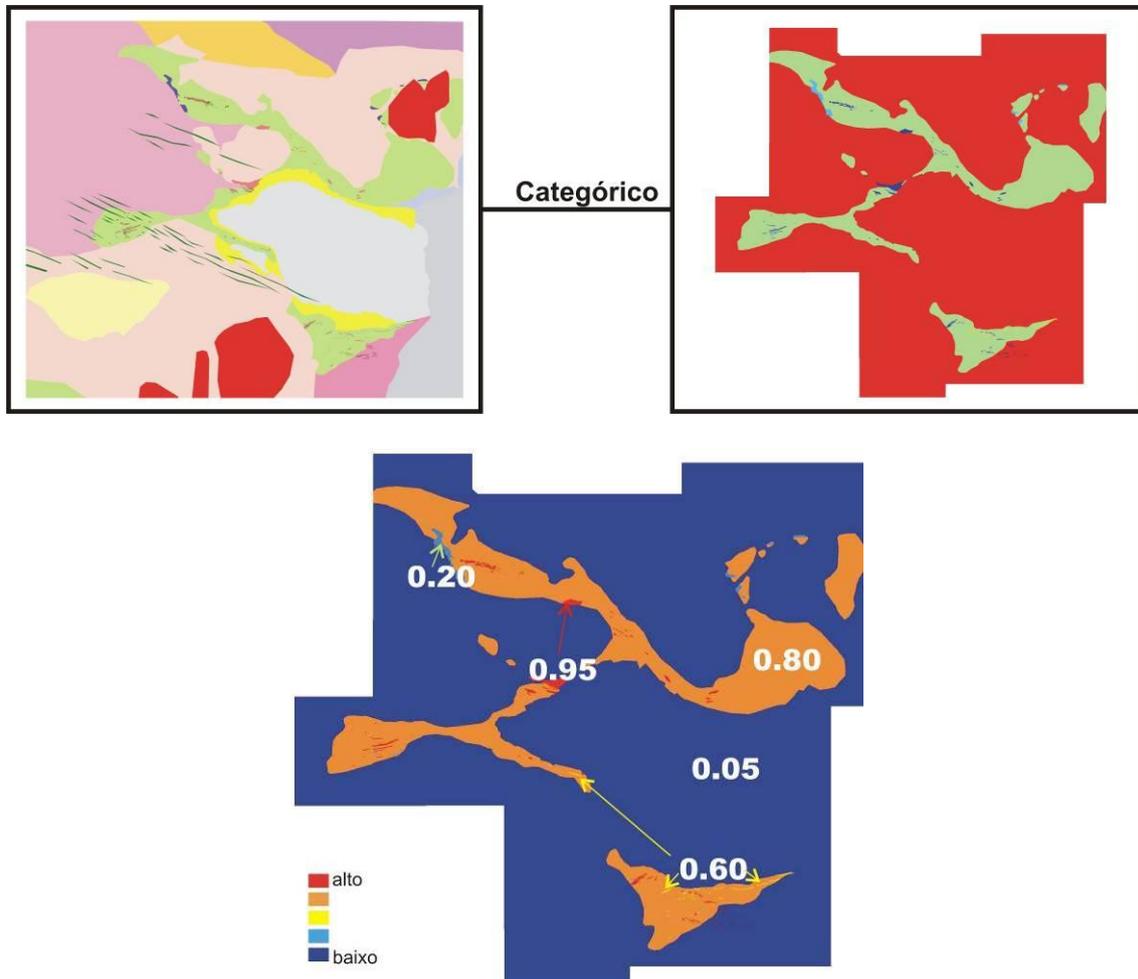


Figura 4.13 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um *expert*. A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos e mapeados nesse trabalho. Modelo 1) alta pertinência para as vulcânicas félsicas e máficas.

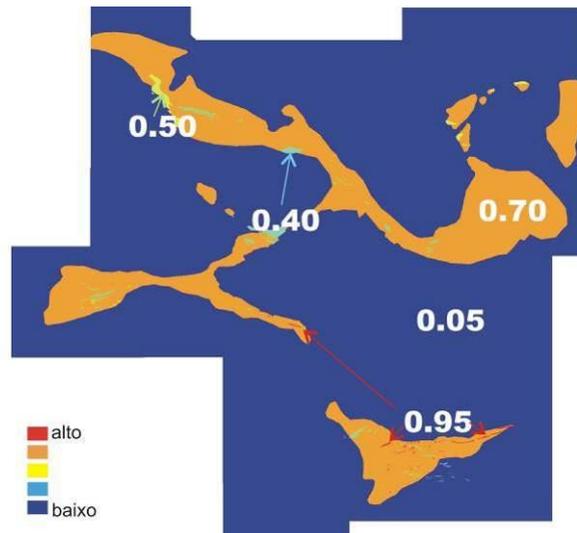


Figura 4.14 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um *expert*. A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos. Modelo 2) alta pertinência para as formações ferríferas e vulcânicas máficas.

Tabela 4-6 Unidades identificadas no mapa geológico associados aos valores de pertinência fuzzy para os dois modelos: Modelo 1 – mineralização associada às unidades félsicas/máficas; Modelo 2 – mineralização associada à formação ferrífera bandada/máficas.

Modelo 1 - Félsica/Máfica		Modelo 2 – BIF	
Litotipo	Pertinência Fuzzy	Litotipo	Pertinência Fuzzy
Félsicas	0.95	Félsicas	0.40
Máficas	0.80	Máficas	0.70
BIFs	0.60	BIFs	0.95
Ultramáficas	0.20	Ultramáficas	0.50
Granitos anorogênicos, granitóides, quartzitos, filitos, siltitos, grauvacas, etc...	0.05	Granitos anorogênicos, granitóides, quartzitos, filitos, siltitos, grauvacas, etc...	0.05

Controles Estruturais

De acordo com Huhn (1992), Pinheiro (2009), Miller e Mol (2010) as principais ocorrências de ouro na região de estudo estão relacionadas à corredores de cisalhamento de primeira ordem, com direções NE-SW e NW-SE, respectivamente. O presente estudo verificou que os principais depósitos da região ocorrem alojados em *splays* E-W, como estruturas de segunda ordem, ao longo desses corredores de cisalhamento de primeira ordem. Com isso, gerou-se um mapa temático destacando-se os lineamentos magnéticos E-W, com pequenos corredores ENE-WSW e WNW-ESSE. Geralmente, as mineralizações estão associadas às estruturas, mas não necessariamente ocorrem no traço estrutural. Elas estão associadas a uma zona de influência metalogenética. Para modelar o dado estrutural é necessário gerar zonas tampões, geralmente conhecidas como *buffers*, e posteriormente rasteriza-las para modelagem no ArcSDM. Dessa forma, foram gerados dois anéis ou duas zonas tampões de 0 a 100 metros e 100-200 metros ao redor dos lineamentos magnéticos (mapeados e interpretados dos gradientes horizontais medidos - Gx e Gy) e falhas interpretadas para o presente estudo. Para fuzificação desses dados evidenciais, considerou-se pertinência de 0.95 entre 0 - 100 metros e 0.5 entre 100 - 200 metros (**Figura 4.15**).

Controles estruturais usados fuzificação dos dados estruturais incluíram: (1) principais zonas de deformação (*trends* de primeira e segunda ordem, com direções NE e NW) mapeadas e interpretadas; (2) estruturas E-W, ENE-WSW, WNW-ESE (mapeados e interpretados dos gradientes horizontais medidos - Gx e Gy). No entanto, após várias modelagens os melhores resultados advêm da utilização de estruturas com orientação E-W e os pequenos corredores ENE-WSW e WNW-ESE.

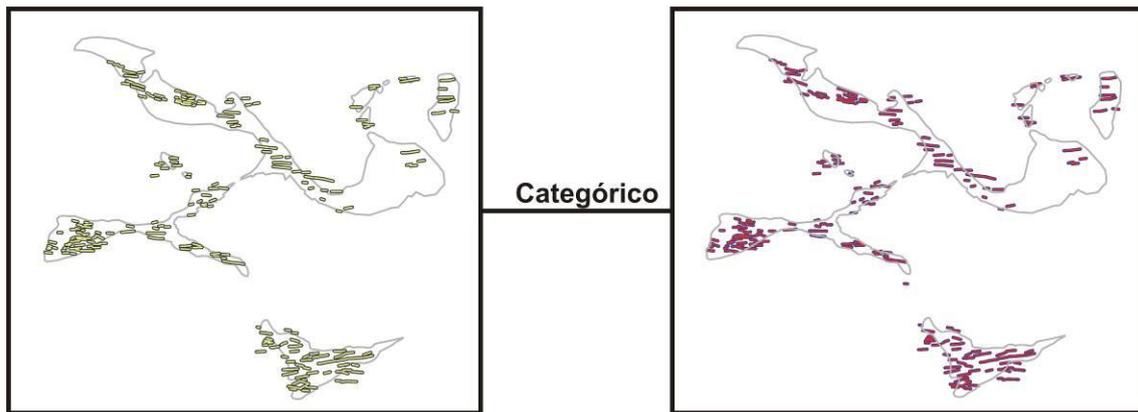


Figura 4.15 Fuzzificação das principais estruturas com *buffers* em zonas sucessivas de 0 à 200 metros, sendo um alto valor de pertinência de 0.95 entre 0 - 100 metros e 0.5 entre 100 - 200 metros.

Dados Geofísicos

Os dados aerogeofísicos são considerados dados cumulativos, onde as funções de pertinência *fuzzy* são aplicadas de acordo com a relação entre os mapas evidenciais e o modelo metalogenético descrito acima. Após, o teste com os diversos operadores observou-se que as funções de pertinência mais adequadas para os conjuntos de dados estudados são as funções *fuzzy MS Large* e *MS Small*.

a) função de pertinência *fuzzy MS Large*: esta função foi aplicada aos mapas da razão K/Th, Kd (Potássio anômalo), parâmetro F, ASA (amplitude do sinal analítico) e do AGHT (Amplitude do gradiente horizontal total) Para estas evidências quanto maiores os valores de concentração dos elementos dos produtos gamaespectrométricos ou maior a amplitude do sinal analítico, mais favoráveis à ocorrência de um depósito, conforme o modelo metalogenético. Sendo assim, aos maiores valores do mapa de entrada são atribuídos os maiores valores de pertinência *fuzzy*.

b) função de pertinência *fuzzy MS Small*: Ao contrário do que ocorre na função *large*, esta função considera os menores valores dos dados de entrada como os maiores valores da função de pertinência. Foram usadas a função *MS small* no canal do Th e nas imagens do gradiente horizontal medido em X e Y, Gx e Gy. A imagem do tório foi fuzzificado a partir desta função, pois de acordo com as observações dos dados o tório

apresenta uma relação inversa à do potássio e urânio nas áreas dos principais depósitos e ocorrências de ouro. Já para as variáveis do gradiente horizontal medido em X e Y a função *MS small* foi usada para realçar os baixos gradientes horizontais Gx e Gy.

4.4.2. Operações fuzzy

Os mapas evidenciais, após serem fuzificados, foram combinados utilizando operadores *fuzzy*, a fim de se gerar o modelo final. Neste trabalho, foram utilizados os operadores *fuzzy-AND*, *fuzzy-Produto* e *fuzzy-Gamma* (Bonham-Carter 1994, Lee 2007).

a) uso do operador *fuzzy-AND* considerando-se todos os dados gamaespectrométricos fuzificados, a fim de resultar em uma única imagem representativa, evitando-se o forte condicionamento destes dados que visam o realce de K;

b) uso do operador *fuzzy-produto* considerando-se os dados magnetométricos fuzificados como as variáveis Gx e Gy do gradiente horizontal medido a bordo da aeronave. Uma vantagem em se utilizar o operador produto é que o resultado final tem uma contribuição de todos os dados de entrada, diferente do que ocorre com o operador *fuzzy-AND*.

c) aplicação do operador *fuzzy-gama* considerando-se os mapas fuzificados da amplitude do sinal analítico (ASA), do *buffer* das estruturas, do mapa geológico categórico e dos resultados dos operadores *fuzzy-AND* e *fuzzy-produto*. A combinação final consiste no operador fuzzy-gama com parâmetro γ 0.9 (**Figuras 4.16 a 4.23**). A seleção do valor do parâmetro γ é subjetiva e vários valores foram testados, sendo considerado no trabalho o valor 0.9 como um parâmetro otimista. Um operador fuzzy-gama com valor menor como 0.7, por exemplo, seria um parâmetro menos otimista. Optou-se usar o parâmetro γ com valor 0.9 em todos os modelos.

4.4.3. Mapas de favorabilidade

Um modelo regional foi gerado para toda a área de estudo, posteriormente modelos de três blocos onde concentram os principais prospectos e que mostram vetores prospectivos diferenciados. O fluxograma da modelagem, bem como o mapa final de

favorabilidade para depósitos de ouro do tipo *lode* resultando da combinação de pesos e operadores *fuzzy* são apresentados nas figuras de **4.16** a **4.23**, a saber: modelo regional para toda a área do projeto Andorinhas; Mamão/Babaçu, Oeste Rio Maria (WRM) e Malvinas. No total foram selecionados na modelagem *fuzzy* sessenta alvos (**Figura 4.24**).

4.4.3.1. Modelo Regional - Área do Projeto Andorinhas

Na modelagem regional foram levados em conta os dados apresentados dentro modelo 01 na tabela 4.6 da fuzificação da geologia, ou seja, abordagem associada à mineralização no contato metamáfica/metafélsica, uma vez que somente na região do *trend* Mamão-Babaçu encontram-se mineralizações de ouro associadas à formação ferrífera/metamáficas.

A **figura 4.16** mostra todas as etapas para a geração de um modelo regional para a área do Projeto Andorinhas. O modelo considerou as estruturas E-W com *buffers* de 0 – 100m com pertinência 0.95 e 100 – 200m com pertinência 0.50. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e a razão K/eTh, e *fuzzy small* para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foram usados os operadores *fuzzy small* para Gy e *fuzzy large* para Gx, sendo posteriormente empregado o operador produto.

Uma análise mais detalhada dos resultados contemplou apenas as áreas fora dos três principais blocos detalhados a seguir. O modelo mapeia vários alvos conhecidos com alta favorabilidade, a saber: Rúbens, Rufino, Beroni, Pampeana e Duas Vendas. Esses alvos estão relacionados à metavulcânicas máficas, metavulcanoclásticas, quartzo pórfiro e metassedimentos do Grupo Babaçu. O modelo ainda seleciona dez novos alvos com médio/alto grau de prospectividade, sendo 5 deles destacados na **figura 4.17**.

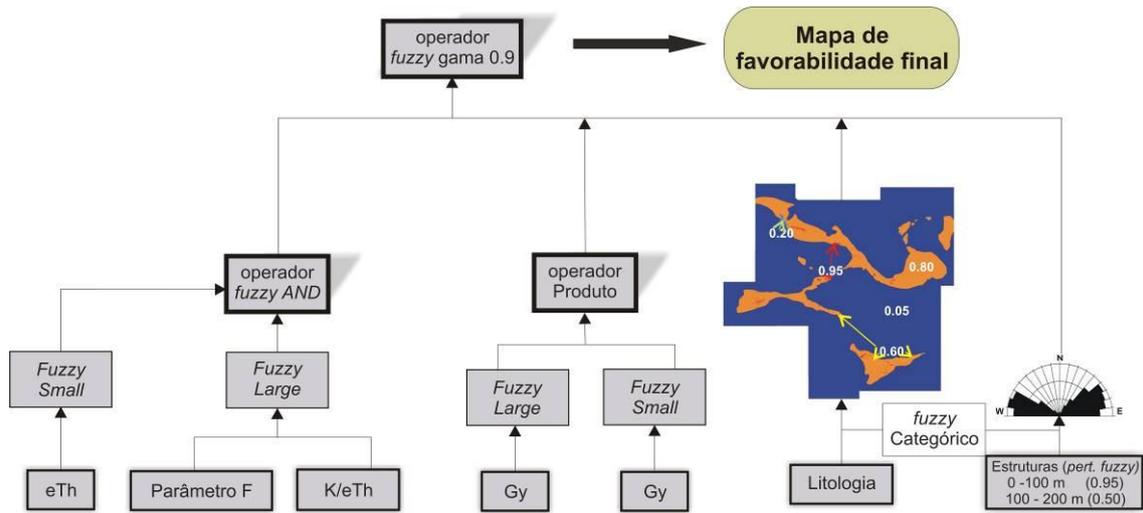


Figura 4.16 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo regional da área de estudo.

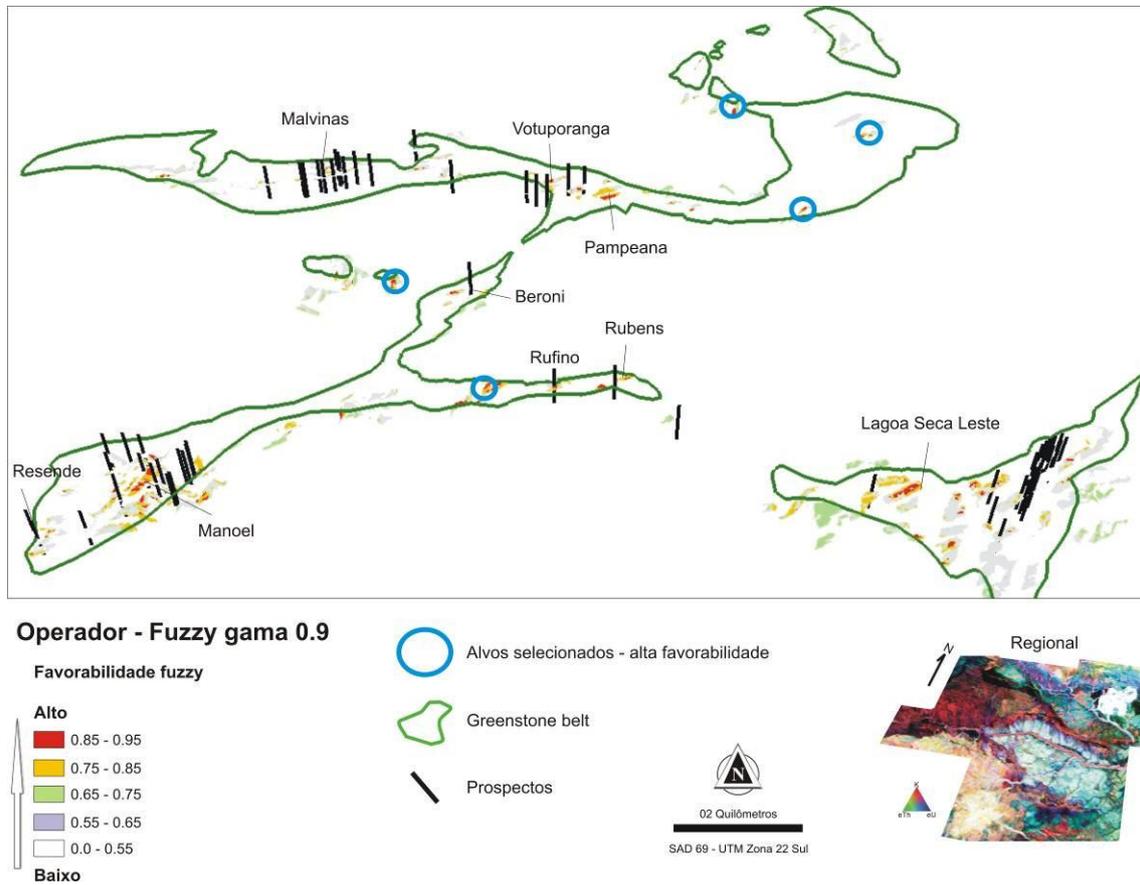


Figura 4.17 Mapa, em perspectiva, de potencialidade mineral para ouro gerado para a área do Projeto Andorinhas com operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque (prospectos – barras cor preto) os alvos já conhecidos e os círculos em azul mostram novos alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.2. Bloco Mamão/Babaçu

Para o bloco Mamão utilizou-se o denominado modelo 2 na tabela 4.6, ou seja, alta pertinência para formação ferrífera bandada e unidades máficas. O modelo também considerou as estruturas E-W com buffers de 0 – 100m com pertinência 0.95 e 100 – 200m com pertinência 0.50.

A **figura 4.18** mostra todas as etapas para a geração do modelo para o Bloco Mamão/Babuçu. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e a razão K/eTh, e *fuzzy small* para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto.

A análise dos resultados mostra que a maior favorabilidade na região da mina do Mamão está associada à metamáficas e, secundariamente, associadas a finas lentes de formação ferrífera. A maioria dos prospectos do corredor NE, ou *trend* Mamão-Babaçu, estão representados por média/alta favorabilidade, como Coruja NE, Luiza, Piauí, etc. O modelo mostra que a mina do Mamão está sobre um *trend* de média favorabilidade, pois a mina não esta associada a formação ferrífera e somente metamáficas. Utilizando o corte de possibilidade *fuzzy* de 0,55, observa-se a validação da maioria das ocorrências conhecidas ao longo desse corredor (**Figura 4.19**).

Além dos alvos ao longo do corredor Mamão-Babaçu, o modelo mapeou o alvo Marcinho, também gerado na interpretação geofísica visual (Capítulo 03). Outros alvos a sudoeste e a leste do depósito Lagoa Seca, seguindo a mesma estrutura em forma de sigmóide, também foram mapeados. Cinco novos alvos foram selecionados ao longo do contato granodiorito Rio Maria - *greenstone*. Nesse modelo, o depósito Lagoa Seca mostrou baixa favorabilidade, pois os vetores prospectivos são outros, como supracitado.

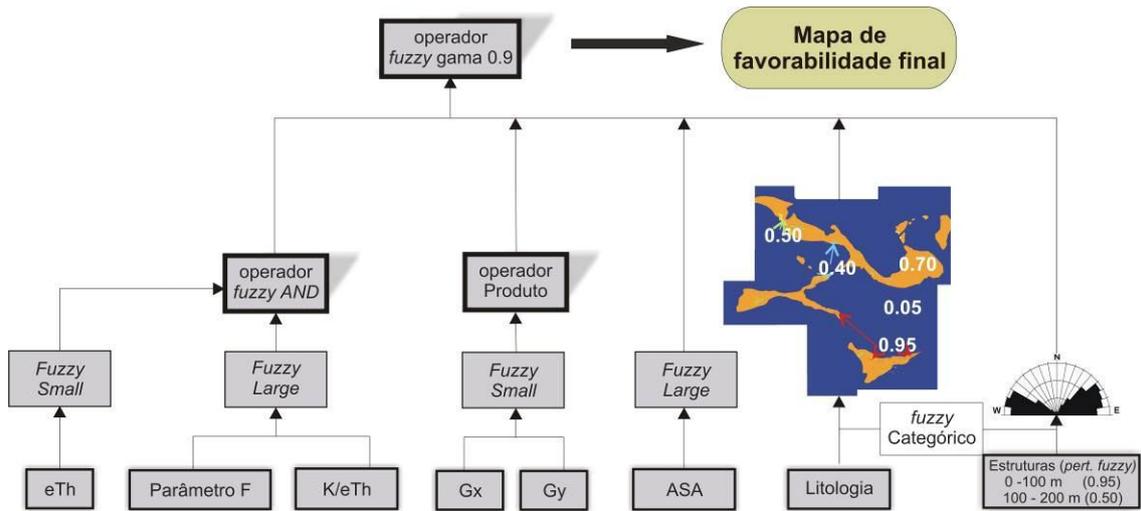


Figura 4.18 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco Mamão/Babaçu.

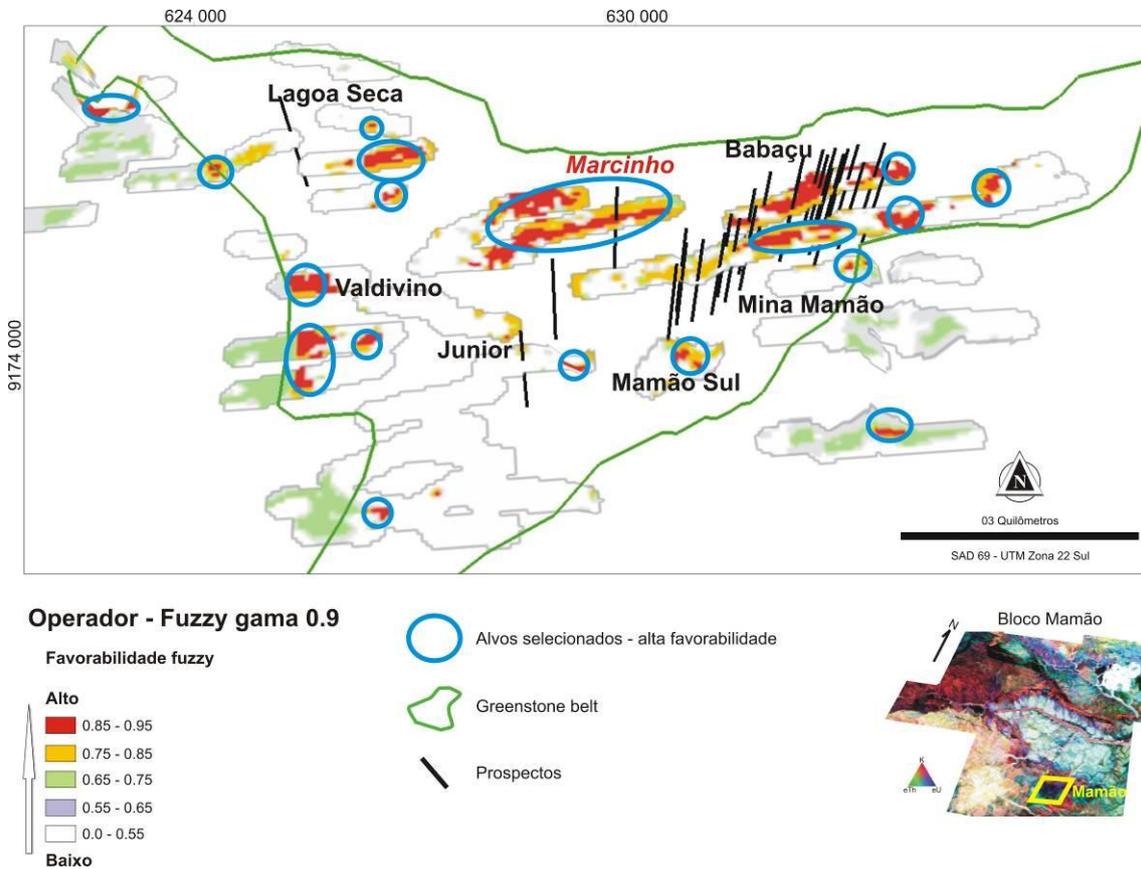


Figura 4.19 Mapa de favorabilidade aurífera em 2.5D para o bloco Mamão/Babaçu usando o operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preta) e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.3. Bloco WRM (Oeste Rio Maria)

Para o bloco WRM a litologia empregada foi o modelo 1, com pertinência alta relacionada às unidades félsicas e máficas detalhado na **tabela 4.6**.

O fluxograma da **figura 4.20** mostra todas as etapas para a geração do modelo para o Bloco Oeste Rio Maria. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F, a razão K/eTh e o potássio anômalo (Kd). Já o *fuzzy small* foi usado para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto. O operador *fuzzy gama* permitiu a integração dos vetores apontados anteriormente através parâmetro γ com valor 0.9.

O resultado da modelagem desse bloco mostra algum efeito litológico a oeste do prospecto Manoel, porém o modelo validou regiões extremamente garimpadas no passado e pesquisadas pela Troy/Reinarda Mineração como o garimpo Manoel, Anastácio, Bezerra e o alvo Resende. A maior favorabilidade na região de Oeste Rio Maria está associada à unidades ácidas, seja rochas metassedimentares ou vulcanoclásticas. O modelo mapeia dez novos alvos, sendo três delas no contato granito-*greenstone* (**Figura 4.21**).

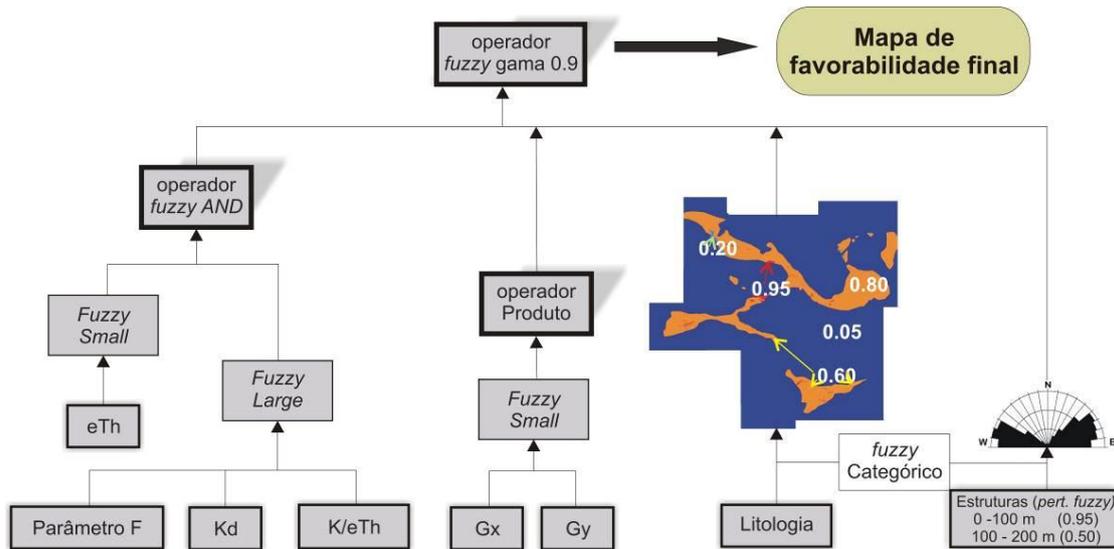


Figura 4.20 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco WRM (Oeste Rio Maria).

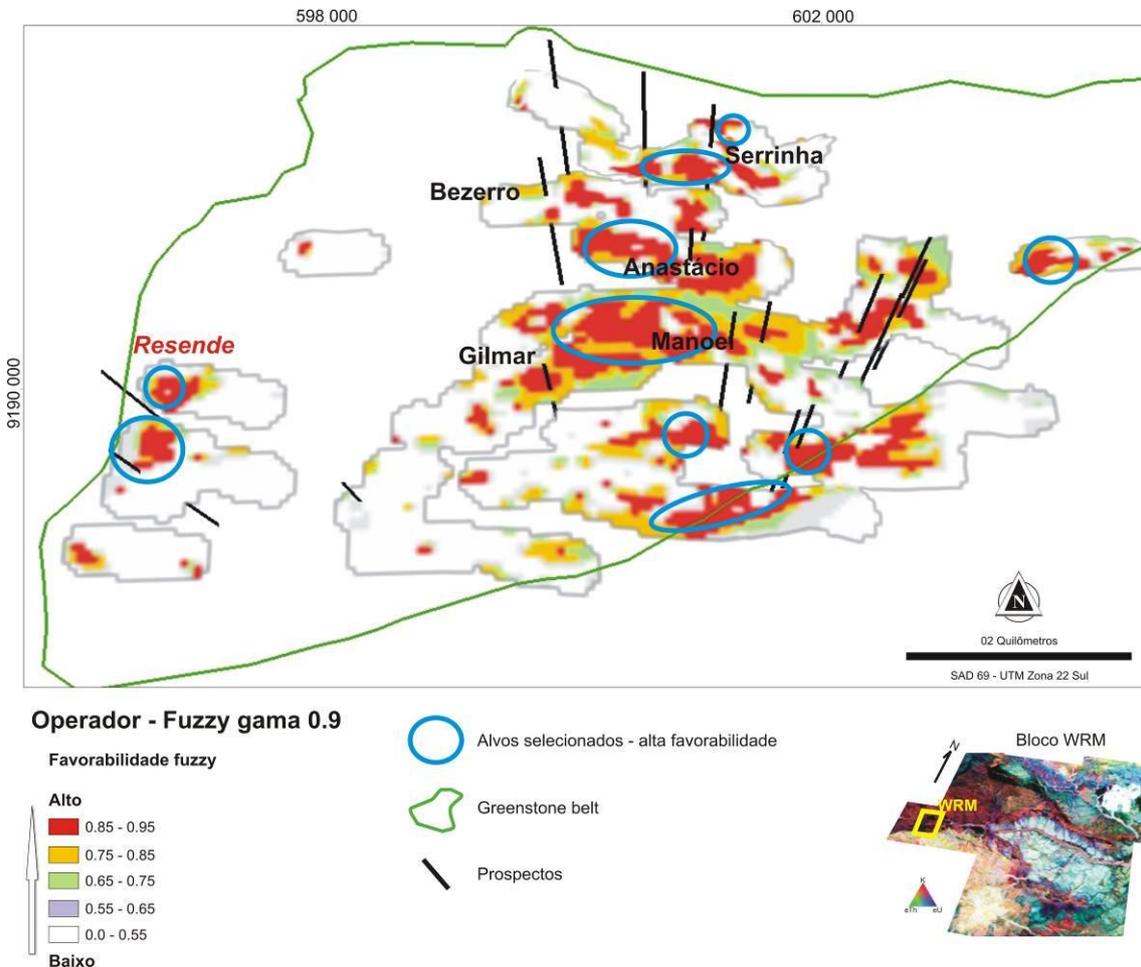


Figura 4.21 Mapa de favorabilidade aurifera em 2.5D para bloco Oeste Rio Maria usando o operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preta) e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.4. Bloco Malvinas (Votuporanga)

O modelo do bloco Malvinas possui, praticamente, a mesma sequência do bloco WRM, com exceção do operador *fuzzy large* para a razão K/Th (**Figura 4.22**). Para o bloco Malvinas foi empregado o modelo 01 (**Tabela 4.6**), com alta pertinência relacionada ao contato félsica/máfica. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e o potássio anômalo (Kd). Já o *fuzzy small* foi usado para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto. O operador *fuzzy gama* levou em conta todos os operadores acima com parâmetro γ com valor 0.9.

Como no bloco WRM, a análise dos resultados desse bloco também mostram que a maior favorabilidade da área está associada a intrusivas félsicas. Alvos históricos da região, como Gerson, Américo e Pampeana foram mapeados com possibilidade *fuzzy* > 0.75 , ou seja, alta favorabilidade. O alvo Votuporanga, um dos principais alvos gerado pela interpretação geofísica (**Capítulo 03**), também foi evidenciado aqui com alta favorabilidade e oito novos alvos foram selecionados nesse bloco (**Figura 4.23**).

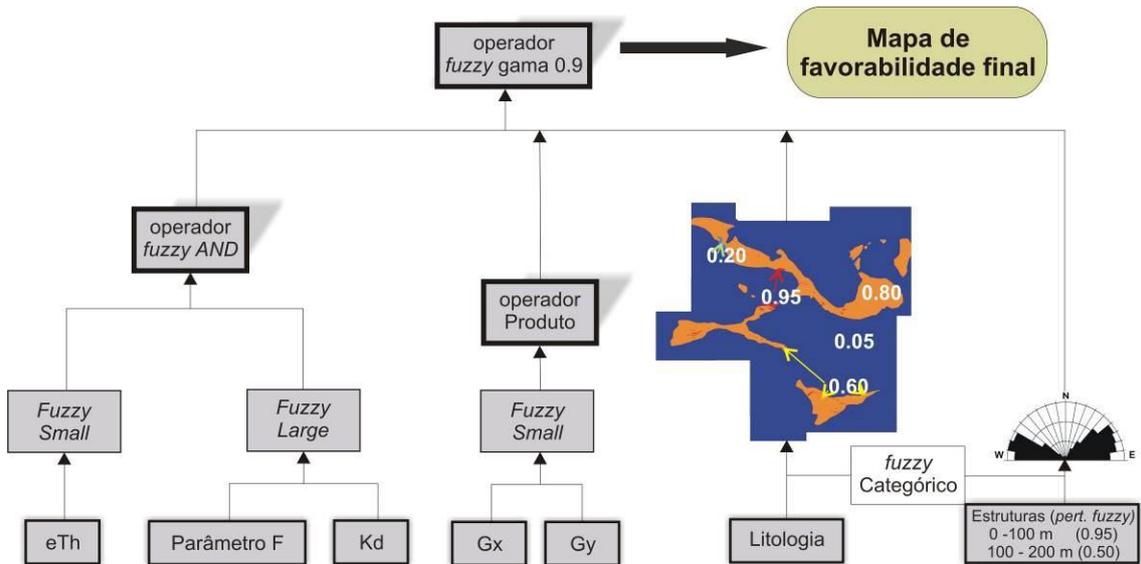


Figura 4.22 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco Malvinas (Votuporanga).

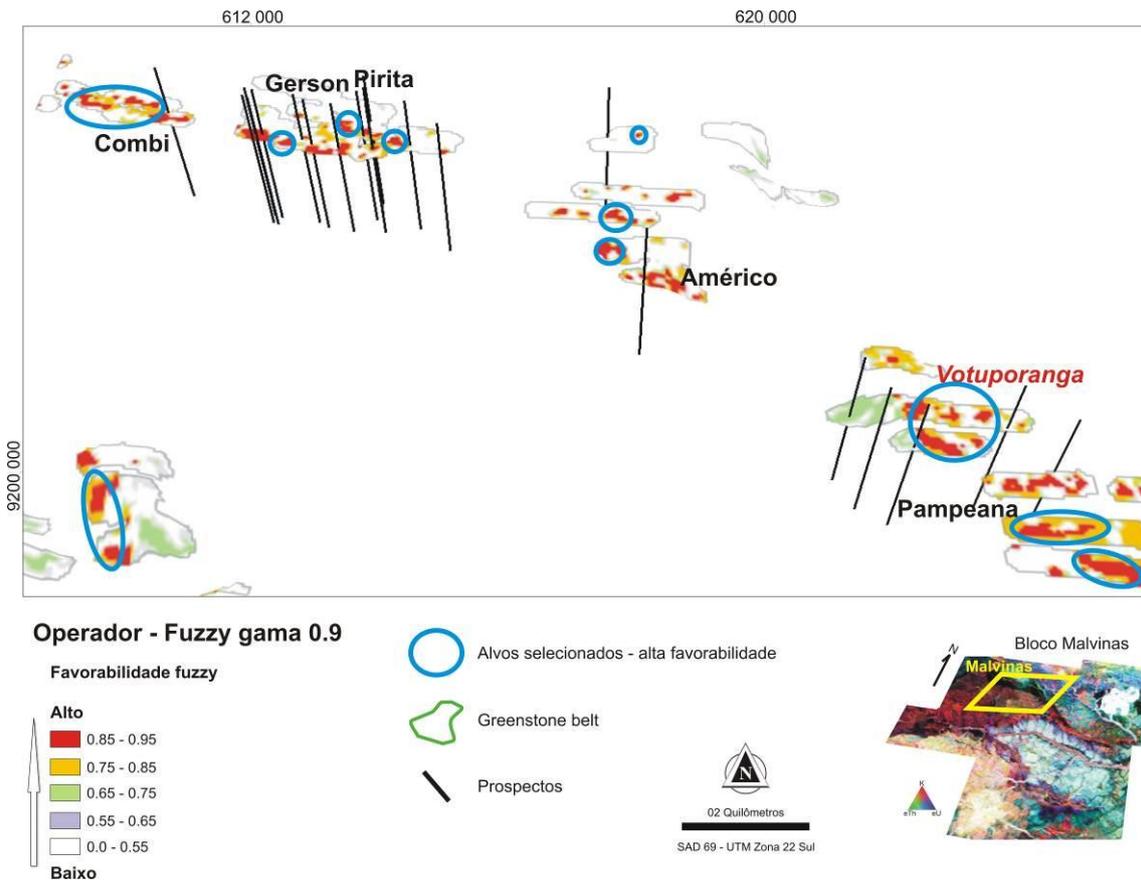


Figura 4.23 Mapa de favorabilidade aurífera para o bloco Malvinas em 2.5D usando o operador fuzzy gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preto) e os círculos em azul os alvos com maior favorabilidade.



Figura 4.24 Mapa ilustrando o somatório dos três modelos *fuzzy* para a região do Projeto Andorinhas destacando a potencialidade aurífera para a região, considerando o somatório dos vetores de exploração.

4.5. VALIDAÇÃO DOS MODELOS EXPLORATÓRIOS

Com a análise visual dos dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos de alta resolução e a modelagem espacial usando a lógica *fuzzy*, foram selecionados oitenta e cinco alvos, contudo alguns deles são coincidentes em ambos os modelos (**Figuras 3.21 e 4.24**).

Após a seleção dos alvos foi realizado um ranqueamento priorizando os alvos coincidentes dos dois métodos se seleção de área para validação no campo. O ranqueamento utilizou como base dados geoquímicos existentes (solo, rocha ou sedimento), ocorrências conhecidas, estruturas e geologia favoráveis, logística em relação à planta de beneficiamento. Após o ranqueamento, os principais alvos foram checados em campo com trabalhos de *follow up* como mapeamento geológico, amostragem de rochas, amostragem de solo e coletas de sedimentos de corrente.

Para auxiliar o ranqueamento efetuou-se a interpolação de dados de sedimento de corrente do banco de dados da empresa Reinarda Mineração com 466 amostras. Os resultados mostraram a necessidade de adensamento em algumas áreas e efetuou-se uma campanha com 37 pontos cobrindo algumas drenagens de segunda ordem numa área com cerca de 15 km².

A **figura 4.25** mostra o grid dos dados interpolados contendo 502 amostras onde se percebe que os principais alvos validados estão sob à influência de drenagens anômalas à jusante ou a montante. Na porção sudeste do mapa, onde se localiza a Mina Mamão e o depósito Lagoa Seca, não há amostras de sedimento de corrente pois a área em si possui drenagens extremamente garimpadas com forte influência antrópica. Alguns alvos seriam mais bem validados se houvesse uma distribuição homogênea de amostras, são eles: os três alvos do extremo nordeste, o alvo Votuporanga (detalhado a seguir) e três outros alvos na porção centro leste da área.

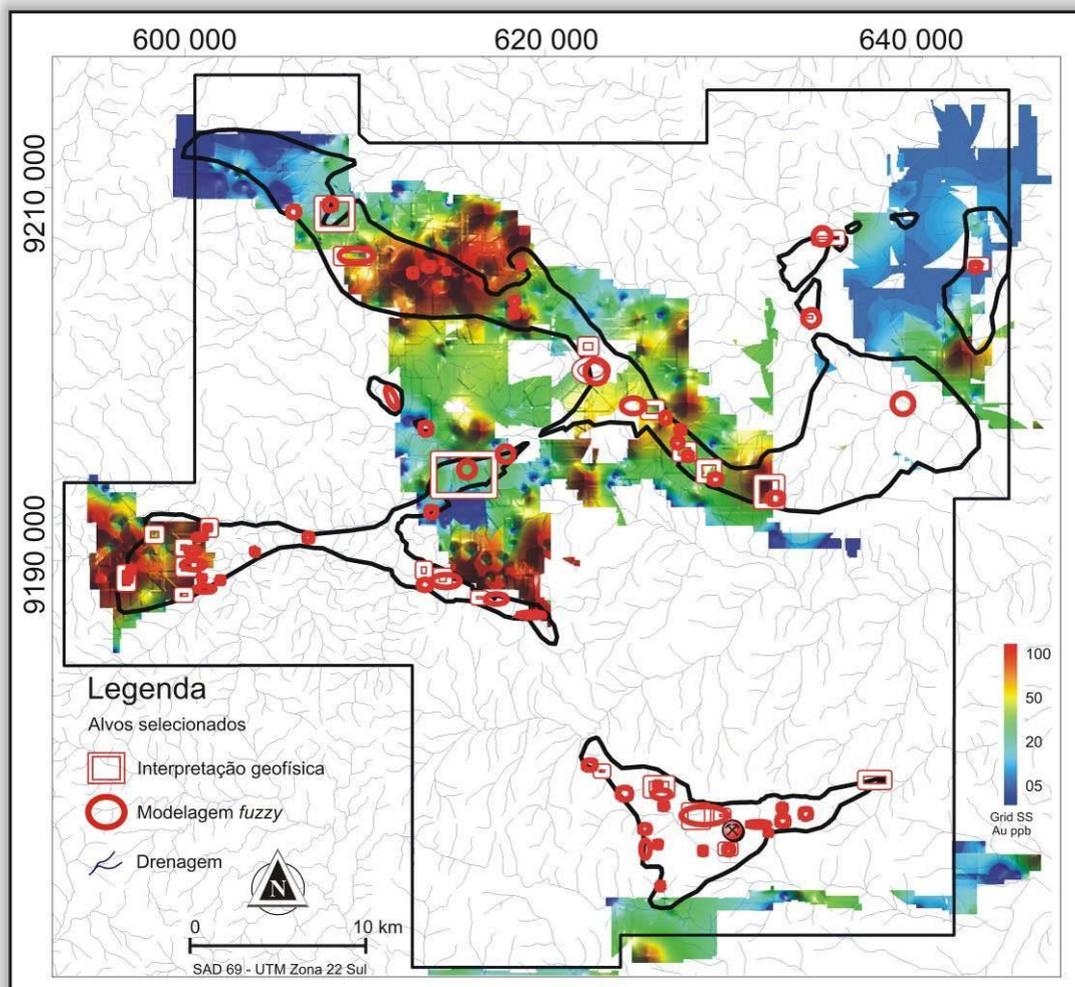


Figura 4.25 A imagem mostra o grid de ouro gerado a partir de dados de sedimento de corrente usando o inverso da distância ponderada com o posicionamento dos 85 alvos selecionados para serem validados. Os 85 alvos incluem os dois métodos, de interpretação e modelagem para a seleção de áreas prospectivas.

Depois de constatado algum potencial aurífero com a análise dos sedimentos de corrente partiu-se para a fase de prospecção com amostragem de solo, sendo primeiramente *grids* exploratórios espaçados de 200 m por 80 m e depois *infill* em porções que deram resultados anômalos com malhas de 100 m por 40 m. Nesse estudo serão apresentados apenas os melhores alvos pesquisados. Para uma melhor visualização e detalhamento, esses alvos foram separados em três blocos: Mamão, Oeste Rio Maria (WRM) e Votuporanga (**Figura 4.26**). Abaixo cada um deles serão detalhados.

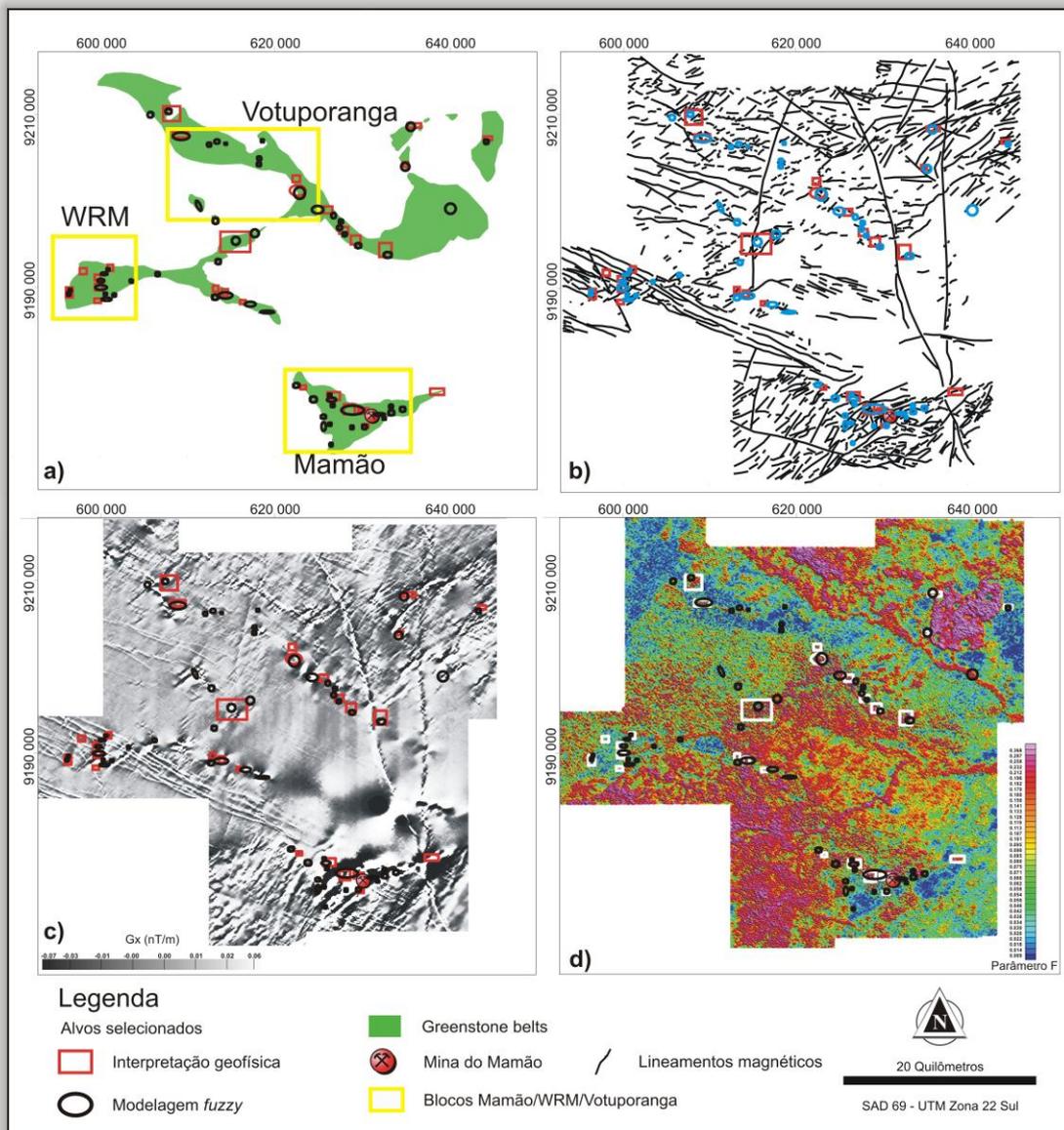


Figura 4.26 a) A figura mostra a distribuição dos blocos dentro da área de estudo e os alvos selecionados; b) A figura mostra os alvos selecionados confrontados com as estruturas mapeadas dentro do presente trabalho; c) imagem do gradiente horizontal em X medido a bordo da aeronave e d) imagem do parâmetro F integrado com os alvos mapeados nesse trabalho.

4.5.1. Bloco Mamão

O bloco Mamão está inserido no *greenstone* Andorinhas localizado na porção sudeste da área de estudo. Nessa região encontram-se diversos depósitos e a mina do Mamão de propriedade da Troy Resources NL da Austrália. Regiões hidrotermalizadas

são mapeadas ao longo da zona de cisalhamento e em rochas hospederias como as metamáficas (Mina Mamão e depósitos do *trend* Mamão/Babaçu), as formações ferríferas do Grupo Babaçu (alvo Marcinho) e os metassedimentos do Grupo Lagoa Seca (depósito Lagoa Seca).

Na região do Mamão existem diversas cavas garimpeiras e os principais depósitos e *trend* mineralizados, como o Mamão/Babaçu e o *trend* Lagoa Seca. Os primeiros trabalhos exploratórios começaram em 1973 pela extinta DOCEGEO (antigo braço exploratório da Vale S.A), com linhas regionais de amostragem de solo. Os primeiros resultados positivos encontrados na área do Babaçu resultaram na descoberta dos depósitos de Mamão e Lagoa Seca.

Em 1982 cerca de 10 mil garimpeiros invadiram a região e a DOCEGEO fechou as operações temporariamente. Posteriormente, um garimpeiro e também fazendeiro chamado Barbosa onde localiza-se o alvo, começou a explorar um dos corpos do Mamão (Melechete) abrindo uma galeria subterrânea com cerca de 130 m de profundidade vertical. Estima-se uma produção total de 2.500 quilos de ouro nessas galerias até 1986. Até 1994, a DOCEGEO investiu cerca de 15 mil metros em pesquisas de sondagem no alvo Mamão para a cubagem do depósito vendendo a área para a Golden Star Resources que, entre 1995 - 1997, continuou com as pesquisas na avaliação do potencial prospectivo para ouro nas rochas do Grupo Andorinhas. A empresa mapeou alvos importantes em trincheiras abertas no nível saprolítico.

A **figura 4.27** mostra os corpos da Mina do Mamão. A mina subterrânea é composta por três corpos mineralizados, sendo o principal Melechete, seguido do corpo M2 e um corpo menor chamado Arame. A lavra da mina é realizada de duas formas em corpos distintos: do tipo corte e preenchimento e câmeras e pilares.

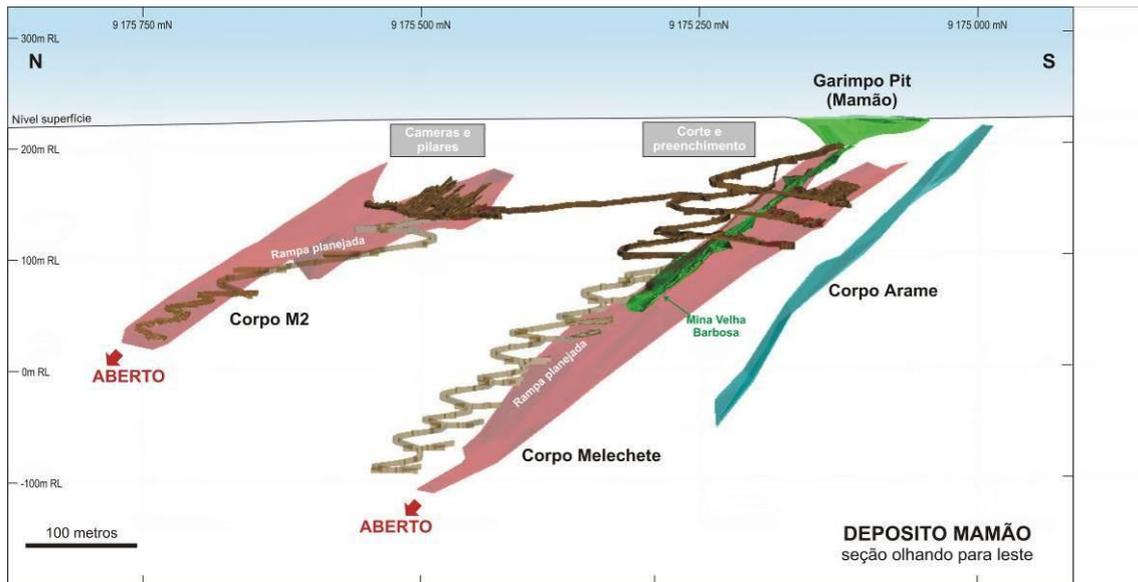


Figura 4.27 Figura em 3D da Mina do Mamão destacando os três corpos (*lode*) que estão sendo lavrados desde 2008. O Melechete é o corpo principal sendo garimpado no passado por garimpeiros da região em *open pit* (cor verde superfície) e também em galerias.

No bloco Mamão foram selecionados vinte e três alvos, sendo que parte deles foram checados no campo onde se constatou que as rochas hospedeiras estão bem cisalhadas, com ou sem alteração hidrotermal (**Figura 4.28**). Na validação, destacaram-se prospectivamente os alvos Lagoa Seca Leste e Marcinho. Ambos os alvos foram mapeados em detalhe com amostragem de rocha.

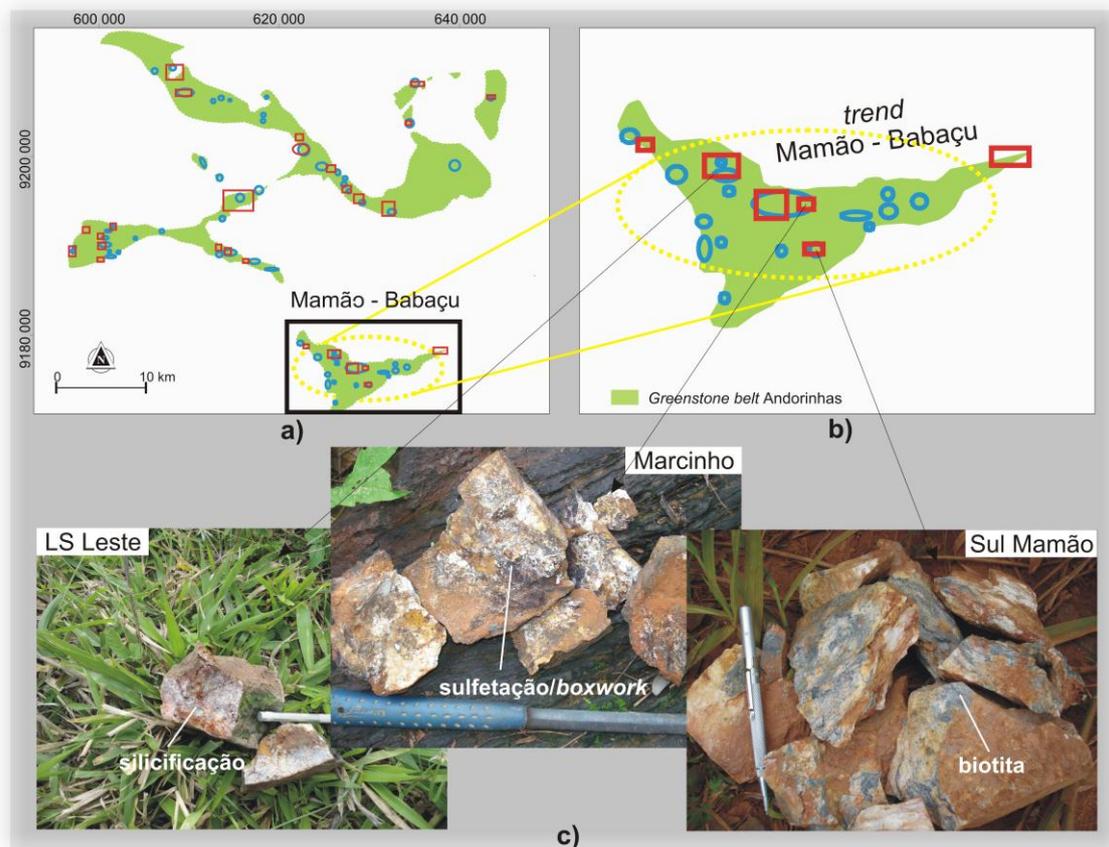


Figura 4.28 a) Localização do bloco Mamão no Greenstone Andorinhas; b) localização dos alvos selecionados no bloco, em vermelho alvos da interpretação geofísica, em azul alvos da modelagem *fuzzy* e c) fotos de amostras coletadas em campo durante mapeamento geológico mostrando rochas cisalhadas com alteração hidrotermal como biotitização, silicificação e sulfetação.

O perfil de linha de voo L12970 corta o alvo Marcinho e foi analisado conjuntamente com uma linha de amostragem geoquímica de ouro em solo com direção N-S. As amostragens da geoquímica foram realizadas a cada 40 m, enquanto as amostragens de dados magnetométricos e gamaespectrométricos equivalem, respectivamente, a aproximadamente 7.21 m e 72.10 m (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

A **figura 4.29** mostra o perfil geoquímico da amostragem de ouro em solo, de K, parâmetro F e do gradiente medido Gy. É possível verificar que o pico da anomalia de ouro, bem como a maior parte das amostras de solo anômalas, estão associadas aos baixos gradientes de direção NE-SW e médio/baixo valores do parâmetro F. O alto

potássio deve-se, provavelmente a contribuição de colúvio de filitos do topo do Grupo Babaçu aflorando ao longo da encosta da aba sul do sinclinal Andorinhas. Os altos valores da amplitude do gradiente horizontal total observados na imagem do AGHT de direção NE-SW correspondem a lentes de formação ferrífera bandada.

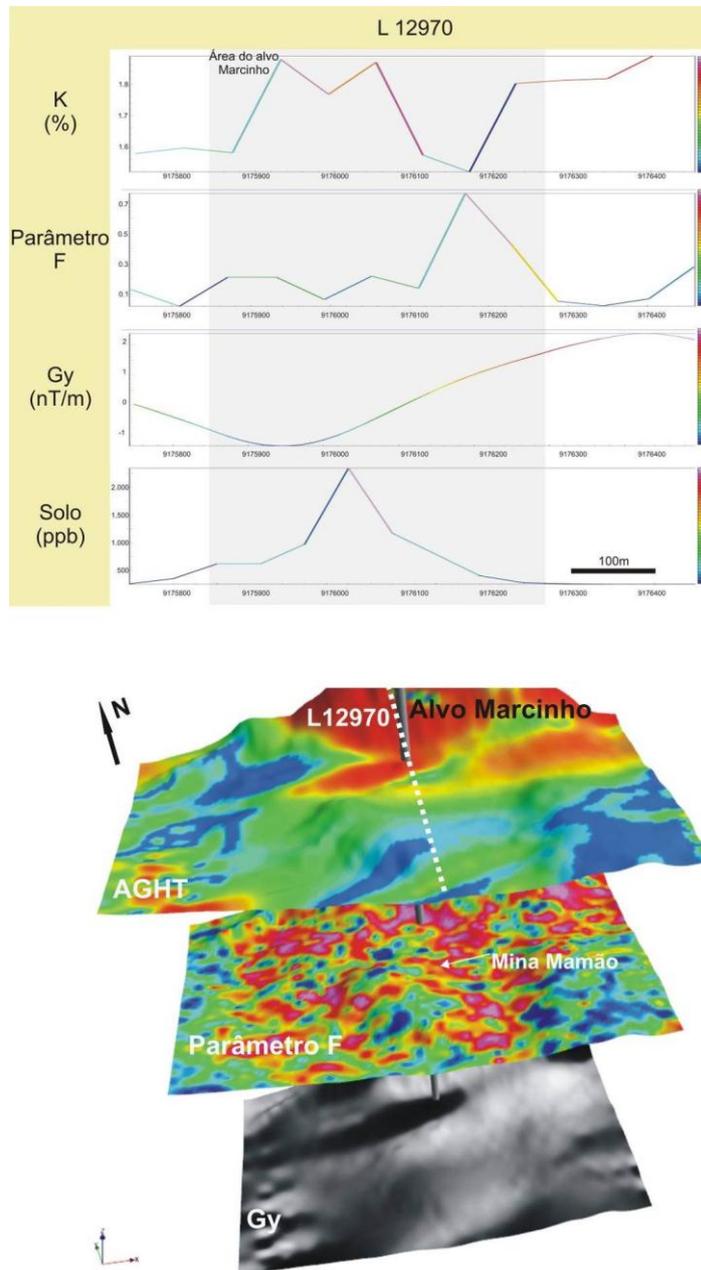


Figura 4.29 Os perfis ilustram dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gy) na linha de voo L12970 e da linha de amostragem de solo para ouro. Abaixo se destacam as imagens gamaespectrométricas e magnetométricas recortadas para a área de detalhe em 2.5D. O alvo Marcinho e a Mina do Mamão estão indicados nas imagens bem como o posicionamento da linha de voo.

4.5.3.1. Amostragem e Discussão

Um amplo programa de geoquímica de solo foi conduzido em boa parte do bloco Mamão recobrendo alguns dos alvos selecionados, principalmente os quatro alvos coincidentes gerados, bem como *infill* em alvos já conhecidos (**Figura 4.30**). O programa de solo sobre o alvo Lagoa Seca foi norteado por valores positivos de amostras de rocha. Já o *grid* de solo do alvo Marcinho foi conduzido apenas por respostas geofísicas e estruturas favoráveis usados nos modelos. A malha geoquímica é caracterizada por uma amostragem N-S a cada 40 m. A amostragem E-W foi realizada cada 200 m para reconhecimento e a cada 100 m para detalhe. Um total de 620 amostras foram coletadas, pulverizadas com 80# e analisadas para ouro somente (**Figura 4.31**).



Figura 4.30 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.

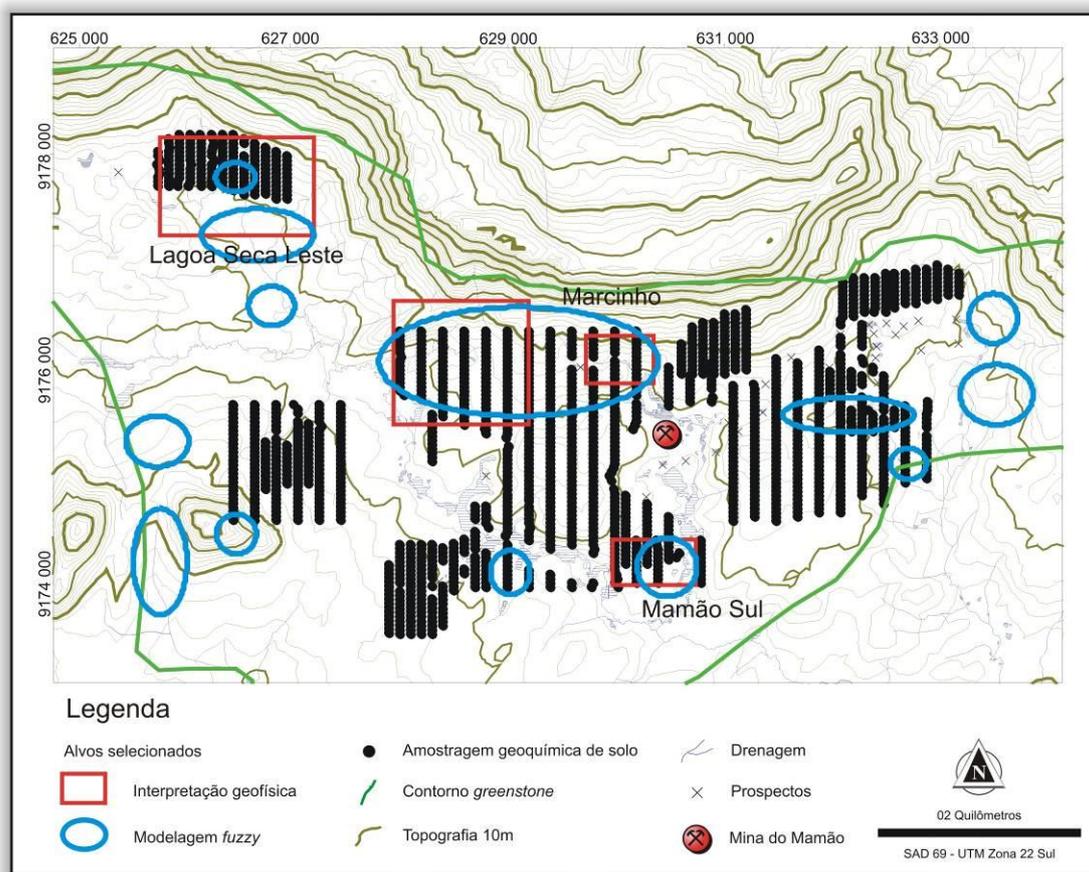
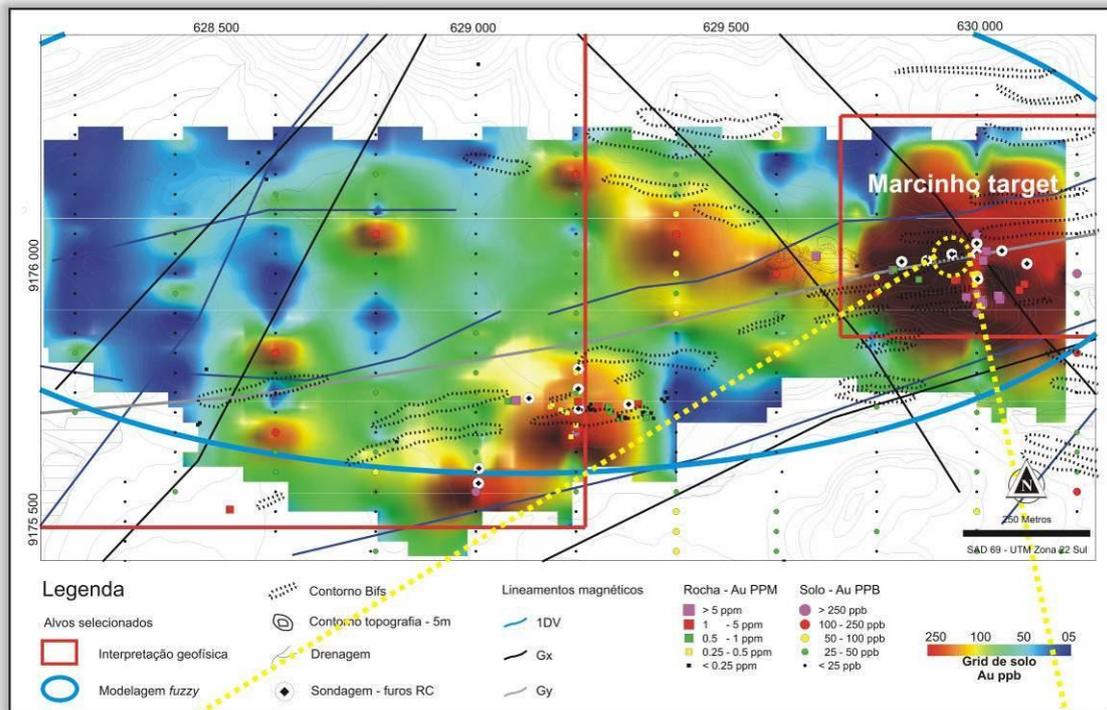


Figura 4.31 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.

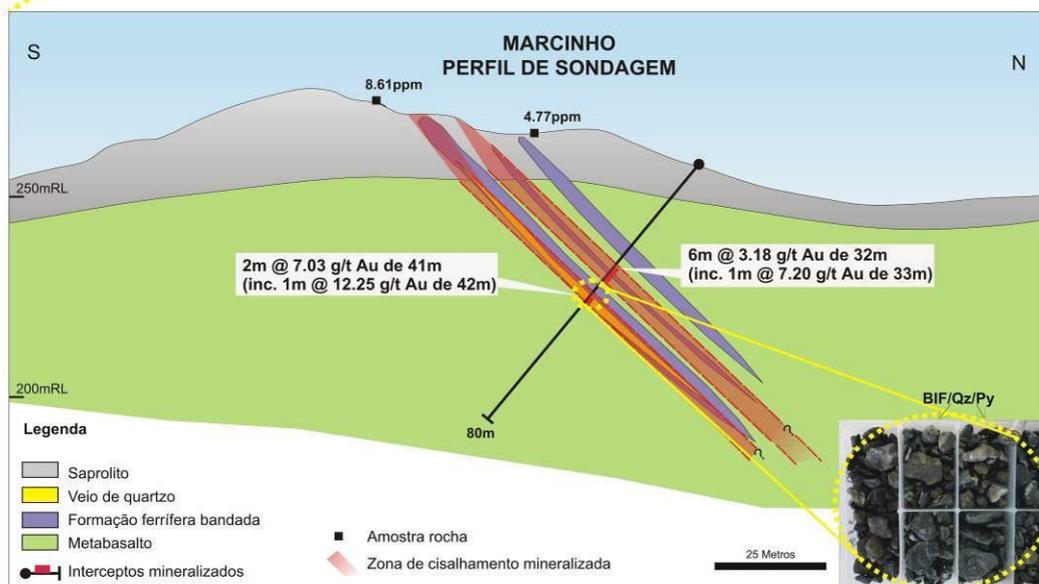
A malha geoquímica de solo confirmou *trend* anômalos em dois alvos selecionados, Lagoa Seca Leste e Marcinho. O alvo Marcinho localiza-se apenas 700 metros da mina do Mamão, sendo uma extensão de um garimpo antigo chamado Marcinho Pit ao longo de um corredor WNW. O alvo é estruturalmente controlado por estruturas NW-SE e NE-SW mapeadas claramente nas imagens dos gradientes G_x , G_y e da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo. Está encaixado em metamáficas cisalhadas e intercaladas com espessas lentes de formação ferrífera bandada. A assinatura geofísica é associada a baixo gradiente G_y /alto G_x , e anomalias de potássio observadas na imagem do parâmetro F e canal do K% (**Figura 4.29**).

Uma vez que os trabalhos de prospecção como amostragem de rocha e solo realizados no alvo Marcinho foram favoráveis, iniciou-se um programa de sondagem com Circulação Reversa (RC - Reverse Circulation). O programa consistiu de oito furos espaçados de 50 m na porção principal do *trend* anômalo e mais sete furos num outro

trend anômalo para sudoeste (**Figura 4.32a**). Até o fechamento dessa dissertação foram realizados apenas seis furos dos quinze programados, sendo os seis na anomalia principal totalizando 476.6 metros. A análise dos dados obtidos a partir da sondagem mostram que a mineralização está associada com rochas metavulcânicas máficas e lentes de formação ferrífera bastante deformadas, com alteração hidrotermal acentuada. Observa-se piritização e veio de quartzo como mostra o perfil de sondagem da **figura 4.32b**. Um modelo em 3D do corpo mineralizado é apresentado na **figura 4.33** em duas direções de visada.



a)



b)

Figura 4.32 Validação alvo Marcinho. a) Mapa ilustrando grid das amostras de solo para Au do alvo Marcinho integrados com geoquímica de ouro em rocha, interpolado com o inverso da distância ponderada, bem como a programação de sondagem sobre dois principais *trends* anômalos. b) Perfil de sondagem ao longo da linha 629950 mE. Furo de circulação reversa (RC) com 80m de profundidade interceptando duas zonas mineralizadas associadas à formação ferrífera com sulfetação e veio de quartzo com ouro.

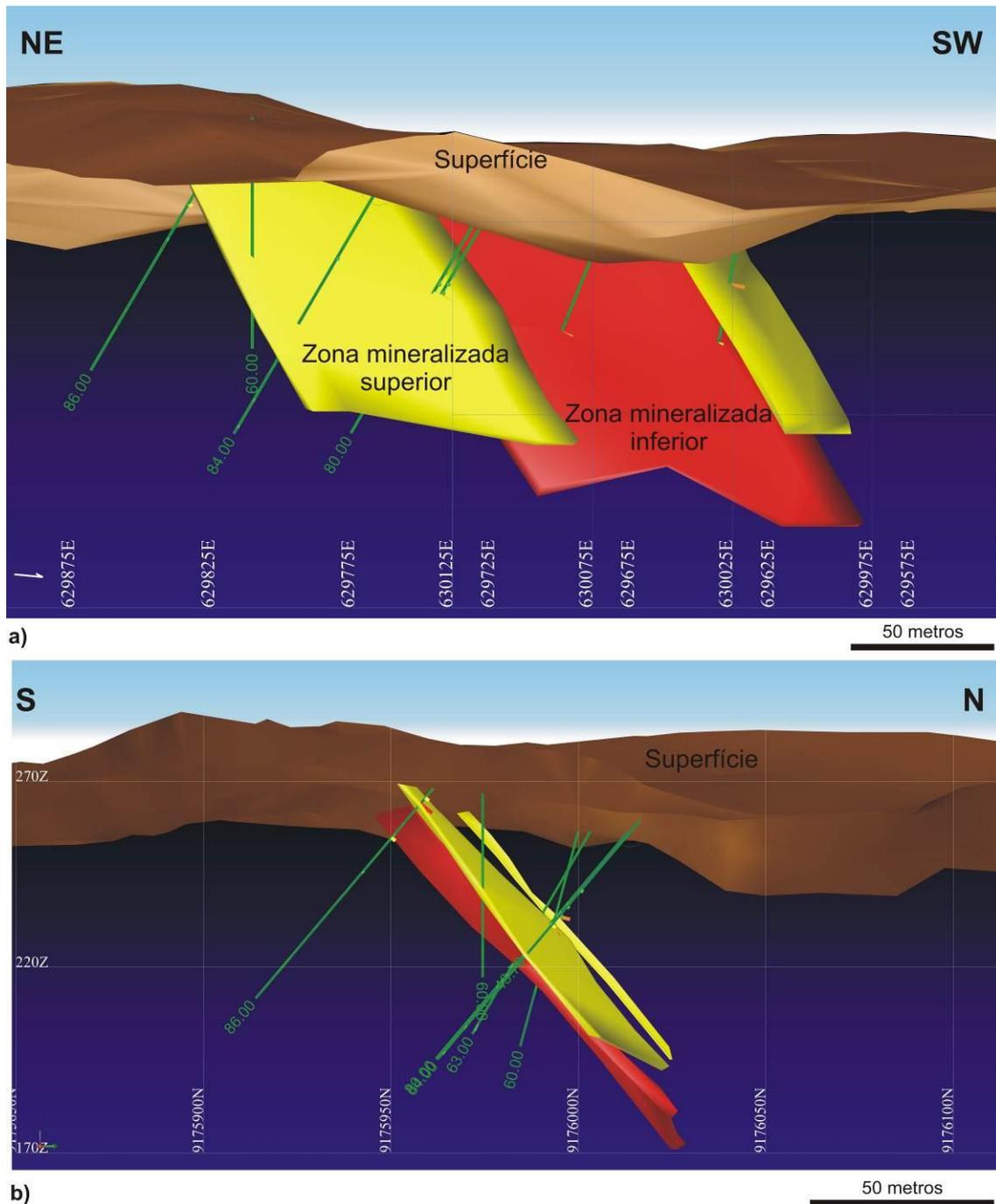


Figura 4.33 Imagem em 3D dos interceptos mineralizados do alvo Marcinho. a) visualização no sentido NE-SW, onde se observa as duas zonas mineralizadas e b) visualização de E para W, observa-se as duas zonas mineralizadas mergulhando aproximadamente 45° para norte.

4.5.2. Bloco WRM - Oeste Rio Maria

Dos oitenta e um alvos gerados no trabalho, dezessete deles se encontram nesse bloco. Na região existem diversas cavas garimpeiras sendo que as mesmas foram mineradas nos anos 80, onde milhares de garimpeiros se espalharam pela região em busca do metal. Dentre eles destacam-se os garimpos Serrinha, Bezerro, Anastácio e Manoel. Estes dois últimos ainda garimpados de forma artesanal por garimpeiros da região e os outros, esporadicamente usando um detector de metal, popularmente chamado de “piu-piu”.

Dentro desse contexto foram validados vários alvos, concentrando trabalhos em dois deles, onde se deu o nome de Resende e Serrinha Norte. Perto de ambos existem ocorrências de garimpo já conhecidas e cartografadas. No alvo Resende existem dois garimpos abandonados há aproximadamente vinte anos, e desconhecidos até a seleção da área como de alta favorabilidade. As cavas garimpeiras foram chamadas pela Troy/RML de Resende e Resende NW (**Figura 4.34a**). Já o alvo Serrinha Norte localiza-se a 4 km à oeste da cidade de Rio Maria e 400 m para norte do alvo Serrinha garimpado nos anos 80.

O alvo Resende localiza-se há aproximadamente 4.5 km a sudoeste do garimpo Manoel, ao longo do contato das rochas máficas do *greenstone* Rio Maria com os granitóides do Trondhjemito Mogno, caracterizado por quartzo-dioritos. Em uma das cavas há veios de quartzo leitoso com fraca sulfetação (pirita) de direção E-W com mergulho de 55° para norte concordante com a foliação (**Figura 4.34d**). Diversos blocos rolados de quartzo dentro da cava e nos arredores mostraram alto teor de ouro com presença de sulfetos como pirita, galena e calcopirita (**Figuras 4.34b e 4.34c**).

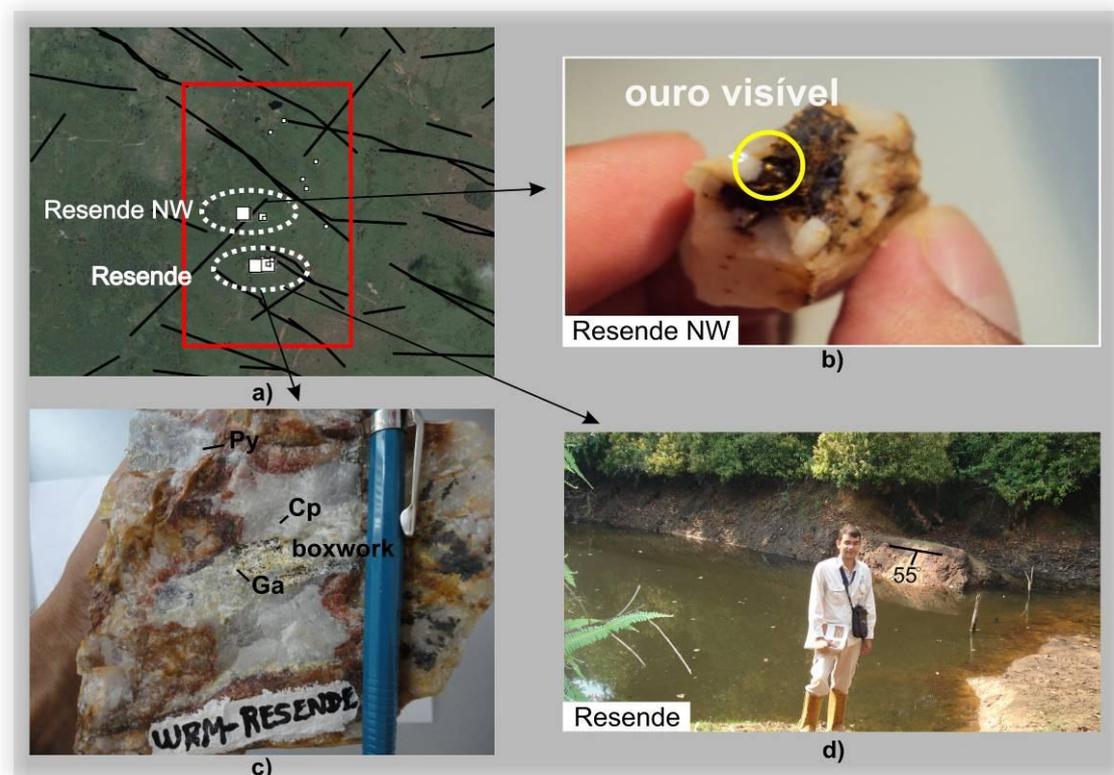


Figura 4.34 a) mapa de localização do alvo Resende mostrando as duas cavas garimpeiras descobertas neste estudo; b) bloco de quartzo com ouro visível; c) veio de quartzo com pirita (Py), calcopirita (Cp) e galena (Ga); d) Cava do alvo Resende mostrando a encaixante máfica cisalhada mergulhando 55° para norte.

4.5.3.2. Amostragem e Discussão

Após mapeamento de campo e amostragem geoquímica de ouro em rocha partiu-se para o programa de amostragem de solo (**Figura 4.35**). Uma malha geoquímica foi programada e executada sobre sete principais alvos mapeados dos dezessete gerados no bloco, tendo coincidência de 4 deles. Expressivos teores de ouro foram encontrados em amostras de rocha o que norteou o programa de solo. A malha geoquímica é caracterizada por uma amostragem N-S aproximadamente a cada 40 m. A amostragem E-W foi realizada a cada 200 m para reconhecimento e a cada 100 m para detalhe. Um total de 300 amostras foram coletadas e analisadas para ouro apenas (**Figura 4.36**).



Figura 4.35 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML no bloco Oeste Rio Maria.

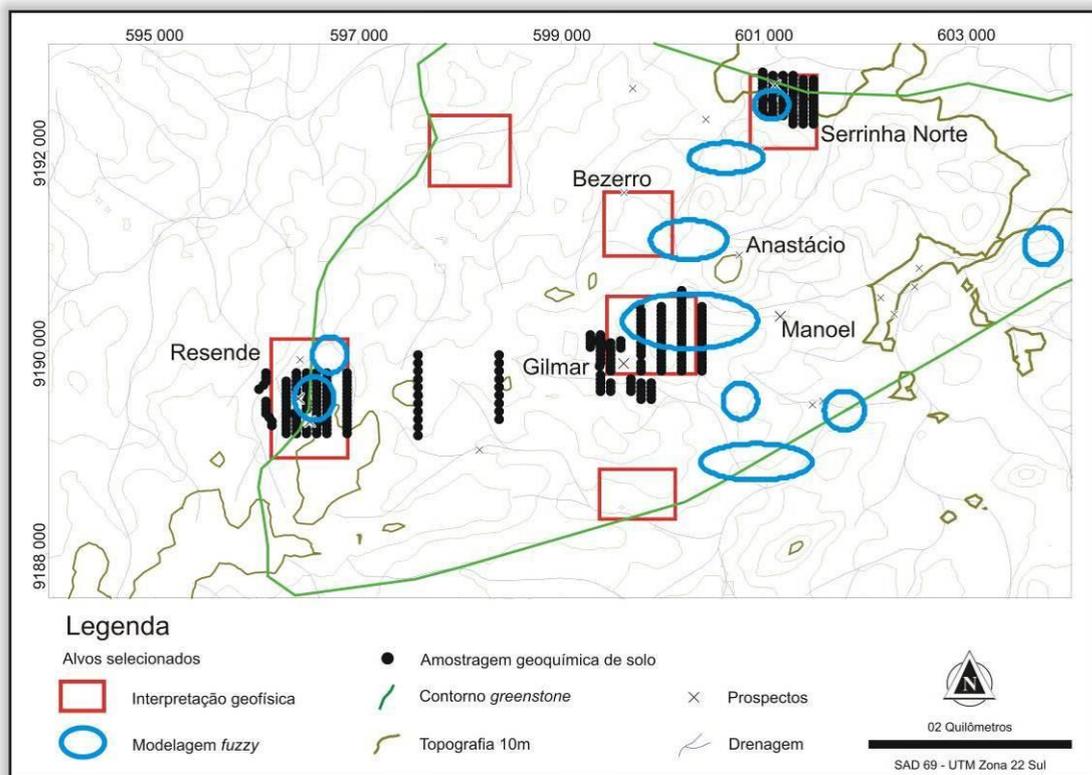


Figura 4.36 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre os principais alvos selecionados no bloco Oeste Rio Maria.

Imagens gamaespectrométricas de detalhe foram geradas usando o interpolador curvatura mínima para a região Oeste Rio Maria, a saber: K, eTh, eU. Com base na

análise dos canais gamaespectrométricos verifica-se que a região dos principais garimpos é caracterizada por valores médios de eTh, médios a altos valores de K (mas não compreende os pontos mais anômalos), e um padrão médio de eU. Analisando as figuras da razão K/eTh e da imagem do parâmetro F integradas com dados de geoquímica de ouro em rocha observa-se que várias amostras de rocha com teores acima de 1ppm são relacionadas à alto valores de potássio (**Figura 4.37**).

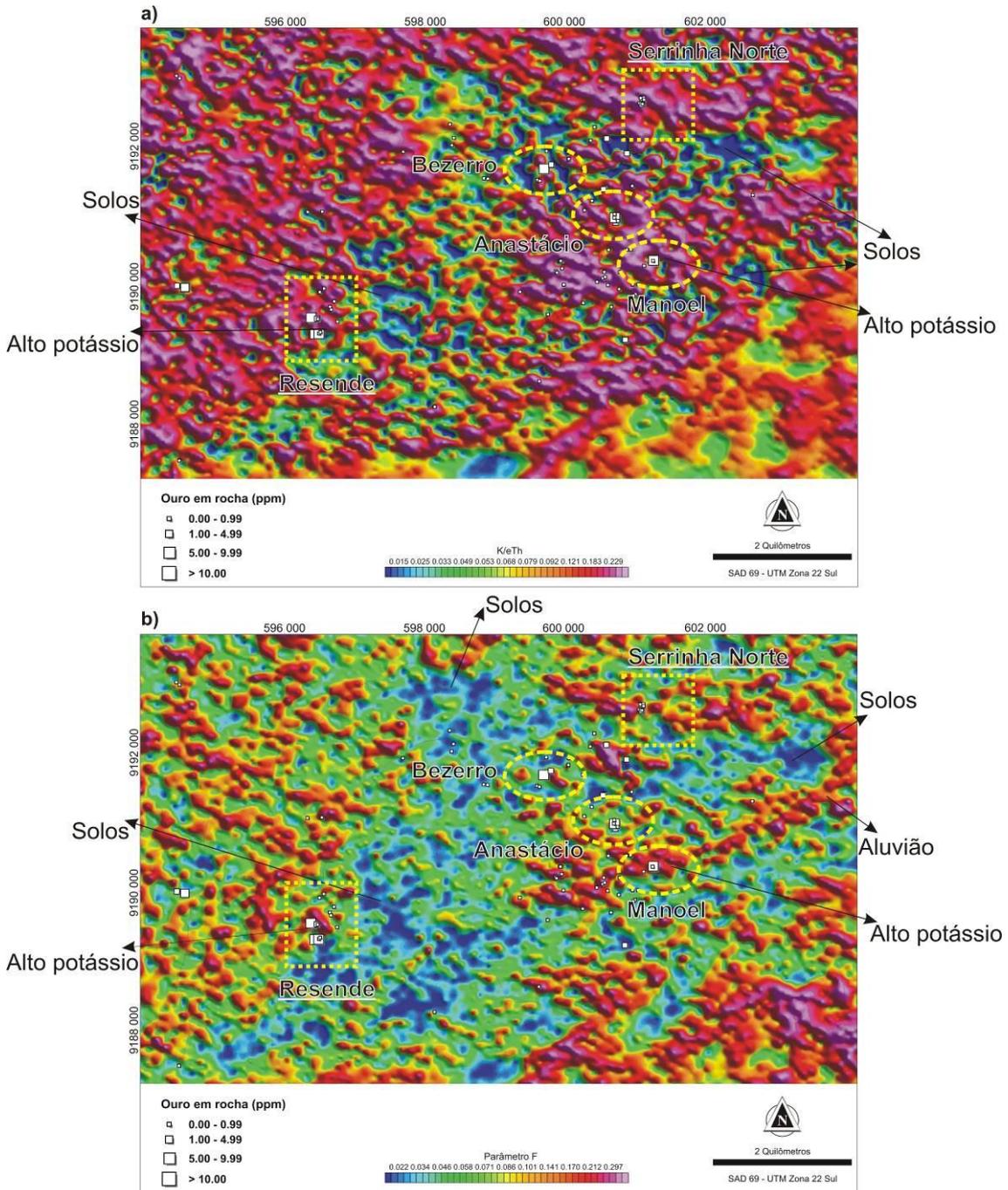


Figura 4.37 Imagens do parâmetro F (a) e da razão K/eTh (b) geradas na tentativa de realçar potassificação associada com processos hidrotermais. Dados de geoquímica de ouro em rocha estão apresentados por quadrados brancos. Amostras de rochas com altos teores de ouro, com até 70 g/t Au, validam o alvo Resende. As zonas de garimpo denominadas de Manoel, Anastácio e Bezerro também são mostradas.

Os dados gamaespectrométricos e magnetométricos foram analisados em perfis de linhas de voo, especialmente a linha L10290 que corresponde espacialmente com as amostragens N-S da geoquímica de ouro em solo (**Figura 4.38**). As amostragens da geoquímica foram realizadas entre 100 m e 40 m, enquanto as amostragens de dados aerogeofísicos equivalem, respectivamente, a 7.21 m e 72.10 m (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

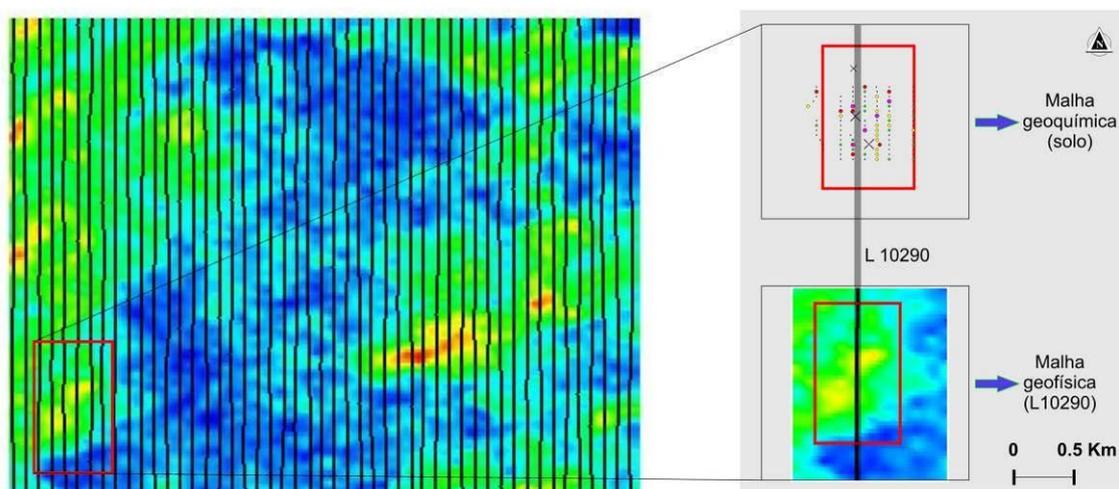


Figura 4.38 Imagem da Contagem Total com os traços das linhas de voo na região do alvo Resende. Em detalhe observa-se a linha de voo (L10290) que corta a área mineralizada e área a amostragem geoquímica (polígono em vermelho) e as linhas de amostragem geoquímica para ouro em solo.

A **figura 4.39** mostra os perfis do potássio anômalo (Kd), parâmetro F e do gradiente medido Gx, onde verifica-se de forma clara que o alvo Resende está associado a altos valores do parâmetro F, Kd e baixo gradiente medido Gx.

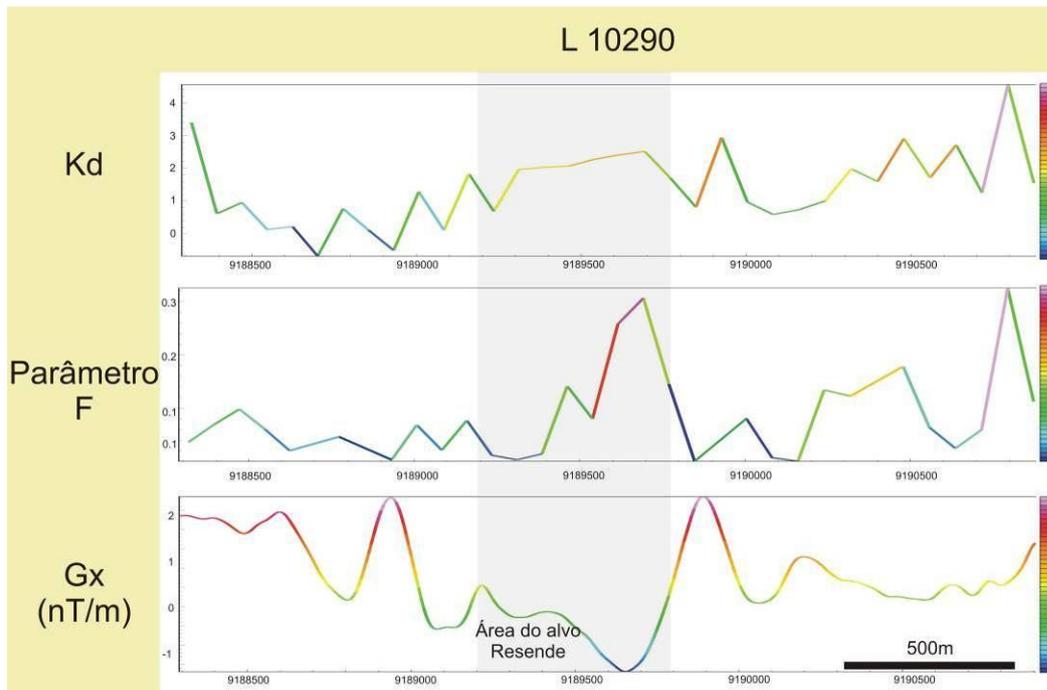


Figura 4.39 Dados gamaespectrométricos (Kd e parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gx) relacionados à linha de voo L10290. Destaque para a área do alvo Resende em cor cinza claro.

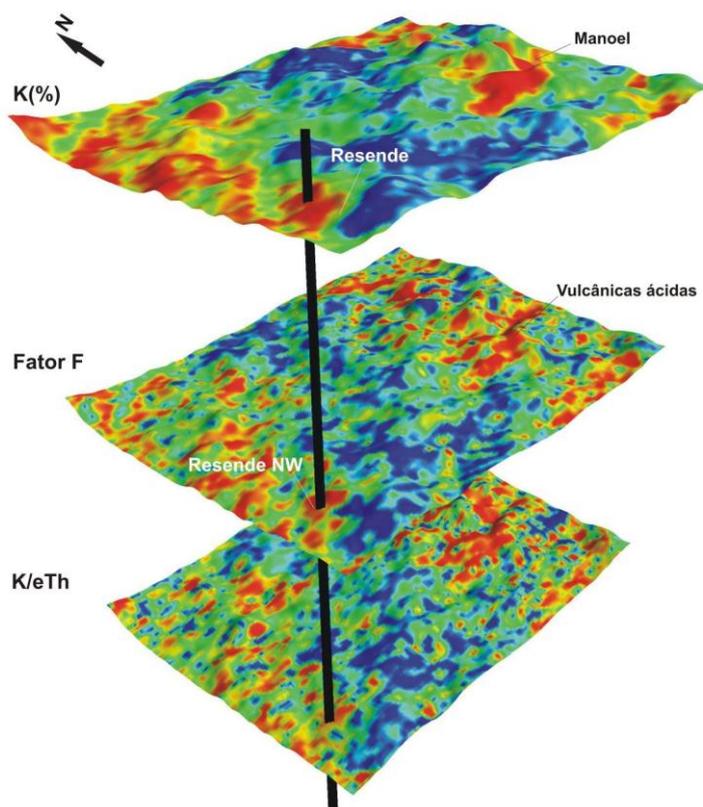


Figura 4.40 Imagem em 2,5D de dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F e razão K/eTh). Notar o alvo Resende NW e o alvo Resende ao lado.

Diferente do garimpo Resende NW, onde a concentração de potássio é alta, no alvo Resende, cerca de 100m para sul do Resende NW, a concentração de potássio é praticamente nula (**Figura 4.40**). Esse efeito, provavelmente, se deve a lixiviação uma vez que são mapeadas silicificações nos garimpos da região. Segundo Gunn *et al.* (1997), o elemento K é pouco resistente ao intemperismo, sendo assim o mesmo pode ser inteiramente lixiviado nas regiões de climas tropicais a subtropicais, razão pela qual as medidas gamaespectrométricas nessas regiões, em solos bem desenvolvidos e aluviões, podem registrar valores próximos de zero ou até zero.

4.5.3. Bloco Malvinas (Votuporanga)

O bloco Votuporanga localiza-se na porção centro-norte da área de estudo, sendo inserida na porção central do *greenstone* Identidade, distando cerca de 24 quilômetros da cidade de Rio Maria. Na área encontra-se o garimpo Pampeana

associado a veios de quartzo, bem como vários pequenos garimpos de aluvião e em paleoaluviões.

A área do bloco Votuporanga foi alvo de pesquisa em 1995 pela empresa Canyon Mineração do Brasil LTDA, onde os trabalhos exploratórios foram efetuados através de amostragem de solo e contagem de pintas de ouro em concentrados de bateia.

Em 2006, a empresa Horizonte Minerals fez mapeamento de detalhe e um programa de amostragem de solo com 400 metros de espaçamento entre linhas. Nesse contexto foram identificados zonas de cisalhamento ESE-WNW com forte alteração hidrotermal e veios de quartzo encaixados próximos ou nas zonas de contato entre metamáficas e intrusivas ácidas como quartzo pórfiro. Dentro do halo de alteração hidrotermal pode-se observar sulfetação com predomínio de pirita. A foliação regional é aproximadamente N70°W mergulhando entre 45°-65° para sul. As encaixantes geralmente são silicificadas com piritas disseminadas e *boxwork*. Em algumas amostras de veio de quartzo há ouro livre de granulação fina (**Figura 4.41**).

Regionalmente a área é afetada por estruturas de primeira ordem com direção NW-SE e estruturas menos relevantes NE-SW. Ambas as direções são cortadas por estruturas rúpteis tardias N-S. A região está inclusa no domínio de rochas vulcânicas do topo do grupo Babaçu, compostas por metapelitos e intrusões félsicas arqueanas (**Figura 4.10**).

4.5.3.3. Amostragem e Discussão

Após o mapeamento de campo e amostragem de rocha partiu-se para o programa de amostragem de solo (**Figura 4.42**). Uma malha geoquímica foi programada e executada sobre apenas dois alvos dos doze gerados no bloco, pois existem dados de ouro em solo disponíveis e efetuados pela RML/Troy e Horizonte Minerals. Essa nova malha geoquímica de solo foi gerada sobre 2 alvos coincidentes. Teores de ouro expressivos com até 19 g/t Au foram encontrados em amostras de rocha e norteou o programa de amostragem de solo através do adensamento (*infill*) de uma antiga malha aberta com 400 m de espaçamento. A malha geoquímica segue o padrão já apresentado com uma amostragem N-S aproximadamente a cada 40 m na linha e amostragem E-W a

cada 100 m (**Figura 4.42**). Um total de 200 amostras foram coletadas e analisadas para ouro apenas como mostra as linhas em vermelho da **figura 4.43**.

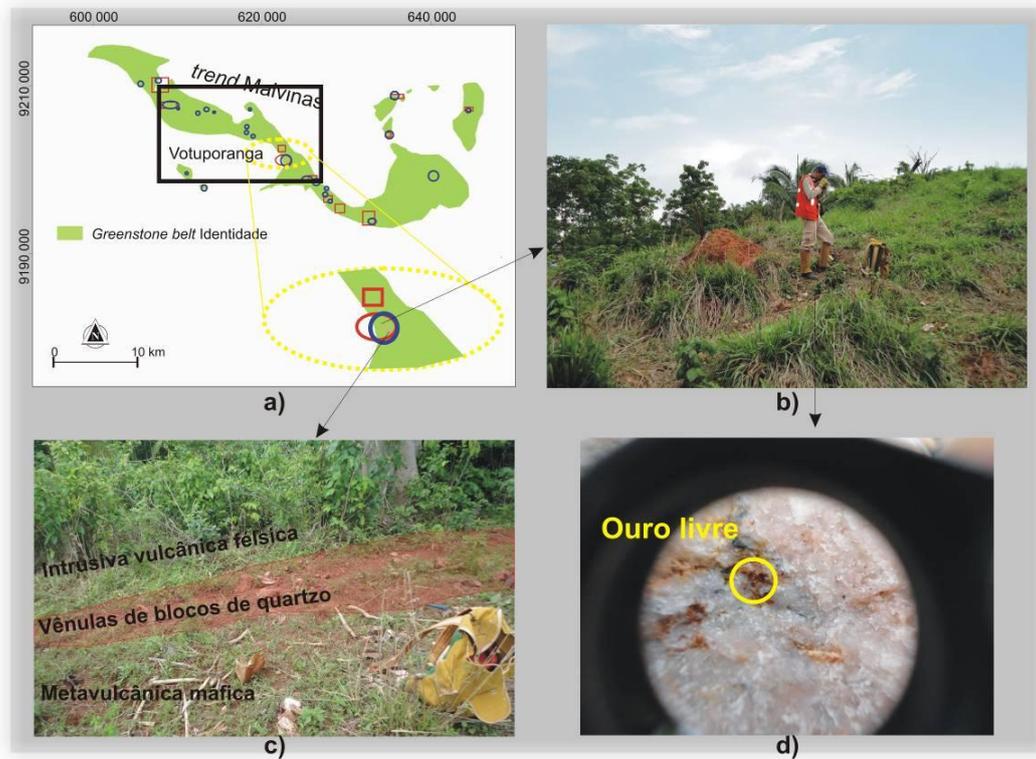


Figura 4.41 a) Localização do bloco Malvinas; b) Detalhe do alvo Votuporanga em dia de mapeamento geológico; c) Contato de vulcânicas máficas e ácidas associados a finas lentes de veio de quartzo mineralizados; d) Detalhe de um veio de quartzo com ouro livre, *boxwork* e sulfetos.



Figura 4.42 Amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML, sobre o bloco Malvinas, alvo Votuporanga.

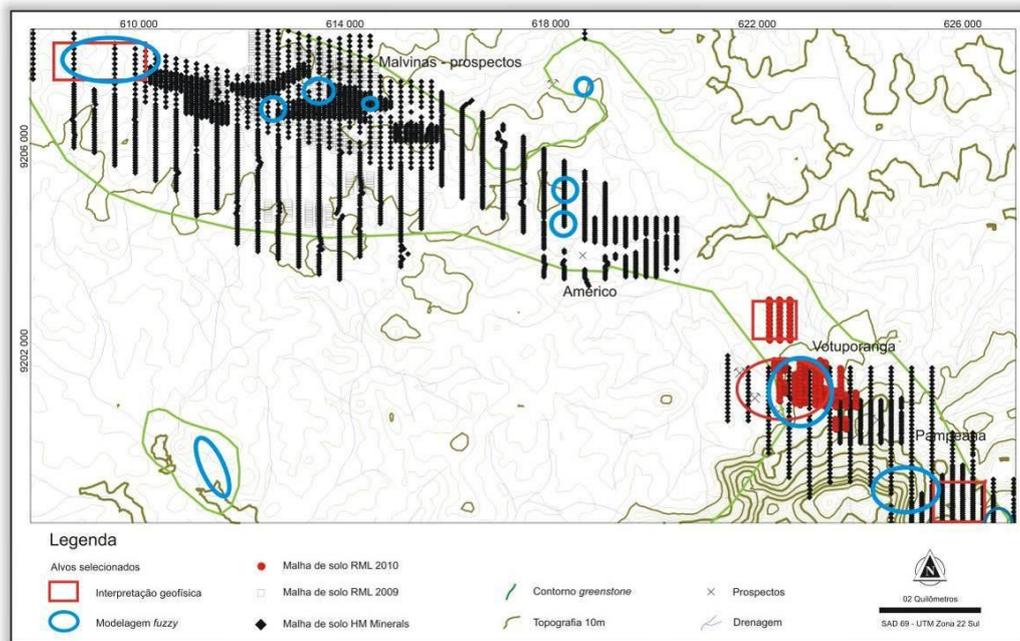


Figura 4.43 Malha de amostragem geoquímica de ouro em solo sobre dois dos doze alvos seleccionados no bloco Malvinas (Votuporanga).

A malha geoquímica de solo, do alvo Votuporanga, confirmou *trend* anômalos ($> 100\text{ppb}$) com direção E-W e amostras de rocha (teores acima de 5 g/t Au) confirmaram um *trend* NW com 500 metros de comprimento ao longo do contato vulcânica félsica/máfica. No centro do alvo, dentro do círculo azul, foi mapeado e amostrado blocos de veio de quartzo com ouro visível (**Figura 4.44**). Em breve, uma programação de sondagem será proposta para essa área.

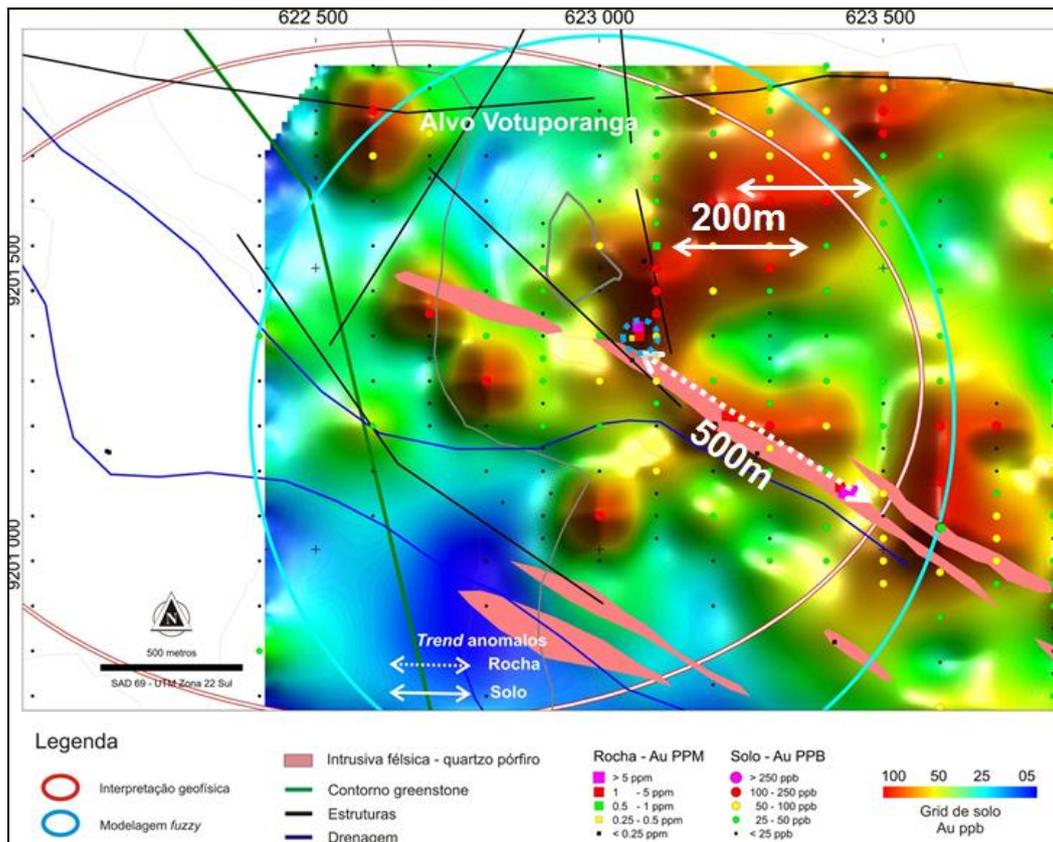


Figura 4.44 Detalhe da amostragem geoquímica de ouro em solo no alvo Votuporanga. Observa-se extensas áreas com teores anômalos maiores que 100ppb e amostras de rochas com ouro visível no centro da área em círculo azul.

CAPÍTULO 4. MODELAGEM ESPACIAL UTILIZANDO LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO NO TERRENO GRANITO-GREENSTONE RIO MARIA, SUDESTE DO PARÁ

4. APRESENTAÇÃO

A exploração mineral envolve várias etapas de aquisição, análise e integração de dados oriundos de várias fontes. Um dos grandes desafios de hoje para a prospecção é como integrar e analisar de forma significativa a quantidade enorme de dados coletados durante os programas de exploração em *greenfield* e *brownfield* (Robert *et al.* 2007). A integração digital de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, de sensoriamento remoto e de outras informações georreferenciadas voltadas à prospecção mineral, atualmente é realizada através de *software* e *hardware* específicos, aproveitando o grande avanço das geotecnologias presenciado nas duas últimas décadas. Assim, os sistemas de informações geográficas (SIG) e sistemas especialistas (SE) surgem como um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação georreferenciada, as quais permitem o gerenciamento de dados espaciais com realização de análises complexas, facilitando a tomada de decisões em exploração mineral (Bonham-Carter 1994, Silva 1999, Nykänen *et al.* 2008).

No presente estudo buscou-se aplicar técnica de modelagem espacial nos dados geológicos, geoquímicos e geofísicos visando a seleção de áreas potenciais para exploração aurífera na região da Província Rio Maria – PA, nos domínios das áreas de concessão da Troy/Reinarda Mineração Ltda como exemplifica a **figura 1.1** do Capítulo 1.

4.1. MÉTODOS DE ANÁLISE

Existem basicamente dois tipos de modelos utilizados para o mapeamento do potencial mineral: modelos guiados pelos dados (*data-driven*) (e.g. Pesos de Evidência, Regressão Logística e Redes Neurais Artificiais) e modelos guiados pelo conhecimento (*knowledge-driven*) (e.g. Lógica Boleana, Lógica *Fuzzy*, *Index Overlay*) (Bonham-Carter 1994). Em uma modelagem dirigida pelos dados, a associação espacial entre ocorrências minerais conhecidas (áreas teste) e o conjunto de dados estudados (geofísicos, geoquímicos, etc) é definida computacionalmente e determina pesos

associados ao grau de favorabilidade de cada um destes conjuntos. Já os métodos guiados pelo conhecimento não requerem uma área teste, mas necessitam de conhecimento geológico da área estudada e do modelo descritivo do depósito, já que utiliza pesos subjetivos determinados por um *expert* (Bonham-Carter 1994).

No presente trabalho, será explorado o método de análise espacial conhecido como lógica fuzzy (Carranza & Hale 1997, Cheng & Agterberg 1999, Quadros *et al.* 2006, Lee 2007) através de combinações usando operadores ou controladores nebulosos com enfoque na produção de mapas de favorabilidade para depósitos de ouro nos *greenstones* da área de estudo.

4.2. MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS DO TIPO LODE HOSPEDADO EM GREENSTONE BELT

Para realizar a análise espacial do tipo *knowledge-driven* é necessária a definição de um modelo descritivo de depósitos auríferos, principal metal de interesse nesse estudo. Segundo Oliveira (1987), Huhn (1992), Souza (1994), Santos (1995) e Souza (1999), os metalotectos de ouro encontrados no Terreno Granito-*greenstone* Rio Maria estão associados a pequenos depósitos de ouro do tipo *lode* (Mamão, Babaçu, Malvinas, Lagoa Seca, Diadema, Serrinha, Seringa, dentre outros).

Globalmente os depósitos de ouro mais abundantes ocorrem em terrenos granito-*greenstone* arqueanos, em terrenos vulcano-sedimentares ou em margens de placas convergentes (Goldfarb *et al.* 2001). Segundo Groves *et al.* (1998) esta classe de depósitos de ouro, previamente chamadas de mesothermal, mas recentemente renomeadas para depósitos de ouro orogênicos, são relacionadas à fase final de terrenos acrescionais em ambientes de subducção. O termo orogênico foi originalmente introduzido por Groves *et al.* (1998) em reconhecimento ao fato que depósitos de ouro em veios de quartzo-carbonato em ambiente *greenstone*, incluindo os associados à formação ferrífera, tem características semelhantes e foram formados por processos similares. Tipos de depósitos orogênicos incluem os hospedados em turbiditos, em *greenstone belt* e os hospedados em formação ferrífera bandada, como destaca a **figura 4.1**.

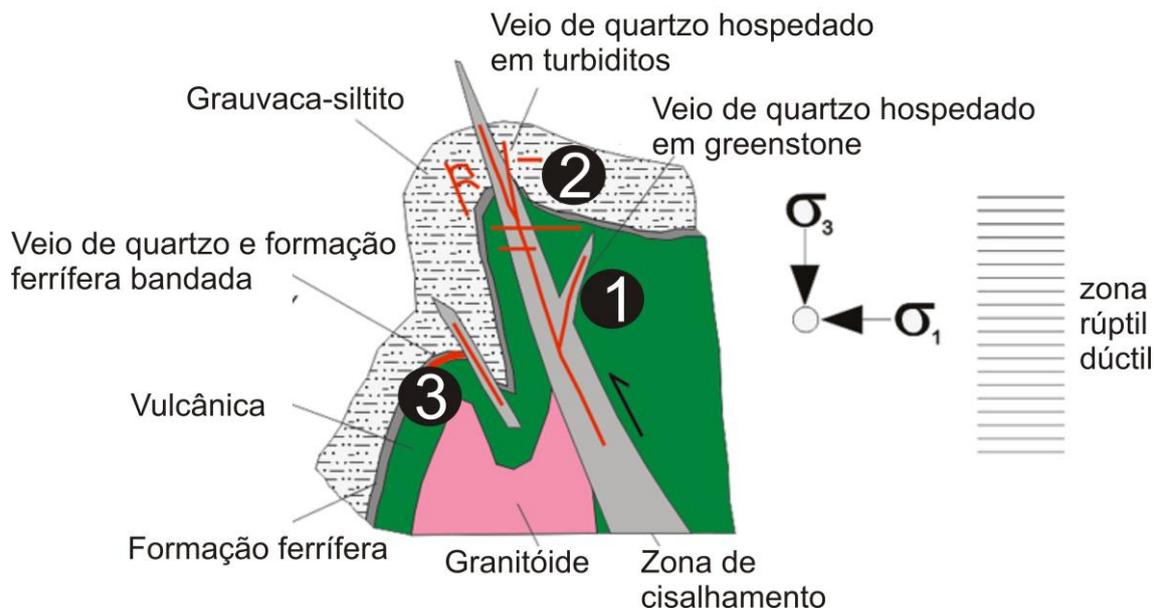


Figura 4.1 Diagrama esquemático, proposto por Poulsen *et al.* (2000), ilustrando os tipos de depósitos orogênicos. A figura também mostra os três tipos de depósitos encontrados na área de estudo: (1) depósito do tipo *lode* hospedado em *greenstone*, na área de trabalho representado pelos depósitos do trend Mamão/Babaçu, (2) depósito hospedado em turbiditos como o caso do depósito de Lagoa Seca, (3) depósitos associados à formação ferrífera bandada como o alvo Marcinho.

Em escala local, as características favoráveis para este tipo de depósito representam uma combinação de fatores estruturais e litológicos (Groves *et al.* 1990; Robert 2004). Segundo o modelo proposto por Hodgson (1993), os depósitos auríferos do tipo *lode* mesotermal caracterizam-se por constituírem depósitos exclusivamente de ouro, relacionados a veios de quartzo, sistemas de vênulas ou zonas de mineralização disseminada encaixadas em rochas carbonatadas. Os veios de quartzo carbono nesses depósitos, normalmente, combinam veios laminados de mergulho moderado em zonas de cisalhamento reversas com veios hospedados em sítios extensionais, de baixo mergulho, adjacentes às rochas competentes. O caráter reverso da zona de cisalhamento com veios hospedados e o baixo mergulho dos veios extensionais atestam a sua formação durante o encurtamento crustal (Sibson *et al.* 1988; Robert & Poulsen 2001).

Ainda, segundo Hodgson (1993), a maior parte das zonas mineralizadas estão associadas a estruturas, tais como falhas de grande escala, zonas de cisalhamento dúcteis ou fraturas rúpteis de alto ângulo. Frequentemente, as estruturas que hospedam as mineralizações estão associadas a contatos entre domínios litológicos contrastantes,

marcados por rochas deformadas ou indicadas indiretamente por uma variedade de feições tais como discordâncias estruturais, zonas de alteração hidrotermal ricas em carbonatos, sulfetos, quartzo dentre outros.

A razão pela qual os depósitos de ouro do tipo *lode* se relacionam a grandes falhas reside no fato destas agirem como eficientes condutos de fluidos hidrotermais (**Tabela 4.1**). As mineralizações, em geral, concentram-se ao longo dessas estruturas em campos específicos, localizados em *jogs* ou nas confluências das dilatações principais, – favorável à dilatação, à circulação dos fluidos e à precipitação do minério, e onde ocorrem depósitos tipicamente associados a estruturas de segunda ordem (Goldfarb *et al.* 2005; Robert *et al.* 2005).

Tabela 4-1 Principais características dos ambientes de formação de depósitos de ouro do tipo orogênico (Robert *et. al* 2005).

	Tipo de depósito	Principais características dos ambientes de formação do minério		Zonas de alterações do depósito (por proximidade)	Exemplos	Referências
		Escala regional	Escala local			
Orogênico	Hospedados em <i>greenstone belt</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>greenstone belts</i> predominantemente vulcânico ou sedimentar - zonas de cisalhamento em escala crustal - rochas conglomeráticas 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de cisalhamento, deformadas e interseções de estruturas relacionadas ao cisalhamento - heterogeneidade reológica - litologias ricas em Fe - intrusões porfíricas félsicas 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de alteração carbonática, com sericita-pirita proximal - concentrações de veios auríferos ou zonas de sulfetos disseminados - Au>Ag, As, W 	<ul style="list-style-type: none"> Dome, Norseman, Mt. Charlotte, Sigma Lamaque 	<ul style="list-style-type: none"> Groves <i>et al.</i> (2003) Goldfarb <i>et al.</i> (2005) Robert <i>et al.</i> (2005) Dubé e Gosselin (2006)
	Hospedados em turbiditos	<ul style="list-style-type: none"> - sequências turbidíticas dobradas - intrusões graníticas - falhas crustais - fácies xisto verde 	<ul style="list-style-type: none"> - anticlinais - falhas reversas de alto ângulo - estruturas cruzadas 	<ul style="list-style-type: none"> - alteração Fe-Mg-Cb - concentrações de ouro em veio de quartzo - Au>Ag, As 	<ul style="list-style-type: none"> Bendigo Stawell, Juneau 	<ul style="list-style-type: none"> Hodgson (1993) Bierlein <i>et al.</i> (1998) Goldfarb <i>et al.</i> (2005)
	Hospedados em formação ferrífera bandada	<ul style="list-style-type: none"> - <i>greenstone belts</i> predominantemente vulcânico ou sedimentar com espessos pacotes de formação ferrífera - dobrado e metamorfoisado 	<ul style="list-style-type: none"> - zonas de dobras - falhas ou zonas de cisalhamento intersectando formações ferríferas - alguns controles estratiformes 	<ul style="list-style-type: none"> - sulfetação da formação ferrífera - alteração clorita-carbonato ou anfíbólio - Au>Ag, As 	<ul style="list-style-type: none"> Homestake, Lupin, Cuiabá, Hill 50 	<ul style="list-style-type: none"> Caddy <i>et al.</i> (1991) Kerswill (1996) Goldfarb <i>et al.</i> (2005)

A maioria dos depósitos conhecidos de ouro do tipo *lode* situa-se em cinturões caracterizados pela conjunção de assembléias litológicas que incluem: rochas ricas em Fe como os basaltos toleiticos, *sill* de doleritos diferenciados e BIFs, *stocks* de pórfiro de composição intermediária a ácida quer seja intrudindo rochas vulcânicas ultramáficas ou rochas sedimentares clásticas.

Segundo Huhn (1992) e Souza (1994) a maioria dos depósitos do tipo *lode* que ocorrem na área de estudo estão associados a veios de quartzo encaixados na base do *greensonte belt*, em rochas metavulcânicas básicas e intermediárias que sofreram carbonatização e sulfetação (**Tabela 4.2**). O depósito de Lagoa Seca é o único depósito de ouro do tipo *lode* conhecido na região situado na seqüência metassedimentar de topo do *greenstone belt* Andorinhas, onde não se associa a veios de quartzo, mostrando sua natureza singular em relação aos depósitos auríferos arqueanos do tipo *lode* associados aos *greenstone belts* da região (Souza 1999). Os principais controles estruturais do minério são as estruturas secundárias de zonas de cisalhamento transcorrentes, com posterior movimentação reversa (Huhn 1992). Estudos realizados pela equipe da Reinarda/Troy, bem como pelo mapeamento de campo desse estudo, demonstram que a mineralização está concentrada em zonas de dilatação com direção preferencial E-W, funcionando como sítios de deposição de veios mineralizados, dentro de corredores de cisalhamento NW ou NE.

Tabela 4-2 Principais características dos depósitos e ocorrências auríferas do tipo *lode* arqueano e *stock* calci-alcalino do Terreno granito-*greenstone* Rio Maria, adaptado de Huhn (1992) e Santos (1995).

Depósito	Geologia	Tipologia	Alt. hidrotermal	Controle estrutural
Mamão/ Babaçu	Metavulcânicas máficas (Metabasaltos do Grupo Babaçu)	Veios de quartzo associados à zona de cisalhamento E-W	Cloritização, Carbonatação, Potassificação, Silicificação, Sulfetação	Estruturas de segunda ordem associadas as zonas de cisalhamento, no domínio transtensional
Serrinha	Metavulcânicas máficas (Metabasaltos do Grupo Babaçu)	Veios de quartzo associados à zona de cisalhamento N70E/60NW	Carbonatação, Albitização, Sericitização, Piritização	Zona de cisalhamento de direção N70E/60NW, dobras assimétricas reclinadas de eixo subhorizontal
Tatu-Frango	Metabasaltos cortados por quartzo pórfiros do Grupo Babaçu	Veios de quartzo associado a zona de cisalhamento E-W na interface rochas ácidas /máficas	Cloritização, Carbonatação, Sericitização, Albitização, Silicificação, Turmalinização	Zona de cisalhamento dúctil anastomosada de alto ângulo
Sequeiro1	Contato entre metabasalto (Grupo Babaçu) e o Trondjemito Mogno	Veios de quartzo em zona de cisalhamento	Carbonatação, e Silicificação,	Zona de cisalhamento de direção N70E/60NW
Peladinha	Contato entre os metassedimentos do Grupo Rio Fresco com o Granodiorito Rio Maria	Veios de quartzo em zona de cisalhamento ao longo de conglomerados alterados hidrotermalmente	Sericitização e silicificação	Clivagem extensional e lineação de estiramento em zona de cisalhamento
Cumaru	Contato do granito Cumaru com o <i>Greenstone belt</i> de Gradaús	Veios de quartzo associados ao granito Cumaru	Fílica, Propilítica e Potássica	Falhas e fraturas secundárias a zona de cisalhamento dextral da Serra do Puim

4.3. OCORRÊNCIAS E DEPÓSITOS DA ÁREA DE ESTUDO

Todas as condicionantes apontadas por diversos pesquisadores, destacadas acima, ocorrem na área de estudo, sendo cinco prospectos associados à metassedimentos, trinta e quatro associados à intrusivas vulcânicas félsicas e trinta e cinco associadas à zonas de cisalhamento em vulcânicas máficas como mostra o diagrama abaixo (Figura 4.2, Figura 4.3).



Figura 4.2 Diagrama mostrando as rochas hospedeiras da mineralização aurífera do *greenstone belt* Andorinhas, Identidade e Rio Maria. A figura ilustra os valores das respectivas porcentagens ressaltando a importância das ocorrências minerais associadas à metavulcânicas máficas, metavulcânicas félsicas e metassedimentos em termos de quantidade de depósitos individuais.

Para efetuar uma análise espacial do tipo *knowledge-driven* é necessária a definição de um modelo descritivo de depósitos de ouro. Diversos modelos podem ser encontrados na literatura, como os propostos por Groves & Barley (1994). A pesquisa foi realizada em detalhe sobre três blocos que serão descritos a seguir. A figura abaixo (Figura 4.3) e as tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 salientam algumas informações dos tipos de ocorrências e depósitos encontrados nos três blocos detalhados da área de estudo.

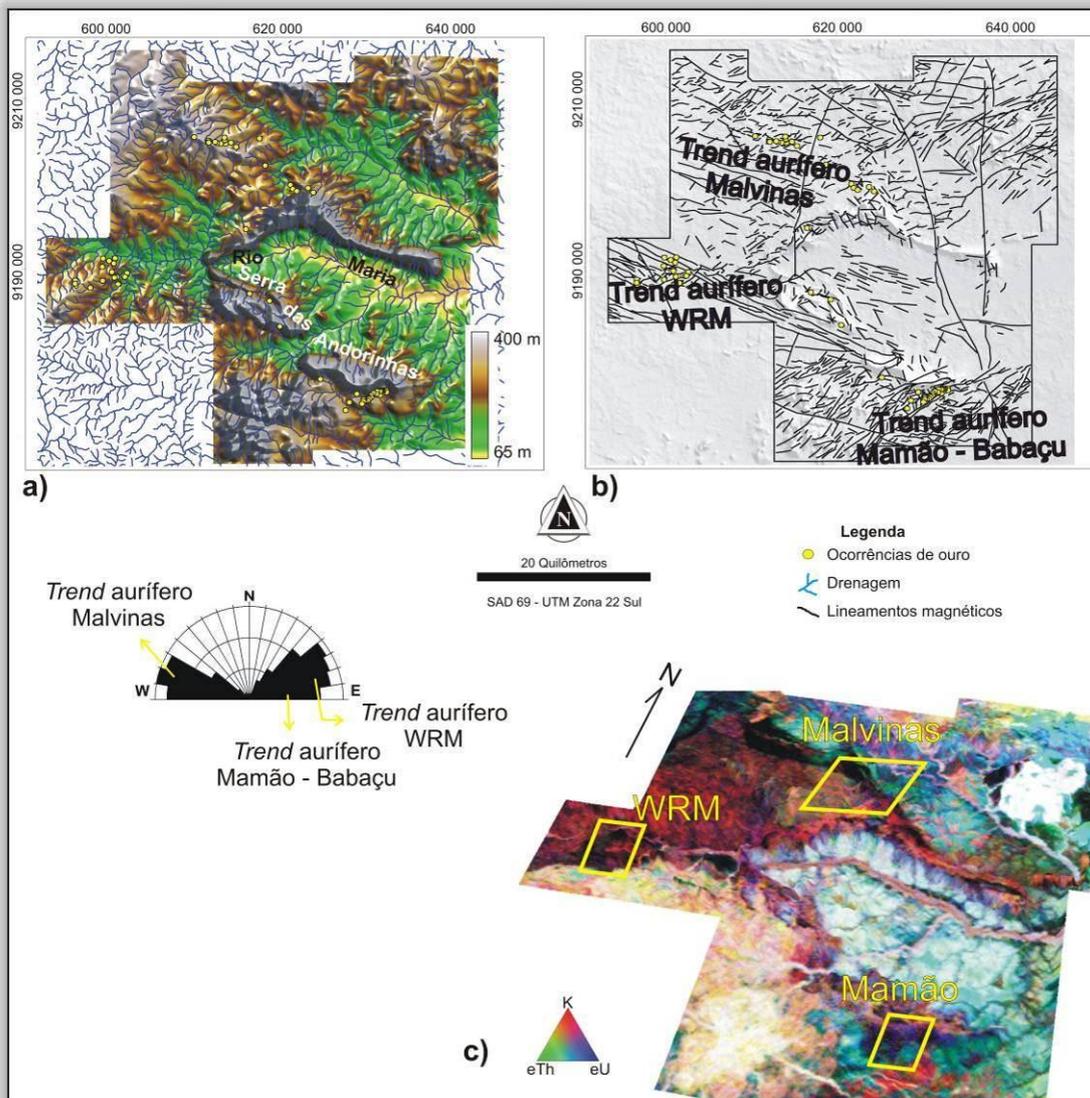


Figura 4.3 Localização da área de estudo onde se observa: a) a rede de drenagem e ocorrências sobrepostas ao modelo digital do terreno da área estudada; b) principais lineamentos magnéticos ressaltando os *trends* auríferos Mamão/Babaçu na direção predominante ENE, WRM (Oeste Rio Maria) na direção predominante ENE-WSW e o *trend* Malvinas (Votuporanga) com direção predominante WNW. Lineamentos sobrepostos à imagem SRTM (DEM); c) disposição dos três blocos pesquisados em detalhe, indicados pelos polígonos em amarelo a partir da imagem ternária (RGB).

A primeira área detalhada nesse estudo é o bloco Mamão. A região abrange o *trend* Mamão/Babaçu e é caracterizada por mineralizações de ouro em veios de quartzo situados em estruturas de segunda ordem relacionados aos lineamentos regionais (Huhn 1992). O *trend* consiste num corredor de cisalhamento NE-SW, classificadas no presente estudo como estruturas de primeira ordem, com diversos depósitos do tipo *lode*

com veios de quartzo alojados em zonas de dilatação secundárias com direção E-W, chamadas aqui de estruturas de segunda ordem. Dentre esses depósitos se destacam, Coruja NE, Luiza, Piauí, Cava T, Cava 5 e Jatobá.

A mina do Mamão, bem como os depósitos do trend Mamão/Babaçu, é do tipo *lode gold* em zona de cisalhamento com forte alteração hidrotermal. A mineralização é associada a veio de quartzo com pirita, pirrotita e ouro livre encaixadas em rochas metavulcânicas máficas. O hidrotermalismo do depósito é caracterizado por assembléias minerais de alteração de carbonatização, cloritização, epidotização, potassificação (sericita/biotita), silicificação e sulfetação (pirita e pirrotita). Porém as concentrações de ouro restringem-se aos locais com percolação de veios quartzo carbonáticos (**Figura 4.4**).



Figura 4.4 Fotografias de alguns dos prospectos do *trend* Mamão-Babaçu cedidos pela Troy/RML. a) Cava do Garimpo Luiza lavrado por garimpeiros nos anos 80. Atualmente tem-se uma reserva, ainda em aberto em *down deep* ao longo do plunge para o norte; b) detalhe de testemunho de sondagem mineralizado com metabasalto alterado hidrotermalmente com biotitização, silicificação e piritização com veio de

quartzo/carbonato; c) Alvo Coruja NE mapeado com geoquímica de solo, e confirmado com sondagem. Observar a ausência de afloramentos.

Observa-se que a região central do bloco Mamão é caracterizada por grande densidade de lineamentos de direção NE-SW, com aproximadamente 2 a 4 km de extensão, com lineamentos E-W que configuram o principal controle estrutural das mineralizações auríferas. Esta configuração estrutural pode ser visualizada na **figura 4.5**, e através dos altos valores do parâmetro F (**Figura 4.6**) na porção centro-norte do bloco, caracterizando-a como a principal zona de influência metalogenética deste bloco.

Com relação às assinaturas magnetométricas, a região é caracterizada por altos valores da amplitude do sinal analítico (ASA), associadas com lentes de formação ferrífera intercaladas com metabasaltos e metapelitos do Grupo Babaçu, bem como com as porções ultramáficas da base do Grupo. A **figura 4.5c** mostra um detalhe da imagem da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) na região do bloco Mamão-Babaçu, onde observa-se uma forte anomalia dobrada. Mapeamento de campo mostrou que grande parte da área com valores de amplitude magnética mais elevada, representadas nessa figura, não aflora, sendo encobertos por metapelitos do Grupo Babaçu e metassedimentos do Grupo Rio Fresco. Diversas lentes de formação ferrífera foram mapeadas em campo associadas à alta amplitude magnética.

Na porção nordeste do alto relevo magnético encontra-se o depósito de ferro *Big Mac* descoberto em 1996, pelo Geólogo Elton João Zimmermann. Desde 2005 a mina é explorada pela Mineração Floresta do Araguaia S/A (**Figura 4.5c**). O depósito contém cerca de 20 milhões de toneladas de minério de ferro cubadas como reserva medida. O minério de ferro está relacionado à zonas de charneira de formação ferrífera enriquecidas em ferro. Não há nada disponível na literatura sobre a metalogênese do depósito. Miller e Mol (2010) sugerem que um evento hidrotermal de idade paleoproterozóica possa ter enriquecido partes da formação ferrífera e filitos hematíticos do Grupo Babaçu através de estruturas tardias NNW. Os corpos de hematita/magnetita compacta e formação ferrífera bandada estão cortados por enxames de fraturas N-S, relacionados ao evento extensional E-W e ao magmatismo anorogênico de 1.8 Ga. Outros pequenos afloramentos de hematita compacta também são encontrados cerca de 3 km para oeste ao longo da direção 260° Az, bem como um extenso colúvio de hematita contendo cerca de 7 milhões de toneladas.

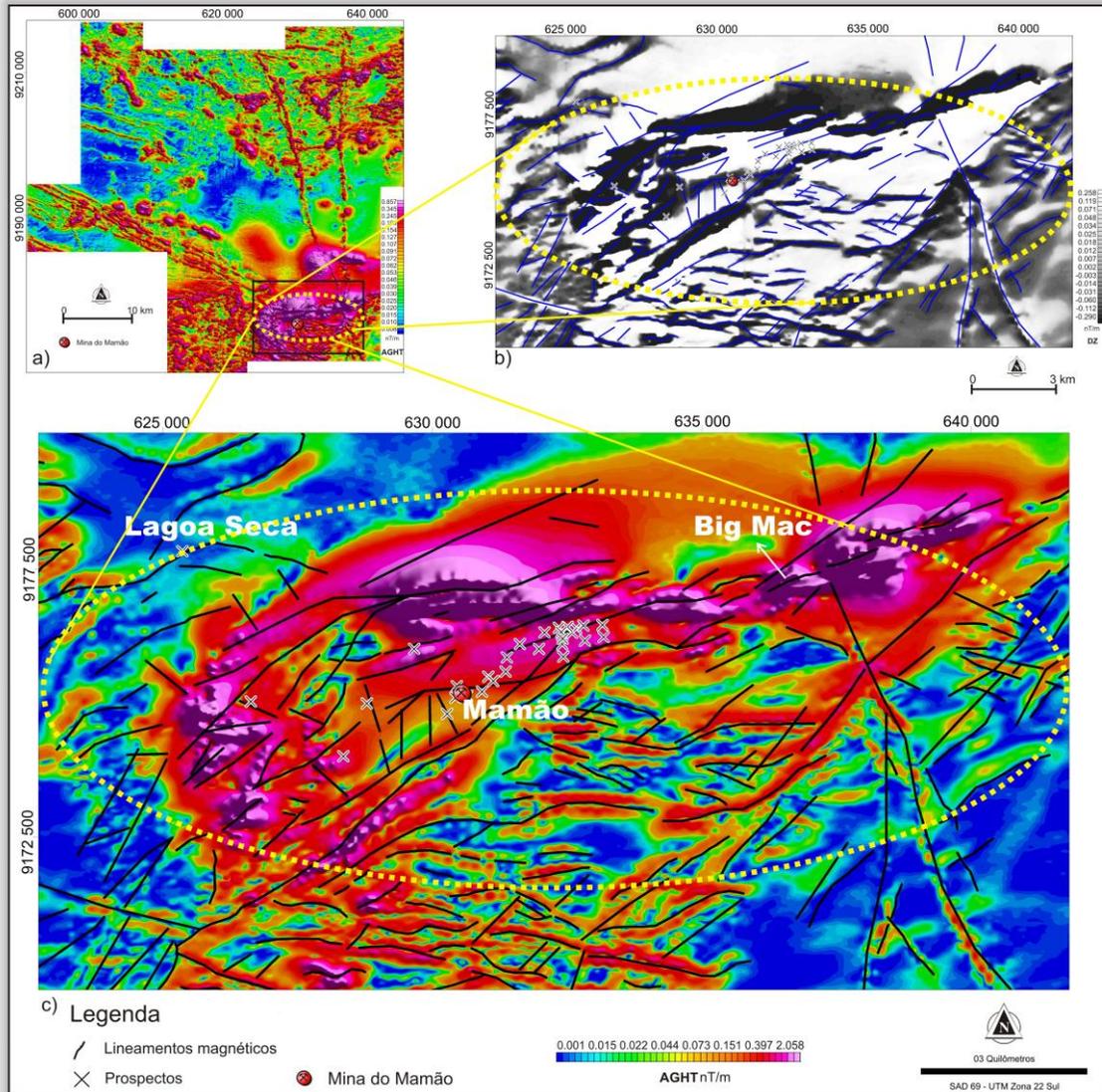


Figura 4.5 Imagens magnetométricas da área de estudo. a) Amplitude do gradiente horizontal total área de estudo; b) detalhe da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo (Dz); c) detalhe da amplitude do gradiente horizontal total (calculada com uso dos gradientes medido G_x e G_y) integradas com os principais lineamentos magnéticos.

Adicionalmente, a partir da imagem da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo, é possível identificar o domínio mineralizado como associado a relevo magnético movimentado (**Figura 4.5b**). Lineamentos magnéticos interpretados com base nas imagens das derivadas e da inclinação do sinal analítico (ISA) estão apresentados sobrepostos as imagem da derivada vertical e da amplitude do gradiente horizontal total (AGHT) (**Figuras 4.5.b e 4.5c**).

A integração das ocorrências auríferas com a imagem do parâmetro F mostra que há forte correlação de altos valores dessa variável com a maioria dos prospectos da região (**Figura 4.6**). Em virtude da dificuldade de boa caracterização de alteração hidrotermal em campo, a não ser a presença de sulfetação com predomínio de pirita, é complicado distinguir algum enriquecimento em K. De toda forma, dados de estudos petrográficos, cedidos pela Troy/Reinarda Mineração, confirmaram a presença de sericita e biotita, sendo a biotitização próximo a zona mineralizada de veio de quartzo, possuindo halo de alteração pouco espessos, geralmente entre 1 e 4 metros (**Tabela 4.3**).

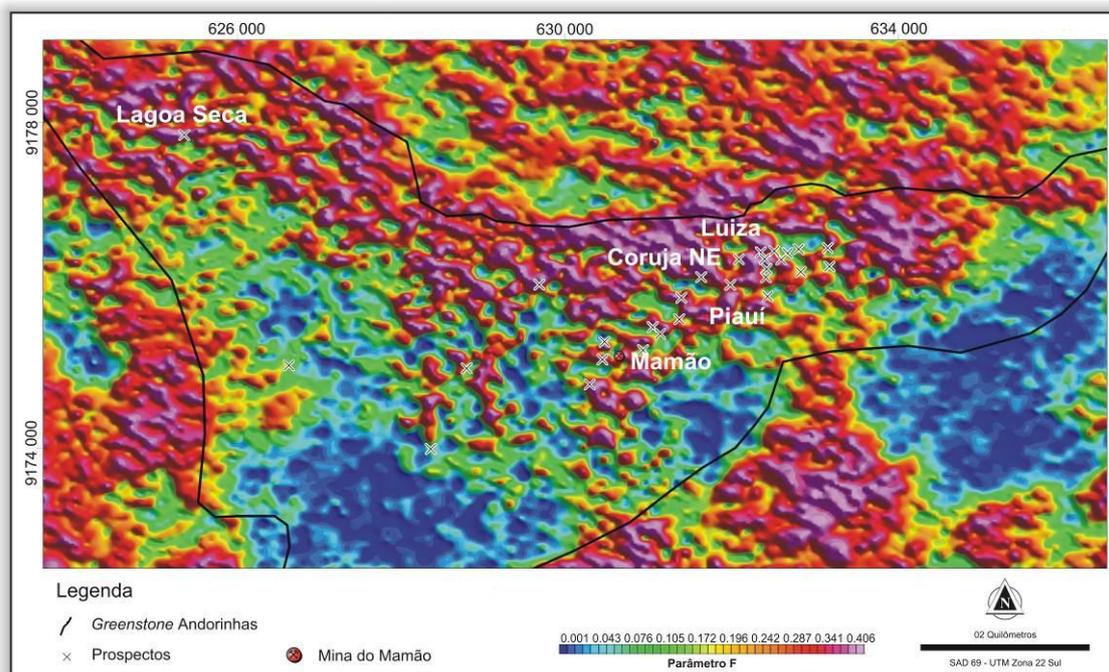


Figura 4.6 Detalhe da imagem parâmetro F sobre o bloco Mamão-Babaçu. Notar que a maioria dos prospectos da região estão associados a altos valores do parâmetro F. O produto permite auxiliar na caracterização de zonas enriquecidas em potássio hidrotermalmente.

Tabela 4-3 Principais características das ocorrências auríferas do *trend* mineralizado Mamão/Babaçu.

Mamão/Babaçu	
Rochas hospedeiras	Rochas máficas (metabasaltos)
Estrutura principal	Corredores transcorrentes
<i>Trend</i>	N70E / E-W
Assinatura magnética	Valores intermediários de amplitude do ASA
Assinatura gamaespectrométrica	Porções com alto potássio na imagem do parâmetro F
Ambiente geológico	Greenstone belt
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo + finas lâminas de pirita proximal
Alteração hidrotermal	Biotitização + silicificação + sulfetação (pirita, pirrotita)
Estruturas rúpteis	Zona mineralizada deslocada por falhas normais tardias
Alteração de contato	Sem evidências. Algumas intrusões dioríticas sem correlação com a mineralização

O segundo bloco corresponde ao WRM - Oeste Rio Maria que faz parte do *greenstone* Rio Maria e localiza-se no extremo oeste da área de estudo (**Figura 4.3**). Na região, a sericitização compreende o principal tipo de alteração hidrotermal, conforme observado na principal área mineralizada. A região garimpada, denominada Manoel, também é conhecida como Tatu-Frango pela CPRM/DNPM (**Figura 4.7** e **Tabela 4.2**). As áreas mineralizadas dessa região são caracterizadas por intensa sericitização e moderada silicificação das rochas vulcanoclásticas em contato com as rochas metavulcânicas máficas (**Figura 4.8**). Nesse contexto, foram identificadas zonas de cisalhamento NE-SW sinistrais, com forte alteração hidrotermal e veios de quartzo-carbonato encaixados. Nesse domínio observa-se sulfetação com predomínio de pirita. A foliação regional é aproximadamente N70°E mergulhando entre 60°-90° para norte. Os veios de quartzo geralmente são E-W com mergulhos entre 30° e 45° para norte.

Regionalmente, o bloco Oeste Rio Maria é afetado por estruturas de direção NW-SE (**Figura 3.3**), representadas por extensos enxames de diques de diabásio, além

de estar encaixado no domínio de rochas vulcânicas máficas representadas por metabasaltos e doleritos, bem como unidades ácidas arqueanas do Grupo Babaçu (Tabela 4.4).



Figura 4.7 Fotografias de alguns dos prospectos do bloco WRM. a) *shaft* no garimpo Manoel; b) visada E-W do garimpo Bezerro; c) garimpo do Anastácio em atividade com lavra em pequenos *shafts*.



Figura 4.8 Chip de sondagem RC do alvo Manoel. Em destaque a intensa silicificação da encaixante máfica (Dados cedidos pela Troy/Reinarda Mineração)

Tabela 4-4 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Oeste Rio Maria (WRM).

WRM (Oeste Rio Maria)	
Rochas hospedeiras	Rochas máficas (metabasaltos) e félsicas
Estrutura principal	Corredores de cisalhamento NE
<i>Trend</i>	N70E; estruturas secundárias E-W
Assinatura magnética	Baixos gradientes magnéticos
Assinatura gamaespectrométrica	Porções com alto potássio na imagem do parâmetro F
Ambiente geológico	<i>Greenstone belt</i>
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo
Alteração hidrotermal (minerais)	Clorita + biotita + sílica + pirita ± galena ± esfalerita
Estruturas rúpteis	Zona mineralizada deslocada por falhas normais tardias
Alteração de contato	Sem evidências. Algumas intrusões dioríticas sem correlação com a mineralização
Contato litológico	Próximo de intrusivas félsicas

O terceiro bloco, Malvinas, dista cerca de 16 quilômetros em direção a Xinguara, a norte da região de Oeste Rio Maria (**Figura 4.3**). O *trend* Malvinas faz parte do *greenstone* Identidade e foi detalhado por Souza (1994). Inúmeras ocorrências são conhecidas na região, sendo que boa parte delas já foram pesquisadas com furos de sondagem e amostragem de rocha pela Troy/Reinarda Mineração LTDA. A silicificação e sulfetação compreendem os principais tipos de alteração hidrotermal. A estruturação predominante é segundo a direção NW-SE (Souza 1994), classificadas como de segunda ordem nesse estudo.

Diques intrusivos félsicos de quartzo pórfiro possuem orientação geral NW como mostra a **figura 4.9** do parâmetro F no *trend* Malvinas – prospectos e da **figura 4.10**. A foliação regional é aproximadamente N70°W mergulhando entre 50°-80° para sul. Nessa região também se encontra *sills* E-W de feldspato pórfiro, de composição riolítica, isotrópico, bem como diques intrusivos máficos N-S, ambos aparentemente sincrônicos do magmatismo anorogênico de 1.88 Ga (Figura 4.11). Os principais controles da mineralização são listados na **tabela 4.5**.

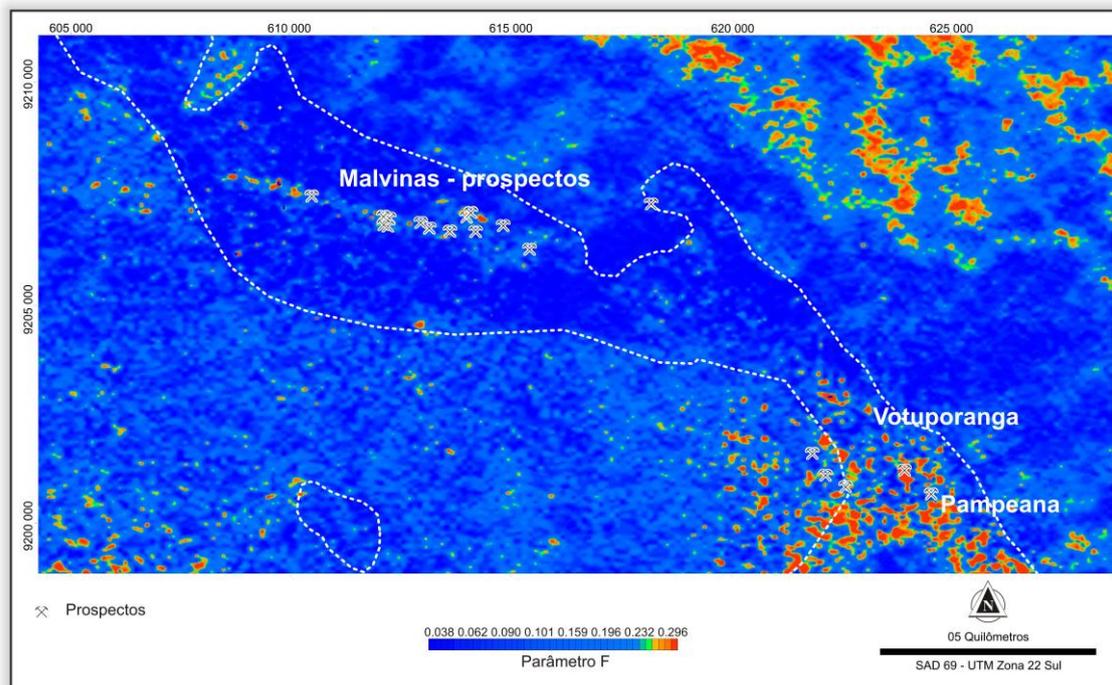


Figura 4.9 Imagem do parâmetro F com transformação linear para melhor visualização dos altos valores. Em destaque o *trend* NW-SE dos prospectos Malvinas, Votuporanga e Pampeana.

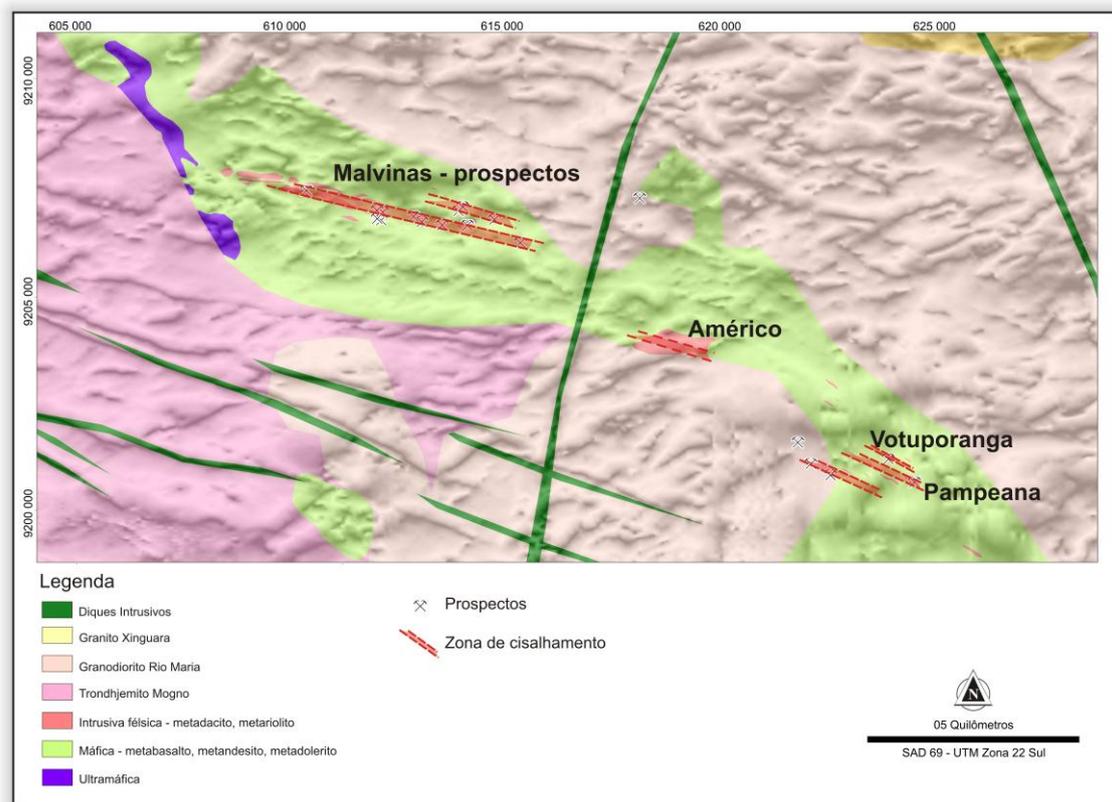


Figura 4.10 Mapa geológico do bloco Malvinas destacando as zonas de cisalhamento NW-SE. O mapa está sobreposto à imagem da inclinação do sinal analítico (ISA).

Diversos garimpos encontram-se alojados em zonas de cisalhamento NW-SE, em contato com encaixante máfica e quartzo pórfiro intrusivo, podendo estar associadas a veio de quartzo ou não (**Figura 4.10**). Como característico na região da área de estudo, os depósitos do bloco Malvinas estão alojado em *splays* E-W.

Tabela 4-5 Principais características das ocorrências auríferas do bloco Malvinas.

Malvinas (Votuporanga)	
Rochas hospedeiras	Contato entre metamáficas e metadacitos
Estrutura principal	Corredor de cisalhamento NW / alto mergulho
Trend	Corredor NW; estruturas secundárias E-W
Assinatura magnética	Baixos gradientes magnéticos
Ambiente geológico	<i>Greenstone belt</i>
Grau metamórfico	Xisto verde à Anfibolito inferior
Mineralização	Ouro em veio de quartzo no contato entre metamáficas e félsicas
Alteração hidrotermal	Cloritização + biotitização + silicificação + sulfetação (pirita)
Contato litológico	Muito importante / próximo de intrusivas félsicas

Todo o acervo de dados mencionadas no *tópico 4.3* foram utilizados para a construção da modelagem espacial e a produção de mapas de favorabilidade com base na lógica *fuzzy*. Ou seja, vários critérios foram estabelecidos e são sumarizados a seguir:

- ✓ seqüências vulcânicas máficas, félsicas e formações ferríferas (critério litológico);
- ✓ contato vulcânicas máficas/félsicas;
- ✓ extensos corredores de cisalhamento de primeira ordem;
- ✓ estruturas aproximadamente E-W (segunda ordem);
- ✓ zonas enriquecidas em potássio (alteração hidrotermal) mapeados utilizando o fator F;
- ✓ anomalias magnéticas;
- ✓ teores anômalos de ouro em amostras de sedimento de corrente, solo e rocha.

4.4. ANÁLISE POR LÓGICA FUZZY

Uma possibilidade para a geração de mapas de favorabilidade mineral é através da utilização de funções matemáticas que expressem o grau de pertinência de um dado sem a necessidade de pontos de treinamento. Este método, que utiliza o conhecimento de um especialista para definir as relações entre as evidências e as funções, é conhecido como lógica fuzzy (Bonhan-Carter, 1994, Cheng & Agterberg 1999, Luo & Dimitrakopoulos 2003, Karimi & Valadan Zoej 2004, Porwal *et al.* 2004, Lee 2007, Nelson *et al.* 2007). A lógica fuzzy fornece uma maneira conveniente de interpretar e transferir o conhecimento de um especialista numa análise espacial quantitativa dentro de uma plataforma GIS como expressa a **figura 4.11**.



Figura 4.11 Metodologia da modelagem espacial para a Lógica Fuzzy (Nykänen *et al.* 2008).

O grau de pertinência de um dado, é definido em uma série contínua de valores entre 0 e 1, onde 0 e 1 são os valores mínimo e máximo da função e correspondem a não-pertinência e a pertinência total, respectivamente (**Figura 4.12**). Esta figura representa uma função linear de pertinência fuzzy:

$$\mu_{\text{saída}} = (\mu - \text{min.}) / (\text{máx.} - \text{min.})$$

onde μ = valor do pixel e min. e máx. = valores mínimo e máximo do mapa de entrada, respectivamente. Valores muito altos serão certamente anômalos, possuindo uma pertinência fuzzy (*fuzzy membership*) “1”, enquanto valores muito baixos ou abaixo do *background* terão pertinência fuzzy “0”. Entre estes dois extremos existe toda uma faixa de possíveis valores de pertinência.

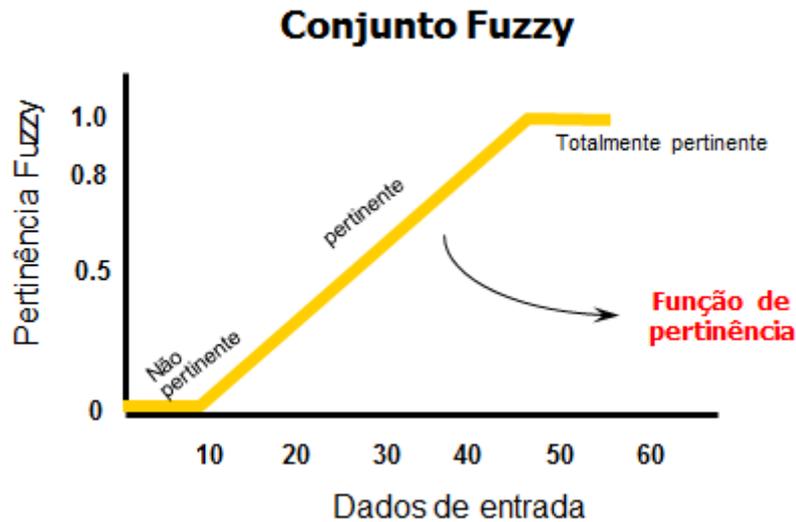


Figura 4.12 Gráfico da função de pertinência fuzzy para um conjunto de dado de entrada. Os valores no mapa menores que 10 correspondem ao zero da função de pertinência, ou seja, não apresentam relação com o objeto de pesquisa. Em contraste, os valores acima de 48 apresentam pertinência total (Pertinência fuzzy = 1).

Várias funções podem ser utilizadas na definição dos valores de pertinência *fuzzy*, sendo sua escolha baseada no julgamento do especialista e aplicada a cada mapa evidencial que irá constituir o mapa integrado. Esta etapa corresponde à fuzificação dos dados, que consiste basicamente em uma simplificação de dados de natureza distintas, de forma que possam ser utilizados conjuntamente (Quadros *et al.* 2006, Nelson *et al.* 2007, Magalhães, 2008). An *et al.* (1991), Bonham-Carter (1994) e Raines *et al.* (2010) apresentam os operadores de lógica fuzzy ou nebulosa mais úteis para a combinação de mapas em exploração mineral: interseção lógica (*fuzzy-AND*), união lógica (*fuzzy-OR*), produto algébrico ‘fuzzy’ (*fuzzy-Produto*), soma algébrica ‘fuzzy’ (*fuzzy-Soma*) e operação gama (*fuzzy-Gamma*)

4.4.1. Fuzificação dos dados

A fuzificação dos dados foi empregada na tentativa de gerar mapas evidenciais considerando-se os tipos de ocorrências minerais da área de estudo de acordo com a rocha hospedeira como mostra a **figura 4.2**. O primeiro refere-se às mineralizações auríferas hospedados em *greenstone belts* em zona de cisalhamento com influência de

rochas encaixantes máficas e félsicas. O segundo tipo refere-se à mineralizações hospedado em vulcânicas máficas e formações ferríferas do tipo algoma. Os vetores litológicos e estruturais apresentados guiaram os modelos efetuados para a área de trabalho, bem como para os três blocos estudados em detalhe.

Os dados empregados no primeiro modelo foram: mapa geológico com grau de pertinência alto para unidades félsicas e máficas, dados aerogeofísicos na tentativa de realçar potássio anômalo e lineamentos magnéticos E-W. O segundo modelo caracteriza-se pelo alto grau de pertinência para os BIFs do mapa geológico e do uso da imagem da amplitude do sinal analítico (ASA) nos produtos aerogeofísicos, além dos mesmos lineamentos magnéticos E-W. Considerando que os halos de alteração são pouco espessos, destaca-se que as distâncias dos *buffers* para todos os modelos equivaleram aos intervalos de 0-100 m e 100-200 m.

Para essa etapa de fuzificação os dados foram previamente rasterizados, com tamanhos de célula de 30m, para a determinação de pertinências *fuzzy* que permitem o escalonamento dos dados originais em graus de variabilidade entre 0 (pertinência ausente) e 1 (pertinência total). Posteriormente, estes resultados são combinados por meio de operadores *fuzzy* (An *et al.* 1991, Bonham-Carter 1994) para se obter o mapa final de favorabilidade.

Litologia

Por ser um dado categórico, não é possível estabelecer uma função matemática para transformar um mapa geológico em um conjunto *fuzzy*. Entretanto, a partir do modelo metalogenético do depósito e da relação do potencial aurífero com as rochas hospedeiras, é plausível atribuir valores relativos entre 0 - 1 para cada litotipo, tornando o mapa geológico um produto fuzificado. Neste estudo os valores de pertinência foram ponderados livremente para cada litotipo, conforme sua importância relativa segundo a favorabilidade de cada unidade de acordo com o modelo exploratório da região (**Figura 4.2**). Assim, atribuiu-se maior pertinência às litologias do Grupo Babaçu e Lagoa Seca que hospedam a mineralização aurífera, como as metamáficas, intrusivas félsicas e lentes de formação ferrífera e baixas pertinências são atribuídas para as classes associadas às litologias do Grupo Rio Fresco, granitóides e granitos anorogênicos, onde

há pouca ou nenhuma favorabilidade em hospedar mineralização aurífera do tipo *lode* (Figura 4.13, 4.14, Tabela 4.6).

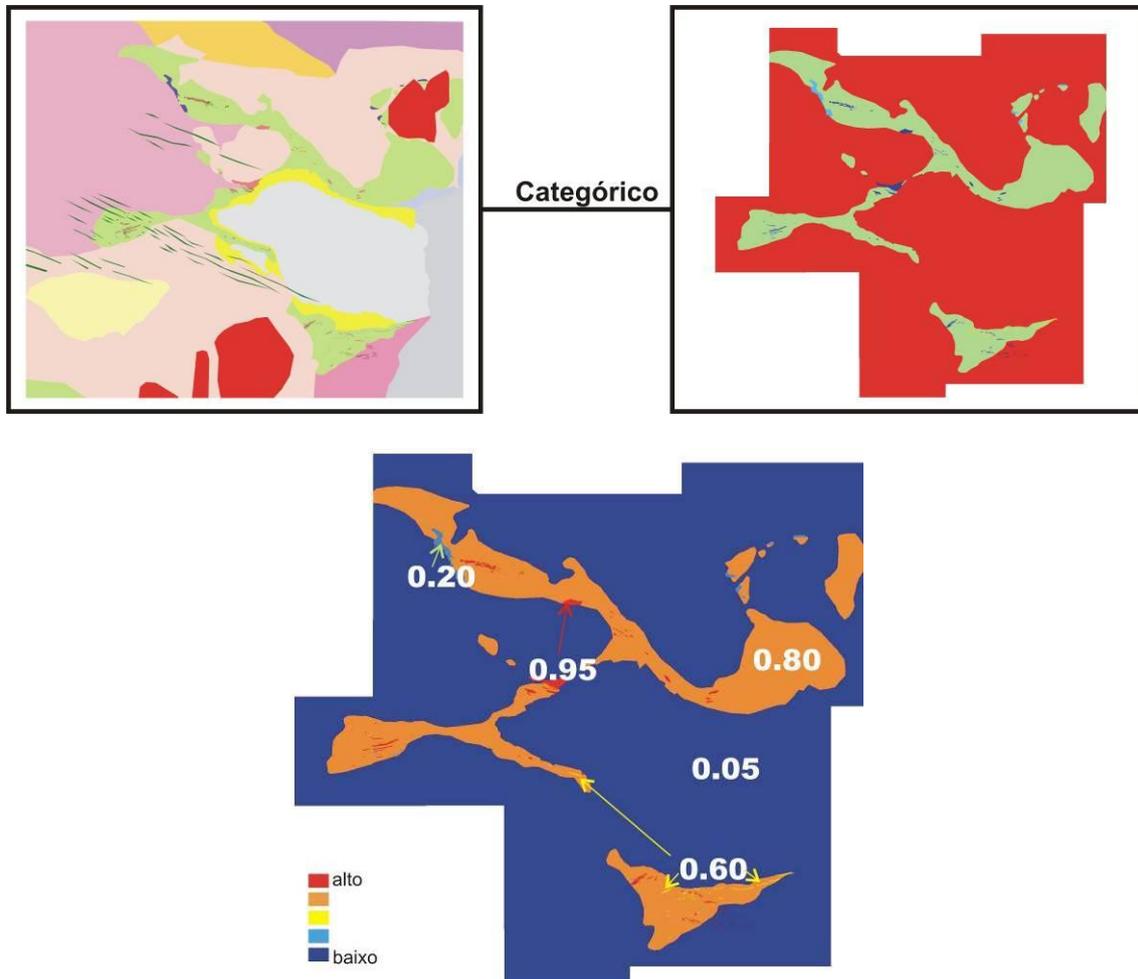


Figura 4.13 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um *expert*. A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos e mapeados nesse trabalho. Modelo 1) alta pertinência para as vulcânicas félsicas e máficas.

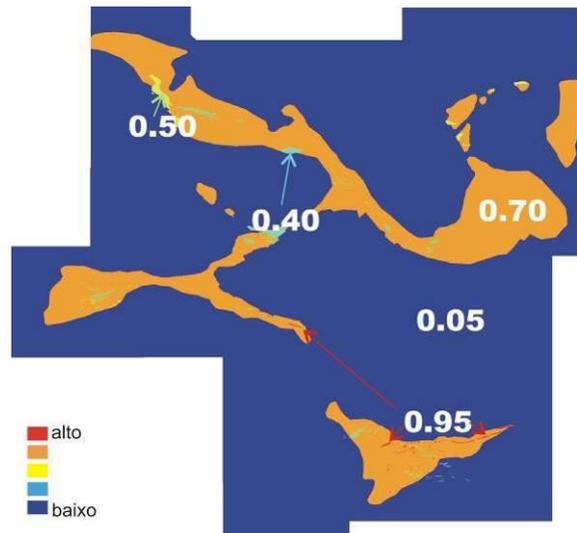


Figura 4.14 Mapa geológico fuzificado através da atribuição dos valores de pertinência fuzzy por um *expert*. A decisão foi baseada nos vetores de exploração já conhecidos. Modelo 2) alta pertinência para as formações ferríferas e vulcânicas máficas.

Tabela 4-6 Unidades identificadas no mapa geológico associados aos valores de pertinência fuzzy para os dois modelos: Modelo 1 – mineralização associada às unidades félsicas/máficas; Modelo 2 – mineralização associada à formação ferrífera bandada/máficas.

Modelo 1 - Félsica/Máfica		Modelo 2 – BIF	
Litotipo	Pertinência Fuzzy	Litotipo	Pertinência Fuzzy
Félsicas	0.95	Félsicas	0.40
Máficas	0.80	Máficas	0.70
BIFs	0.60	BIFs	0.95
Ultramáficas	0.20	Ultramáficas	0.50
Granitos anorogênicos, granitóides, quartzitos, filitos, siltitos, grauvacas, etc...	0.05	Granitos anorogênicos, granitóides, quartzitos, filitos, siltitos, grauvacas, etc...	0.05

Controles Estruturais

De acordo com Huhn (1992), Pinheiro (2009), Miller e Mol (2010) as principais ocorrências de ouro na região de estudo estão relacionadas à corredores de cisalhamento de primeira ordem, com direções NE-SW e NW-SE, respectivamente. O presente estudo verificou que os principais depósitos da região ocorrem alojados em *splays* E-W, como estruturas de segunda ordem, ao longo desses corredores de cisalhamento de primeira ordem. Com isso, gerou-se um mapa temático destacando-se os lineamentos magnéticos E-W, com pequenos corredores ENE-WSW e WNW-ESSE. Geralmente, as mineralizações estão associadas às estruturas, mas não necessariamente ocorrem no traço estrutural. Elas estão associadas a uma zona de influência metalogenética. Para modelar o dado estrutural é necessário gerar zonas tampões, geralmente conhecidas como *buffers*, e posteriormente rasteriza-las para modelagem no ArcSDM. Dessa forma, foram gerados dois anéis ou duas zonas tampões de 0 a 100 metros e 100-200 metros ao redor dos lineamentos magnéticos (mapeados e interpretados dos gradientes horizontais medidos - Gx e Gy) e falhas interpretadas para o presente estudo. Para fuzificação desses dados evidenciais, considerou-se pertinência de 0.95 entre 0 - 100 metros e 0.5 entre 100 - 200 metros (**Figura 4.15**).

Controles estruturais usados fuzificação dos dados estruturais incluíram: (1) principais zonas de deformação (*trends* de primeira e segunda ordem, com direções NE e NW) mapeadas e interpretadas; (2) estruturas E-W, ENE-WSW, WNW-ESE (mapeados e interpretados dos gradientes horizontais medidos - Gx e Gy). No entanto, após várias modelagens os melhores resultados advêm da utilização de estruturas com orientação E-W e os pequenos corredores ENE-WSW e WNW-ESE.

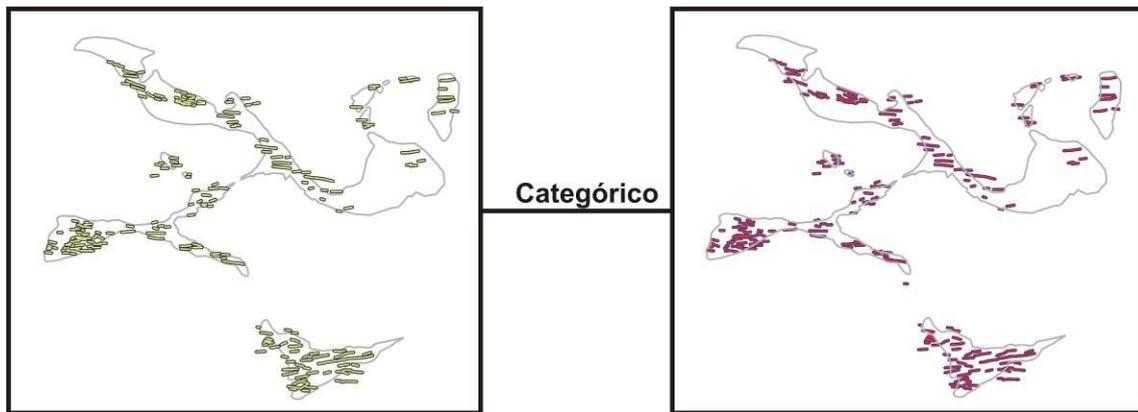


Figura 4.15 Fuzzificação das principais estruturas com *buffers* em zonas sucessivas de 0 à 200 metros, sendo um alto valor de pertinência de 0.95 entre 0 - 100 metros e 0.5 entre 100 - 200 metros.

Dados Geofísicos

Os dados aerogeofísicos são considerados dados cumulativos, onde as funções de pertinência *fuzzy* são aplicadas de acordo com a relação entre os mapas evidenciais e o modelo metalogenético descrito acima. Após, o teste com os diversos operadores observou-se que as funções de pertinência mais adequadas para os conjuntos de dados estudados são as funções *fuzzy MS Large* e *MS Small*.

a) função de pertinência *fuzzy MS Large*: esta função foi aplicada aos mapas da razão K/Th, Kd (Potássio anômalo), parâmetro F, ASA (amplitude do sinal analítico) e do AGHT (Amplitude do gradiente horizontal total) Para estas evidências quanto maiores os valores de concentração dos elementos dos produtos gamaespectrométricos ou maior a amplitude do sinal analítico, mais favoráveis à ocorrência de um depósito, conforme o modelo metalogenético. Sendo assim, aos maiores valores do mapa de entrada são atribuídos os maiores valores de pertinência *fuzzy*.

b) função de pertinência *fuzzy MS Small*: Ao contrário do que ocorre na função *large*, esta função considera os menores valores dos dados de entrada como os maiores valores da função de pertinência. Foram usadas a função *MS small* no canal do Th e nas imagens do gradiente horizontal medido em X e Y, Gx e Gy. A imagem do tório foi fuzzificado a partir desta função, pois de acordo com as observações dos dados o tório

apresenta uma relação inversa à do potássio e urânio nas áreas dos principais depósitos e ocorrências de ouro. Já para as variáveis do gradiente horizontal medido em X e Y a função *MS small* foi usada para realçar os baixos gradientes horizontais Gx e Gy.

4.4.2. Operações fuzzy

Os mapas evidenciais, após serem fuzificados, foram combinados utilizando operadores *fuzzy*, a fim de se gerar o modelo final. Neste trabalho, foram utilizados os operadores *fuzzy-AND*, *fuzzy-Produto* e *fuzzy-Gamma* (Bonham-Carter 1994, Lee 2007).

a) uso do operador *fuzzy-AND* considerando-se todos os dados gamaespectrométricos fuzificados, a fim de resultar em uma única imagem representativa, evitando-se o forte condicionamento destes dados que visam o realce de K;

b) uso do operador *fuzzy-produto* considerando-se os dados magnetométricos fuzificados como as variáveis Gx e Gy do gradiente horizontal medido a bordo da aeronave. Uma vantagem em se utilizar o operador produto é que o resultado final tem uma contribuição de todos os dados de entrada, diferente do que ocorre com o operador *fuzzy-AND*.

c) aplicação do operador *fuzzy-gama* considerando-se os mapas fuzificados da amplitude do sinal analítico (ASA), do *buffer* das estruturas, do mapa geológico categórico e dos resultados dos operadores *fuzzy-AND* e *fuzzy-produto*. A combinação final consiste no operador fuzzy-gama com parâmetro γ 0.9 (**Figuras 4.16 a 4.23**). A seleção do valor do parâmetro γ é subjetiva e vários valores foram testados, sendo considerado no trabalho o valor 0.9 como um parâmetro otimista. Um operador fuzzy-gama com valor menor como 0.7, por exemplo, seria um parâmetro menos otimista. Optou-se usar o parâmetro γ com valor 0.9 em todos os modelos.

4.4.3. Mapas de favorabilidade

Um modelo regional foi gerado para toda a área de estudo, posteriormente modelos de três blocos onde concentram os principais prospectos e que mostram vetores prospectivos diferenciados. O fluxograma da modelagem, bem como o mapa final de

favorabilidade para depósitos de ouro do tipo *lode* resultando da combinação de pesos e operadores *fuzzy* são apresentados nas figuras de **4.16** a **4.23**, a saber: modelo regional para toda a área do projeto Andorinhas; Mamão/Babaçu, Oeste Rio Maria (WRM) e Malvinas. No total foram selecionados na modelagem *fuzzy* sessenta alvos (**Figura 4.24**).

4.4.3.1. Modelo Regional - Área do Projeto Andorinhas

Na modelagem regional foram levados em conta os dados apresentados dentro modelo 01 na tabela 4.6 da fuzificação da geologia, ou seja, abordagem associada à mineralização no contato metamáfica/metafélsica, uma vez que somente na região do *trend* Mamão-Babaçu encontram-se mineralizações de ouro associadas à formação ferrífera/metamáficas.

A **figura 4.16** mostra todas as etapas para a geração de um modelo regional para a área do Projeto Andorinhas. O modelo considerou as estruturas E-W com *buffers* de 0 – 100m com pertinência 0.95 e 100 – 200m com pertinência 0.50. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e a razão K/eTh, e *fuzzy small* para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foram usados os operadores *fuzzy small* para Gy e *fuzzy large* para Gx, sendo posteriormente empregado o operador produto.

Uma análise mais detalhada dos resultados contemplou apenas as áreas fora dos três principais blocos detalhados a seguir. O modelo mapeia vários alvos conhecidos com alta favorabilidade, a saber: Rúbens, Rufino, Beroni, Pampeana e Duas Vendas. Esses alvos estão relacionados à metavulcânicas máficas, metavulcanoclásticas, quartzo pórfiro e metassedimentos do Grupo Babaçu. O modelo ainda seleciona dez novos alvos com médio/alto grau de prospectividade, sendo 5 deles destacados na **figura 4.17**.

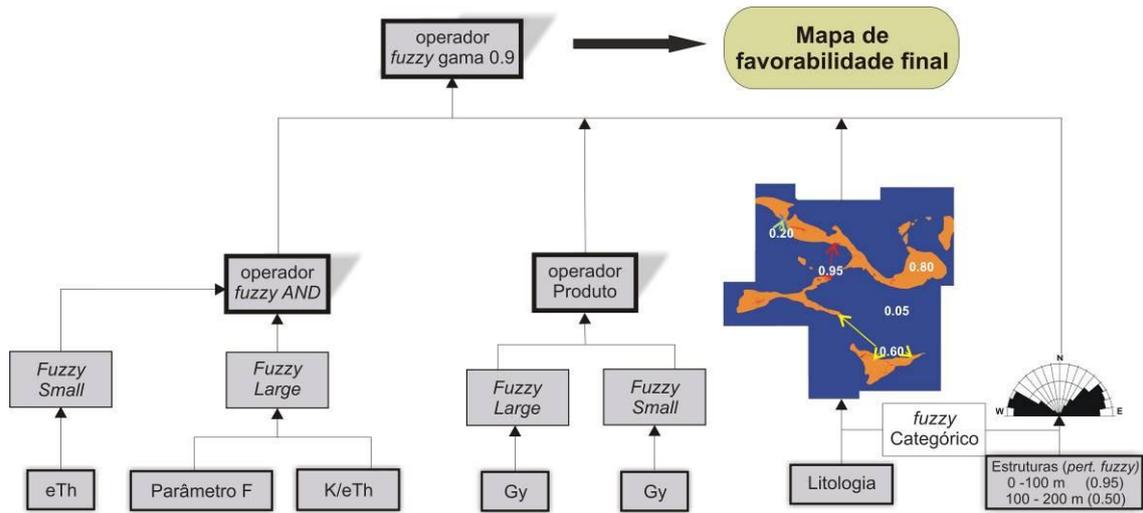


Figura 4.16 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo regional da área de estudo.

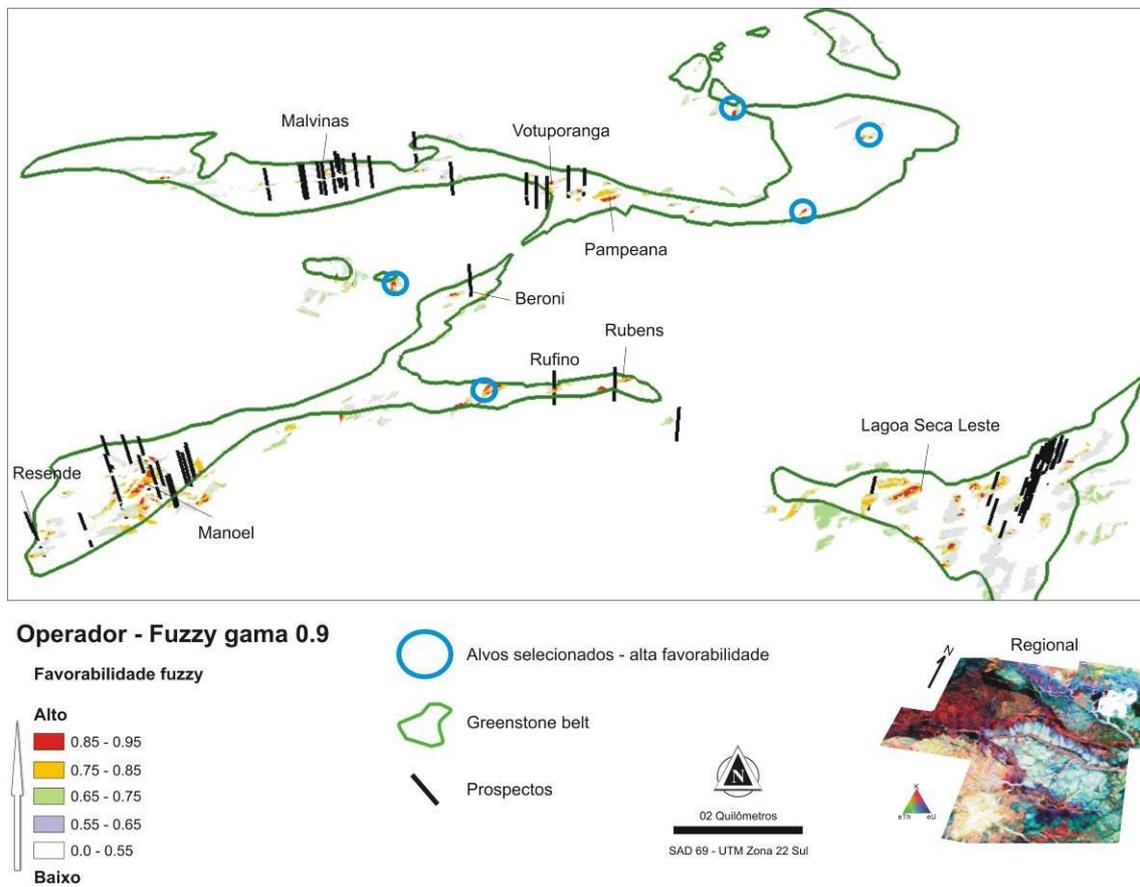


Figura 4.17 Mapa, em perspectiva, de potencialidade mineral para ouro gerado para a área do Projeto Andorinhas com operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque (prospectos – barras cor preto) os alvos já conhecidos e os círculos em azul mostram novos alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.2. Bloco Mamão/Babaçu

Para o bloco Mamão utilizou-se o denominado modelo 2 na tabela 4.6, ou seja, alta pertinência para formação ferrífera bandada e unidades máficas. O modelo também considerou as estruturas E-W com buffers de 0 – 100m com pertinência 0.95 e 100 – 200m com pertinência 0.50.

A **figura 4.18** mostra todas as etapas para a geração do modelo para o Bloco Mamão/Babuçu. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e a razão K/eTh, e *fuzzy small* para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto.

A análise dos resultados mostra que a maior favorabilidade na região da mina do Mamão está associada à metamáficas e, secundariamente, associadas a finas lentes de formação ferrífera. A maioria dos prospectos do corredor NE, ou *trend* Mamão-Babaçu, estão representados por média/alta favorabilidade, como Coruja NE, Luiza, Piauí, etc. O modelo mostra que a mina do Mamão está sobre um *trend* de média favorabilidade, pois a mina não esta associada a formação ferrífera e somente metamáficas. Utilizando o corte de possibilidade *fuzzy* de 0,55, observa-se a validação da maioria das ocorrências conhecidas ao longo desse corredor (**Figura 4.19**).

Além dos alvos ao longo do corredor Mamão-Babaçu, o modelo mapeou o alvo Marcinho, também gerado na interpretação geofísica visual (Capítulo 03). Outros alvos a sudoeste e a leste do depósito Lagoa Seca, seguindo a mesma estrutura em forma de sigmóide, também foram mapeados. Cinco novos alvos foram selecionados ao longo do contato granodiorito Rio Maria - *greenstone*. Nesse modelo, o depósito Lagoa Seca mostrou baixa favorabilidade, pois os vetores prospectivos são outros, como supracitado.

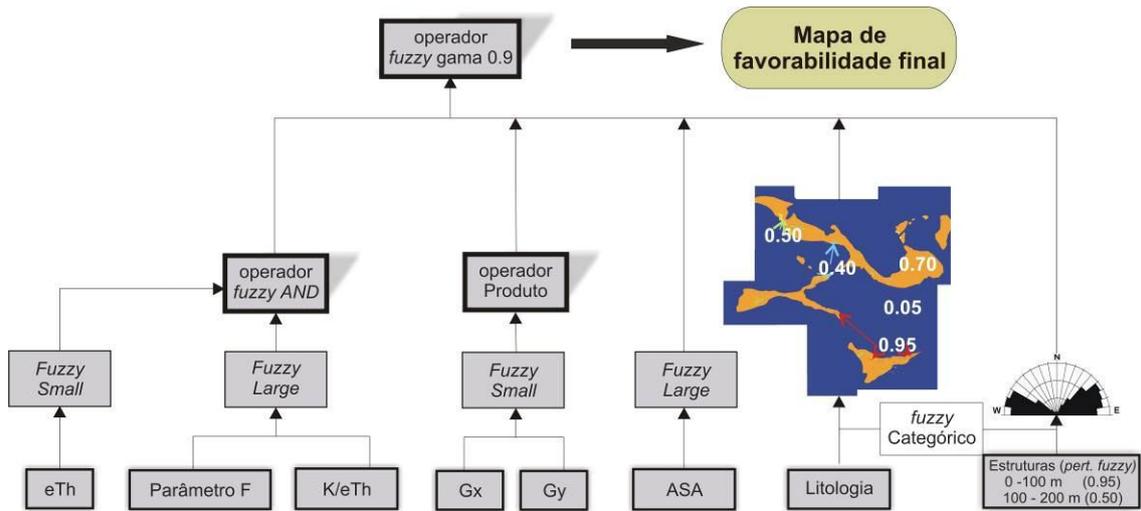


Figura 4.18 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco Mamão/Babaçu.

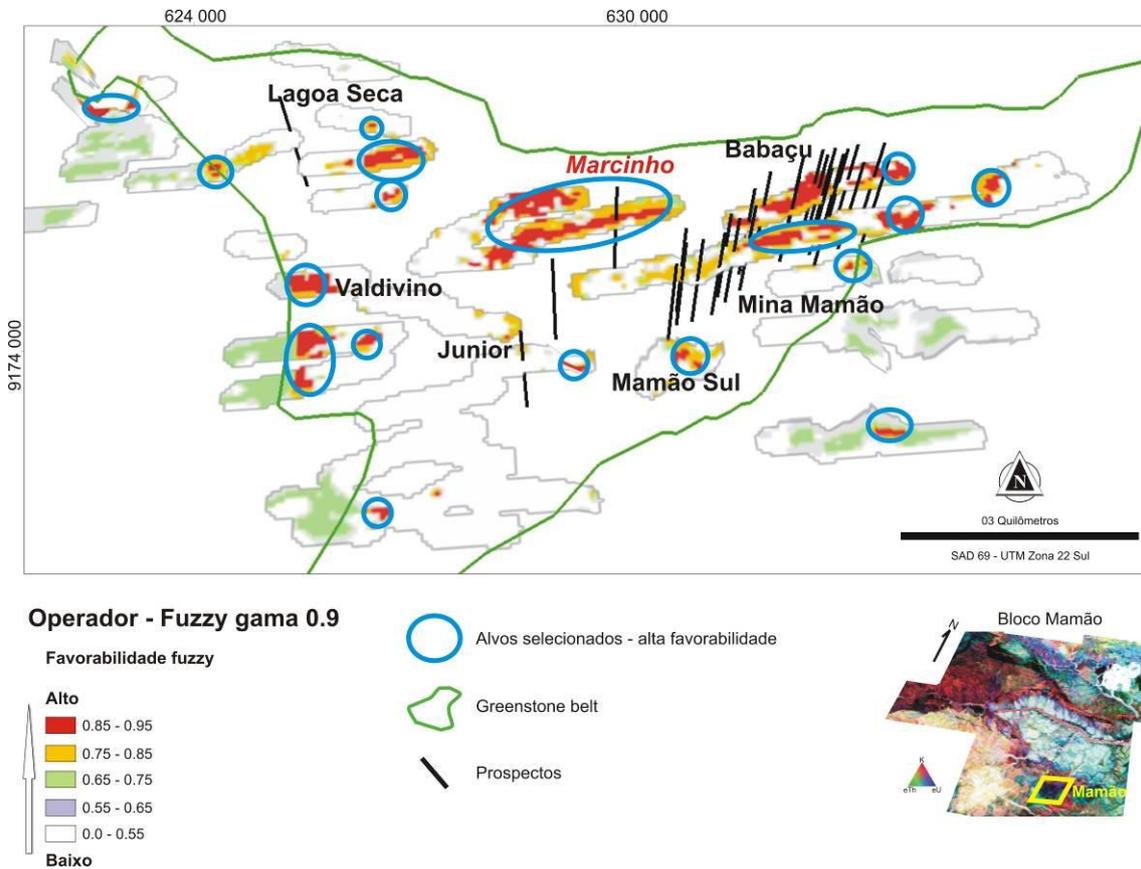


Figura 4.19 Mapa de favorabilidade aurífera em 2.5D para o bloco Mamão/Babaçu usando o operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preta) e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.3. Bloco WRM (Oeste Rio Maria)

Para o bloco WRM a litologia empregada foi o modelo 1, com pertinência alta relacionada às unidades félsicas e máficas detalhado na **tabela 4.6**.

O fluxograma da **figura 4.20** mostra todas as etapas para a geração do modelo para o Bloco Oeste Rio Maria. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F, a razão K/eTh e o potássio anômalo (Kd). Já o *fuzzy small* foi usado para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto. O operador *fuzzy gama* permitiu a integração dos vetores apontados anteriormente através parâmetro γ com valor 0.9.

O resultado da modelagem desse bloco mostra algum efeito litológico a oeste do prospecto Manoel, porém o modelo validou regiões extremamente garimpadas no passado e pesquisadas pela Troy/Reinarda Mineração como o garimpo Manoel, Anastácio, Bezerra e o alvo Resende. A maior favorabilidade na região de Oeste Rio Maria está associada à unidades ácidas, seja rochas metassedimentares ou vulcanoclásticas. O modelo mapeia dez novos alvos, sendo três delas no contato granito-*greenstone* (**Figura 4.21**).

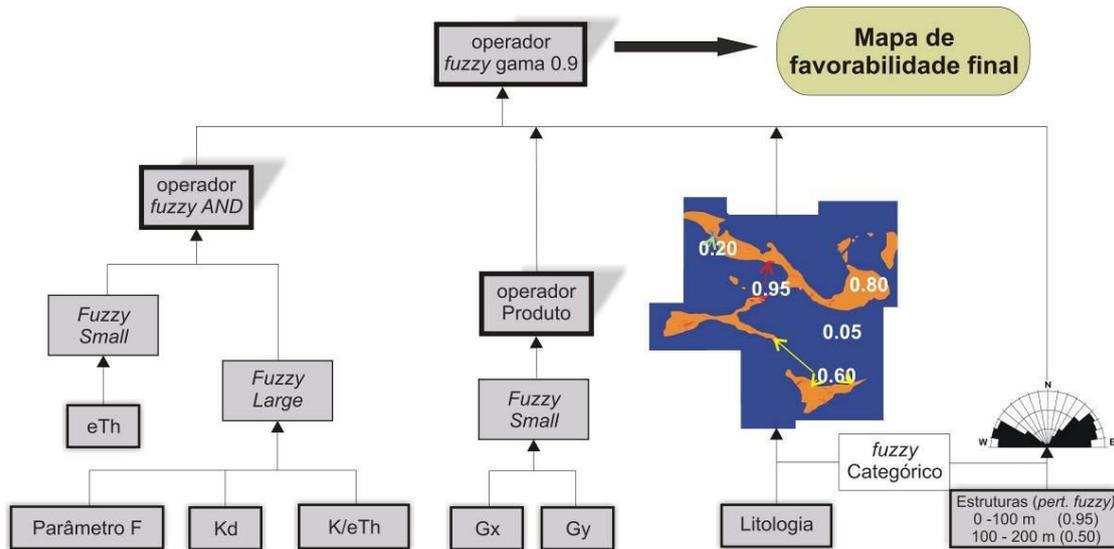


Figura 4.20 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco WRM (Oeste Rio Maria).

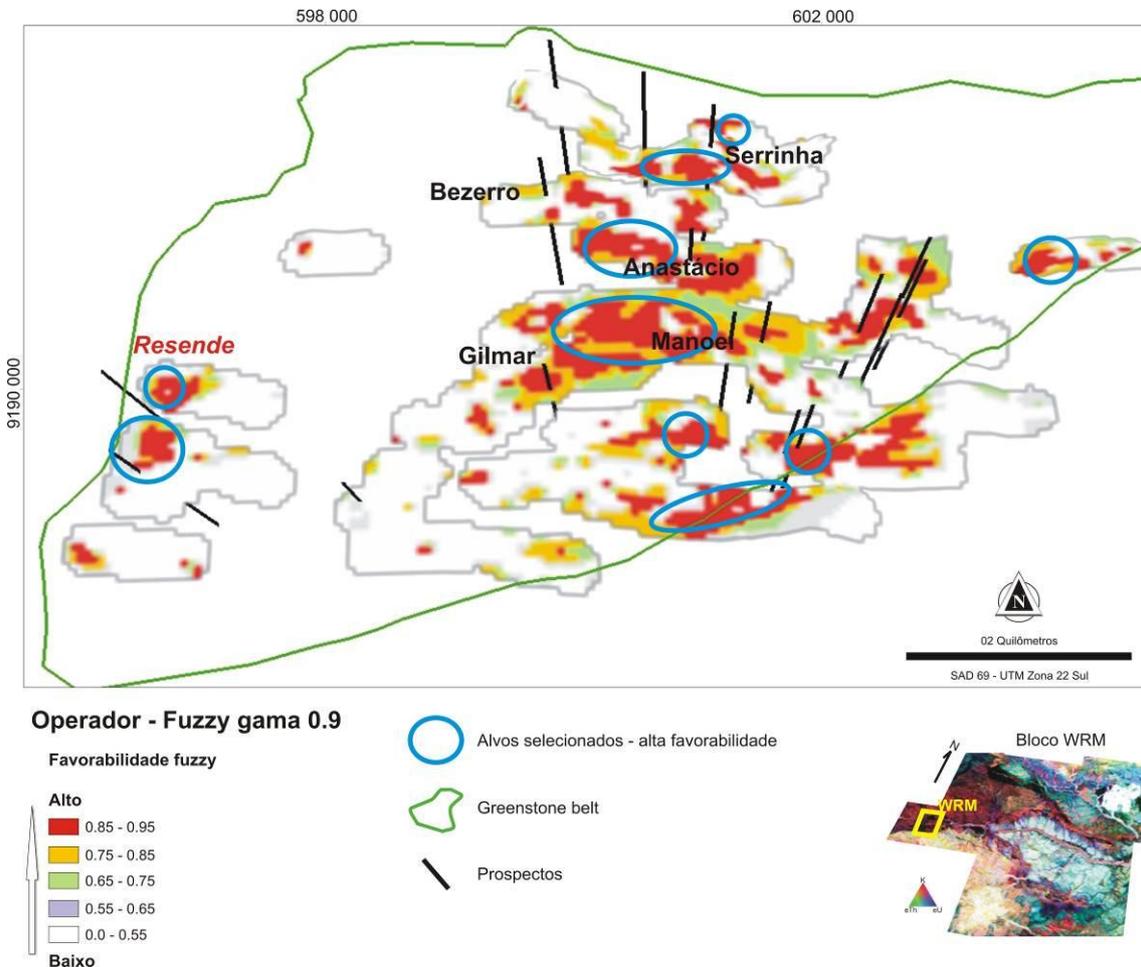


Figura 4.21 Mapa de favorabilidade aurifera em 2.5D para bloco Oeste Rio Maria usando o operador *fuzzy* gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preta) e os círculos em azul com os alvos com maior favorabilidade.

4.4.3.4. Bloco Malvinas (Votuporanga)

O modelo do bloco Malvinas possui, praticamente, a mesma sequência do bloco WRM, com exceção do operador *fuzzy large* para a razão K/Th (**Figura 4.22**). Para o bloco Malvinas foi empregado o modelo 01 (**Tabela 4.6**), com alta pertinência relacionada ao contato félsica/máfica. Os operadores *fuzzy* usados para os dados gamaespectrométricos foram *fuzzy large* para o parâmetro F e o potássio anômalo (Kd). Já o *fuzzy small* foi usado para o elemento Th. Em seguida foi empregado o operador *fuzzy AND* para os mapas evidenciais gamaespectrométricos. Para os dados magnetométricos gradiométricos foi usado o operador *fuzzy small* para a os produtos Gx e Gy, sendo posteriormente empregado o operador produto. O operador *fuzzy gama* levou em conta todos os operadores acima com parâmetro γ com valor 0.9.

Como no bloco WRM, a análise dos resultados desse bloco também mostram que a maior favorabilidade da área está associada a intrusivas félsicas. Alvos históricos da região, como Gerson, Américo e Pampeana foram mapeados com possibilidade *fuzzy* > 0.75 , ou seja, alta favorabilidade. O alvo Votuporanga, um dos principais alvos gerado pela interpretação geofísica (**Capítulo 03**), também foi evidenciado aqui com alta favorabilidade e oito novos alvos foram selecionados nesse bloco (**Figura 4.23**).

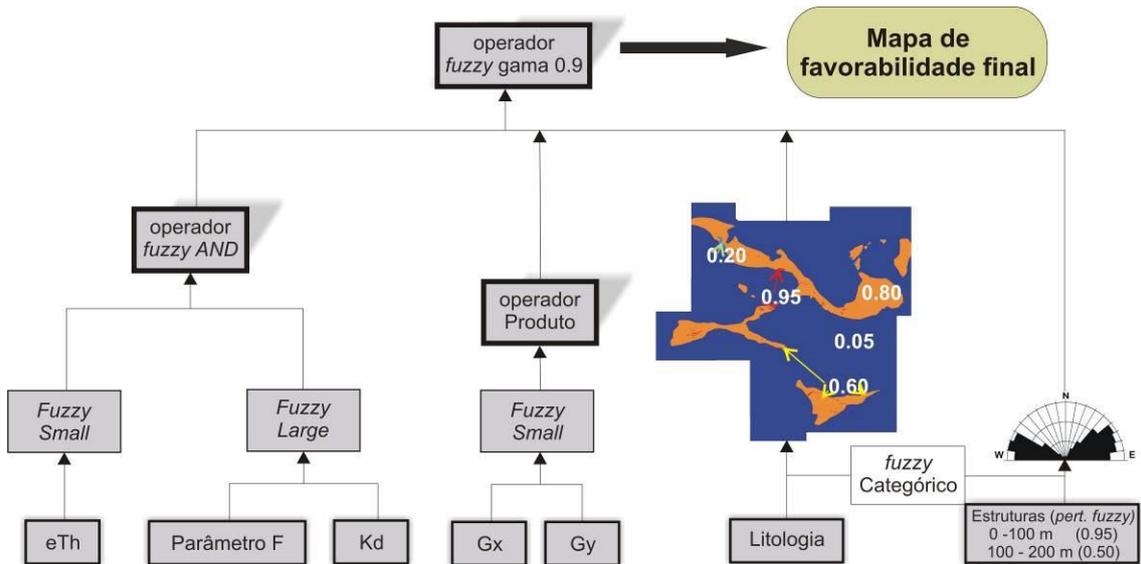


Figura 4.22 Fluxograma dos mapas evidenciais usados na lógica *fuzzy* para o modelo bloco Malvinas (Votuporanga).

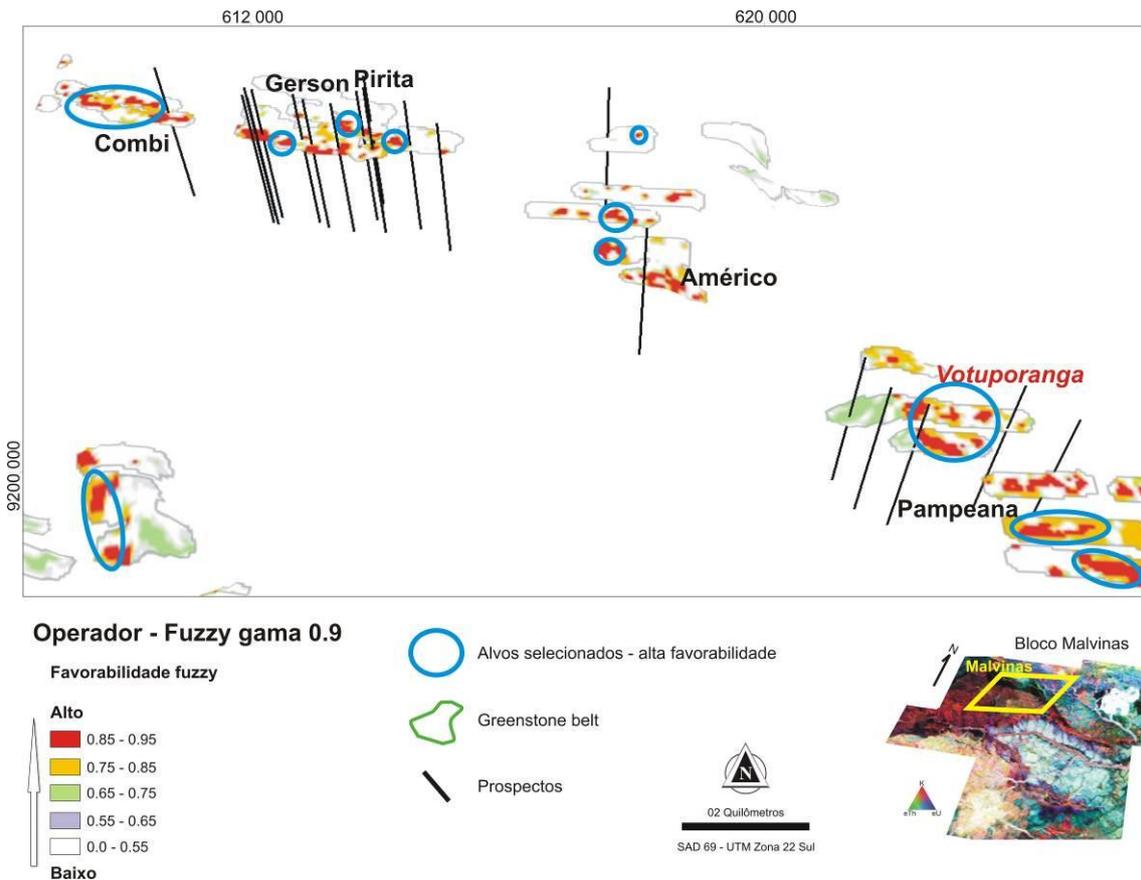


Figura 4.23 Mapa de favorabilidade aurífera para o bloco Malvinas em 2.5D usando o operador fuzzy gama (0.9). Em destaque os alvos já conhecidos (prospectos com barra preto) e os círculos em azul os alvos com maior favorabilidade.

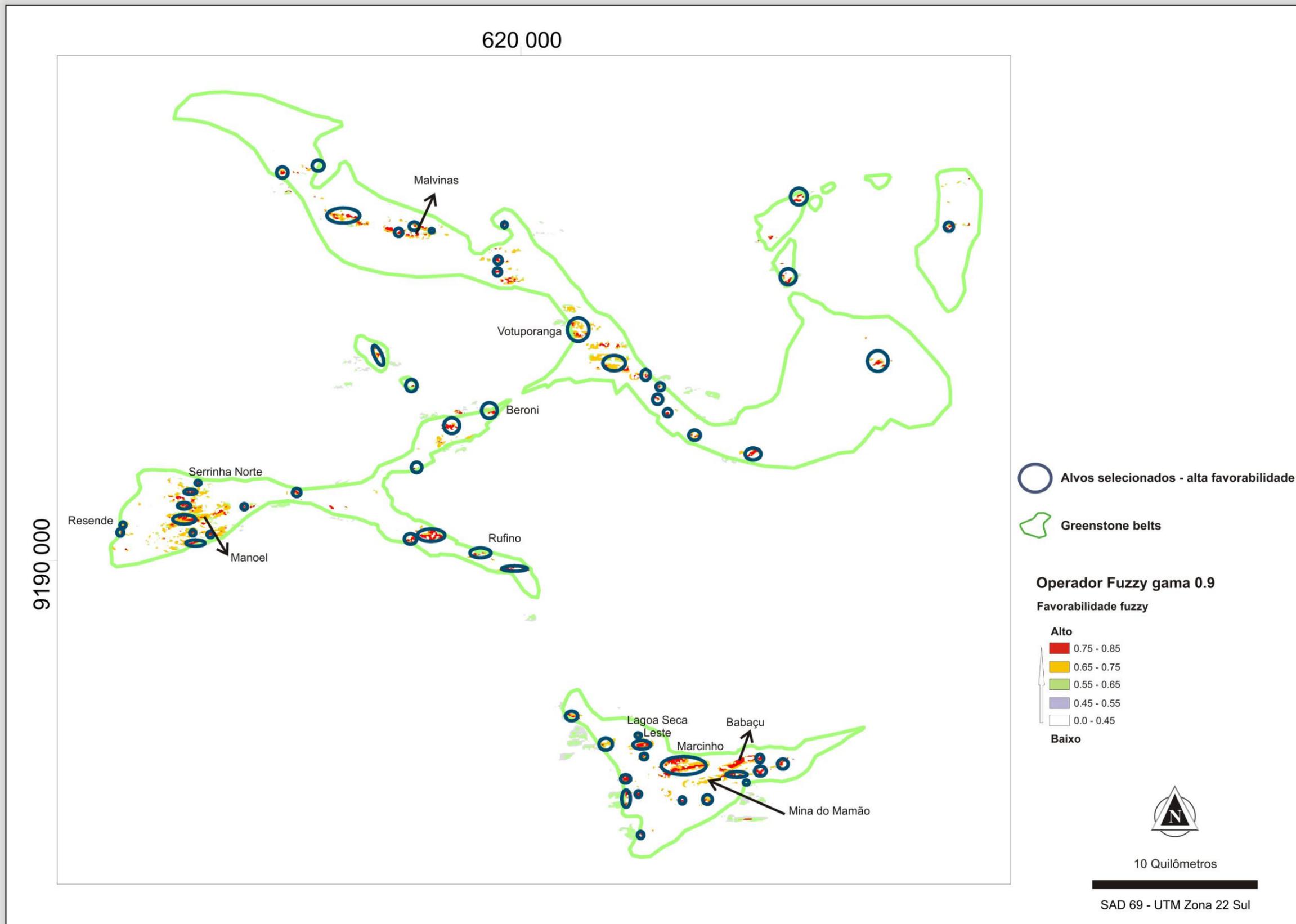


Figura 4.24 Mapa ilustrando o somatório dos três modelos *fuzzy* para a região do Projeto Andorinhas destacando a potencialidade aurífera para a região, considerando o somatório dos vetores de exploração.

4.5. VALIDAÇÃO DOS MODELOS EXPLORATÓRIOS

Com a análise visual dos dados aerogeofísicos magnetométricos e gamaespectrométricos de alta resolução e a modelagem espacial usando a lógica *fuzzy*, foram selecionados oitenta e cinco alvos, contudo alguns deles são coincidentes em ambos os modelos (**Figuras 3.21 e 4.24**).

Após a seleção dos alvos foi realizado um ranqueamento priorizando os alvos coincidentes dos dois métodos se seleção de área para validação no campo. O ranqueamento utilizou como base dados geoquímicos existentes (solo, rocha ou sedimento), ocorrências conhecidas, estruturas e geologia favoráveis, logística em relação à planta de beneficiamento. Após o ranqueamento, os principais alvos foram checados em campo com trabalhos de *follow up* como mapeamento geológico, amostragem de rochas, amostragem de solo e coletas de sedimentos de corrente.

Para auxiliar o ranqueamento efetuou-se a interpolação de dados de sedimento de corrente do banco de dados da empresa Reinarda Mineração com 466 amostras. Os resultados mostraram a necessidade de adensamento em algumas áreas e efetuou-se uma campanha com 37 pontos cobrindo algumas drenagens de segunda ordem numa área com cerca de 15 km².

A **figura 4.25** mostra o grid dos dados interpolados contendo 502 amostras onde se percebe que os principais alvos validados estão sob à influência de drenagens anômalas à jusante ou a montante. Na porção sudeste do mapa, onde se localiza a Mina Mamão e o depósito Lagoa Seca, não há amostras de sedimento de corrente pois a área em si possui drenagens extremamente garimpadas com forte influência antrópica. Alguns alvos seriam mais bem validados se houvesse uma distribuição homogênea de amostras, são eles: os três alvos do extremo nordeste, o alvo Votuporanga (detalhado a seguir) e três outros alvos na porção centro leste da área.

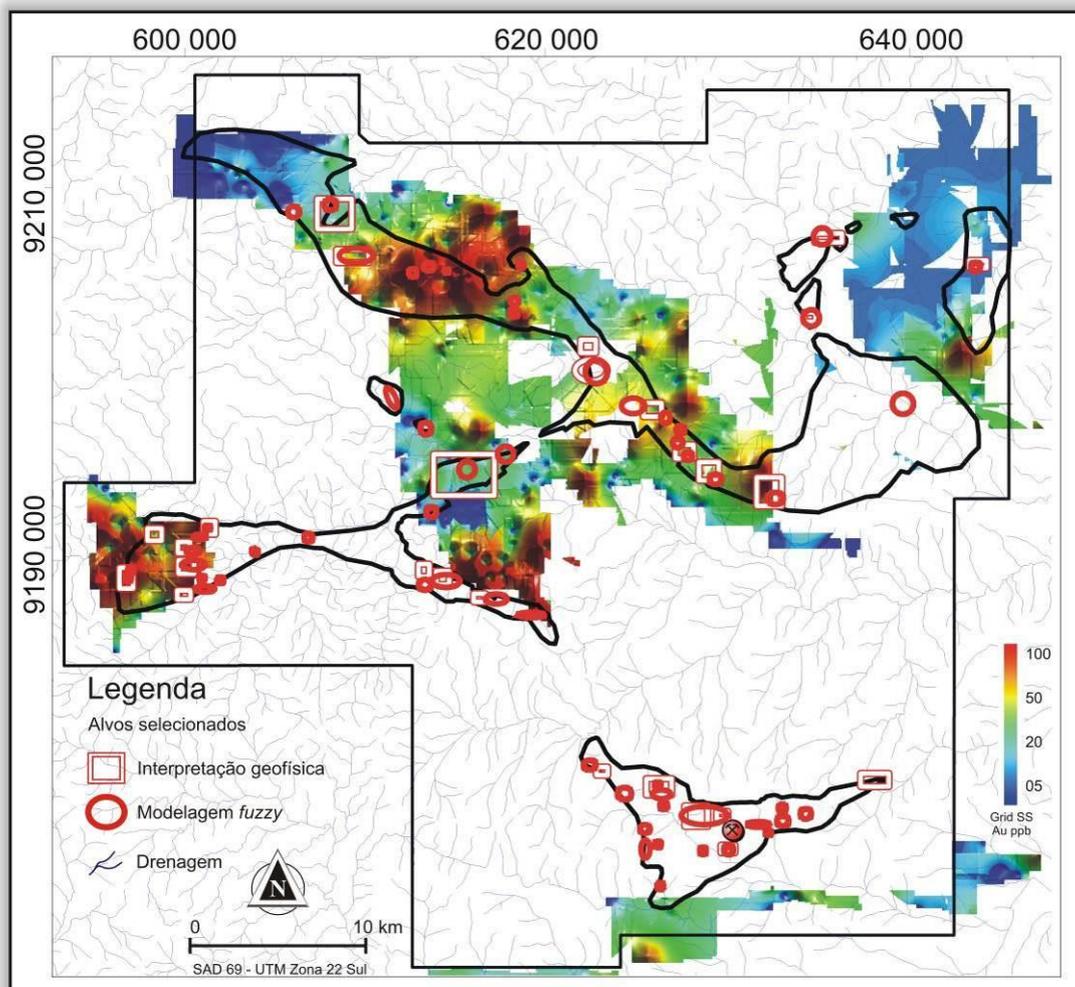


Figura 4.25 A imagem mostra o grid de ouro gerado a partir de dados de sedimento de corrente usando o inverso da distância ponderada com o posicionamento dos 85 alvos selecionados para serem validados. Os 85 alvos incluem os dois métodos, de interpretação e modelagem para a seleção de áreas prospectivas.

Depois de constatado algum potencial aurífero com a análise dos sedimentos de corrente partiu-se para a fase de prospecção com amostragem de solo, sendo primeiramente *grids* exploratórios espaçados de 200 m por 80 m e depois *infill* em porções que deram resultados anômalos com malhas de 100 m por 40 m. Nesse estudo serão apresentados apenas os melhores alvos pesquisados. Para uma melhor visualização e detalhamento, esses alvos foram separados em três blocos: Mamão, Oeste Rio Maria (WRM) e Votuporanga (**Figura 4.26**). Abaixo cada um deles serão detalhados.

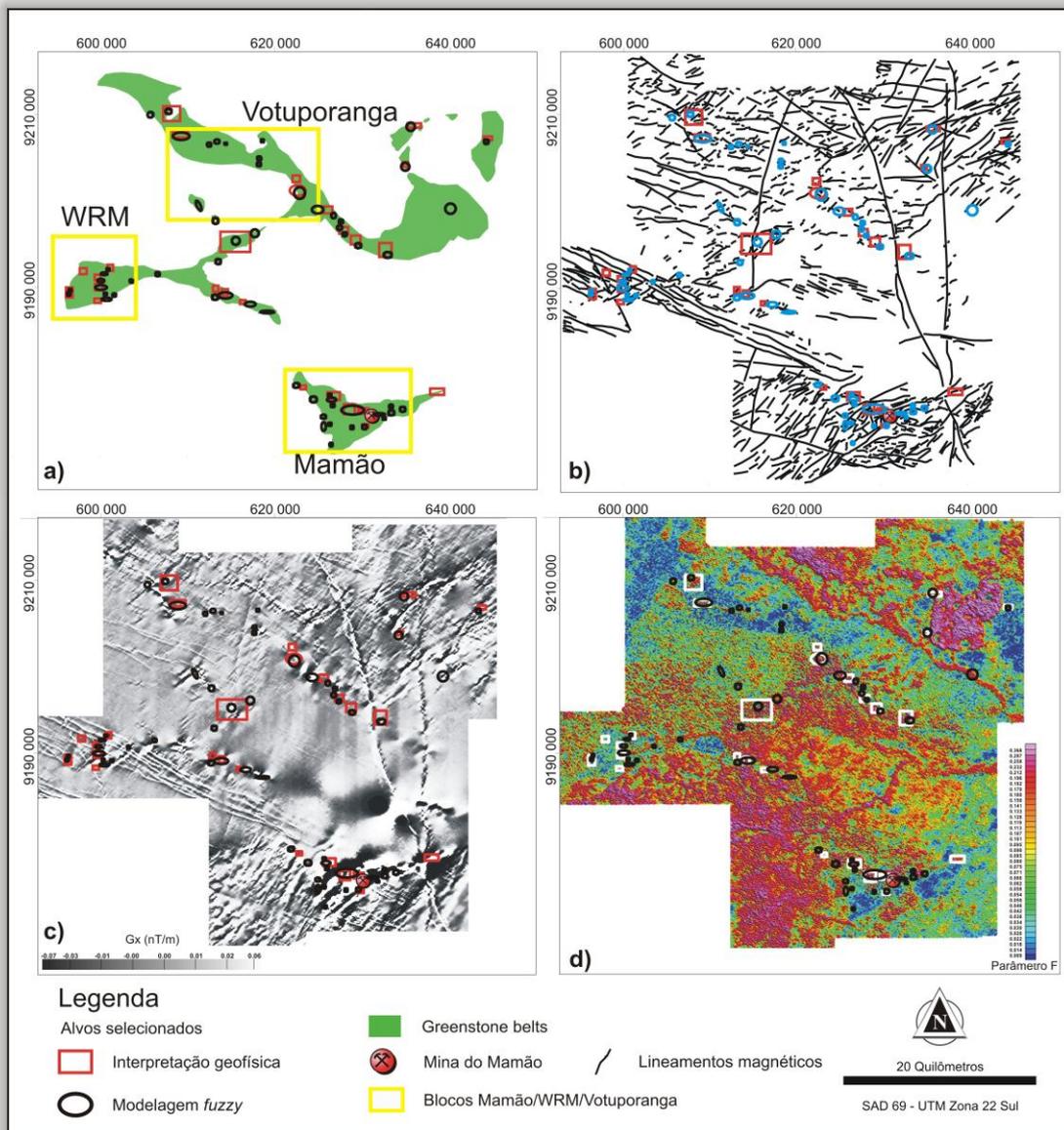


Figura 4.26 a) A figura mostra a distribuição dos blocos dentro da área de estudo e os alvos selecionados; b) A figura mostra os alvos selecionados confrontados com as estruturas mapeadas dentro do presente trabalho; c) imagem do gradiente horizontal em X medido a bordo da aeronave e d) imagem do parâmetro F integrado com os alvos mapeados nesse trabalho.

4.5.1. Bloco Mamão

O bloco Mamão está inserido no *greenstone* Andorinhas localizado na porção sudeste da área de estudo. Nessa região encontram-se diversos depósitos e a mina do Mamão de propriedade da Troy Resources NL da Austrália. Regiões hidrotermalizadas

são mapeadas ao longo da zona de cisalhamento e em rochas hospederias como as metamáficas (Mina Mamão e depósitos do *trend* Mamão/Babaçu), as formações ferríferas do Grupo Babaçu (alvo Marcinho) e os metassedimentos do Grupo Lagoa Seca (depósito Lagoa Seca).

Na região do Mamão existem diversas cavas garimpeiras e os principais depósitos e *trend* mineralizados, como o Mamão/Babaçu e o *trend* Lagoa Seca. Os primeiros trabalhos exploratórios começaram em 1973 pela extinta DOCEGEO (antigo braço exploratório da Vale S.A), com linhas regionais de amostragem de solo. Os primeiros resultados positivos encontrados na área do Babaçu resultaram na descoberta dos depósitos de Mamão e Lagoa Seca.

Em 1982 cerca de 10 mil garimpeiros invadiram a região e a DOCEGEO fechou as operações temporariamente. Posteriormente, um garimpeiro e também fazendeiro chamado Barbosa onde localiza-se o alvo, começou a explorar um dos corpos do Mamão (Melechete) abrindo uma galeria subterrânea com cerca de 130 m de profundidade vertical. Estima-se uma produção total de 2.500 quilos de ouro nessas galerias até 1986. Até 1994, a DOCEGEO investiu cerca de 15 mil metros em pesquisas de sondagem no alvo Mamão para a cubagem do depósito vendendo a área para a Golden Star Resources que, entre 1995 - 1997, continuou com as pesquisas na avaliação do potencial prospectivo para ouro nas rochas do Grupo Andorinhas. A empresa mapeou alvos importantes em trincheiras abertas no nível saprolítico.

A **figura 4.27** mostra os corpos da Mina do Mamão. A mina subterrânea é composta por três corpos mineralizados, sendo o principal Melechete, seguido do corpo M2 e um corpo menor chamado Arame. A lavra da mina é realizada de duas formas em corpos distintos: do tipo corte e preenchimento e câmeras e pilares.

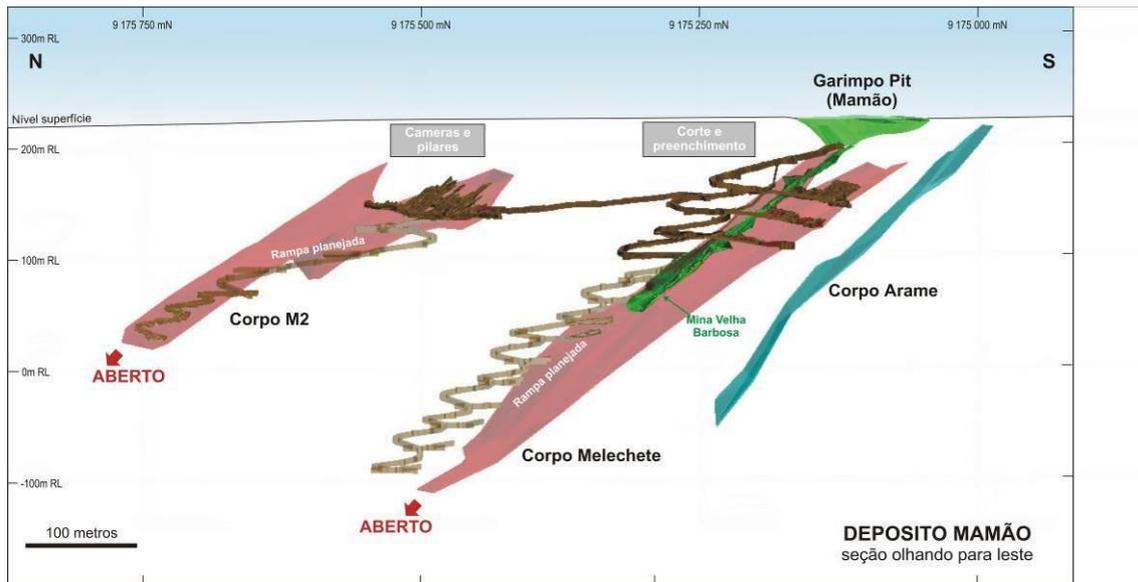


Figura 4.27 Figura em 3D da Mina do Mamão destacando os três corpos (*lode*) que estão sendo lavrados desde 2008. O Melechete é o corpo principal sendo garimpado no passado por garimpeiros da região em *open pit* (cor verde superfície) e também em galerias.

No bloco Mamão foram selecionados vinte e três alvos, sendo que parte deles foram checados no campo onde se constatou que as rochas hospedeiras estão bem cisalhadas, com ou sem alteração hidrotermal (**Figura 4.28**). Na validação, destacaram-se prospectivamente os alvos Lagoa Seca Leste e Marcinho. Ambos os alvos foram mapeados em detalhe com amostragem de rocha.

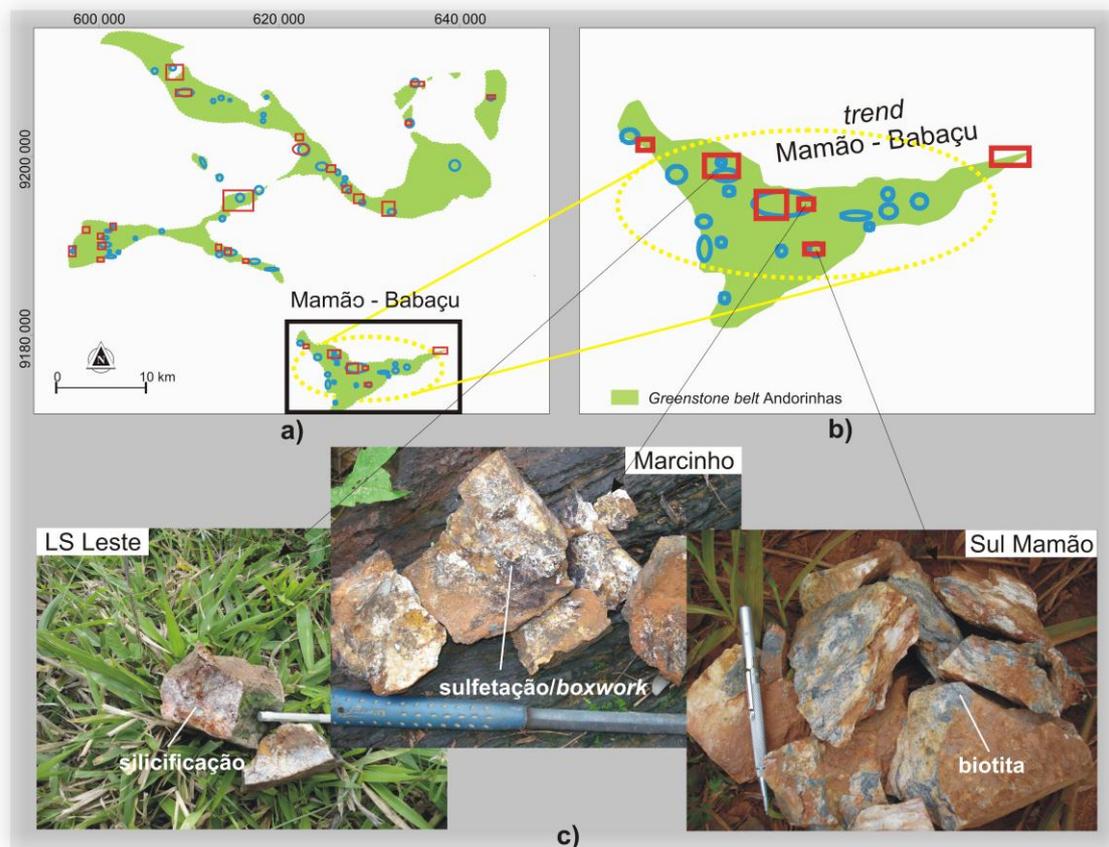


Figura 4.28 a) Localização do bloco Mamão no Greenstone Andorinhas; b) localização dos alvos selecionados no bloco, em vermelho alvos da interpretação geofísica, em azul alvos da modelagem *fuzzy* e c) fotos de amostras coletadas em campo durante mapeamento geológico mostrando rochas cisalhadas com alteração hidrotermal como biotitização, silicificação e sulfetação.

O perfil de linha de voo L12970 corta o alvo Marcinho e foi analisado conjuntamente com uma linha de amostragem geoquímica de ouro em solo com direção N-S. As amostragens da geoquímica foram realizadas a cada 40 m, enquanto as amostragens de dados magnetométricos e gamaespectrométricos equivalem, respectivamente, a aproximadamente 7.21 m e 72.10 m (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

A **figura 4.29** mostra o perfil geoquímico da amostragem de ouro em solo, de K, parâmetro F e do gradiente medido Gy. É possível verificar que o pico da anomalia de ouro, bem como a maior parte das amostras de solo anômalas, estão associadas aos baixos gradientes de direção NE-SW e médio/baixo valores do parâmetro F. O alto

potássio deve-se, provavelmente a contribuição de colúvio de filitos do topo do Grupo Babaçu aflorando ao longo da encosta da aba sul do sinclinal Andorinhas. Os altos valores da amplitude do gradiente horizontal total observados na imagem do AGHT de direção NE-SW correspondem a lentes de formação ferrífera bandada.

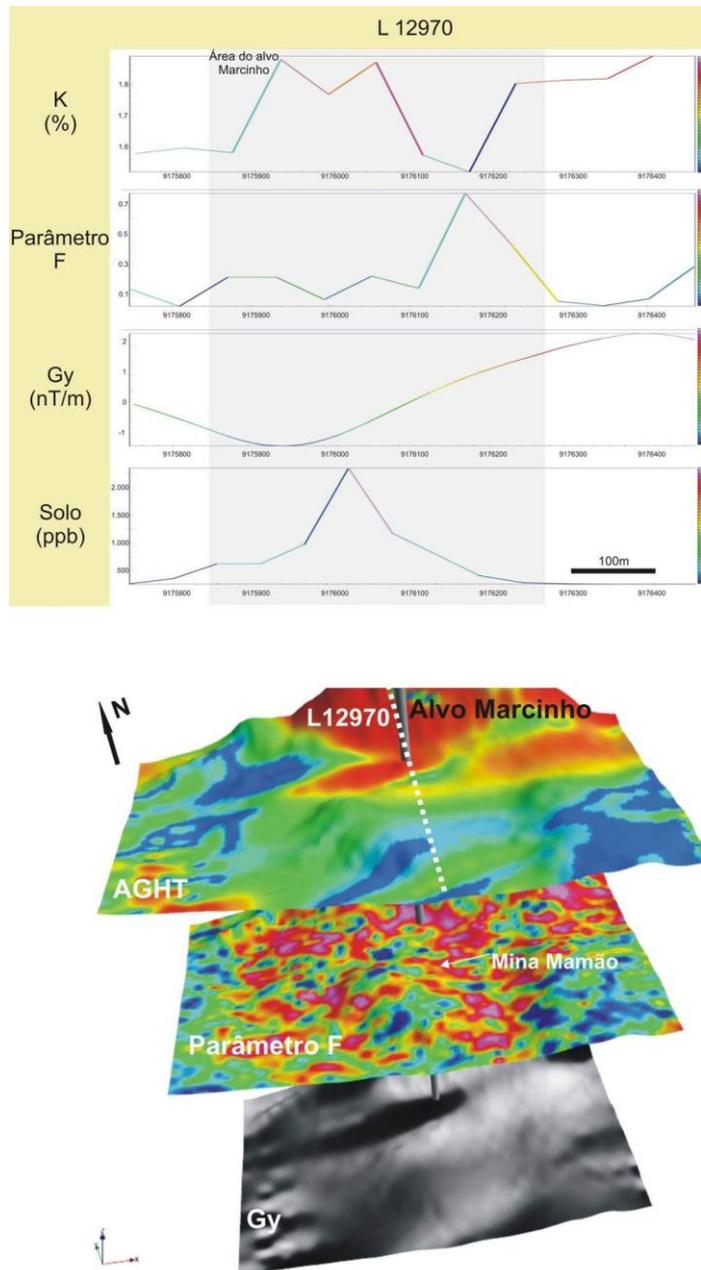


Figura 4.29 Os perfis ilustram dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gy) na linha de voo L12970 e da linha de amostragem de solo para ouro. Abaixo se destacam as imagens gamaespectrométricas e magnetométricas recortadas para a área de detalhe em 2.5D. O alvo Marcinho e a Mina do Mamão estão indicados nas imagens bem como o posicionamento da linha de voo.

4.5.3.1. Amostragem e Discussão

Um amplo programa de geoquímica de solo foi conduzido em boa parte do bloco Mamão recobrendo alguns dos alvos selecionados, principalmente os quatro alvos coincidentes gerados, bem como *infill* em alvos já conhecidos (**Figura 4.30**). O programa de solo sobre o alvo Lagoa Seca foi norteado por valores positivos de amostras de rocha. Já o *grid* de solo do alvo Marcinho foi conduzido apenas por respostas geofísicas e estruturas favoráveis usados nos modelos. A malha geoquímica é caracterizada por uma amostragem N-S a cada 40 m. A amostragem E-W foi realizada cada 200 m para reconhecimento e a cada 100 m para detalhe. Um total de 620 amostras foram coletadas, pulverizadas com 80# e analisadas para ouro somente (**Figura 4.31**).



Figura 4.30 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.

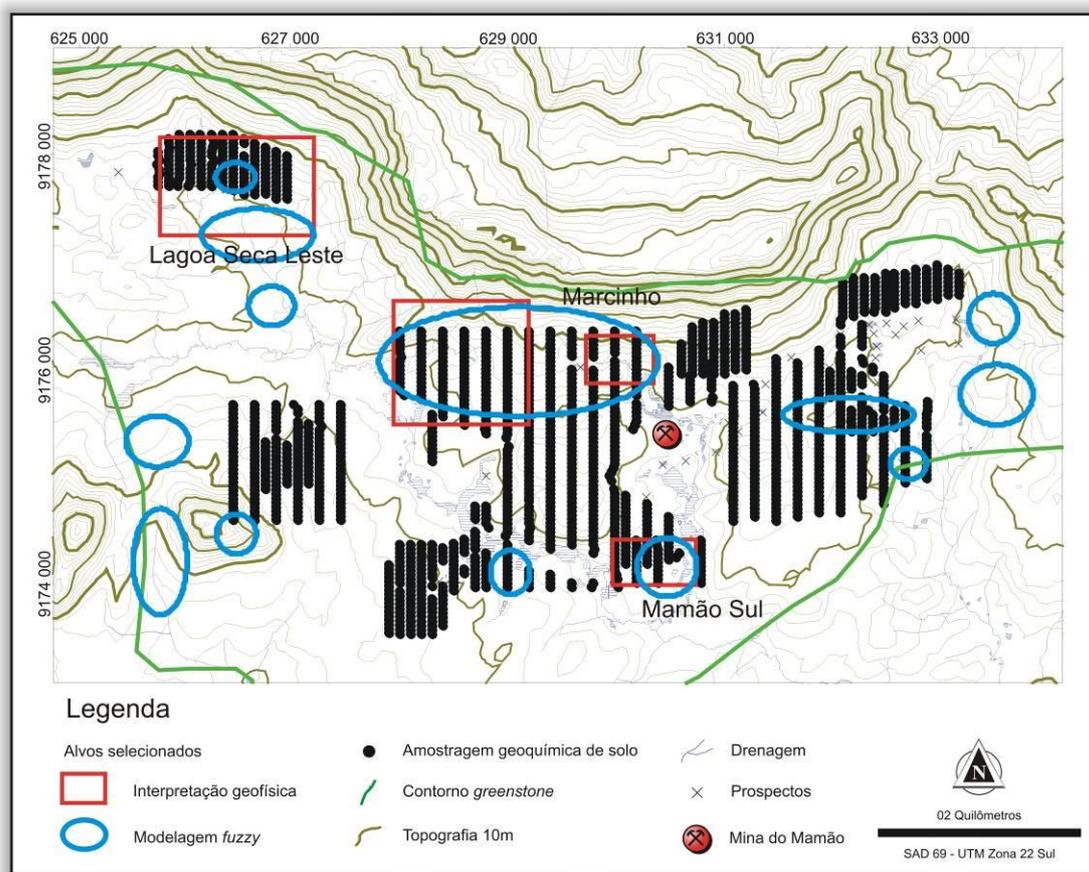
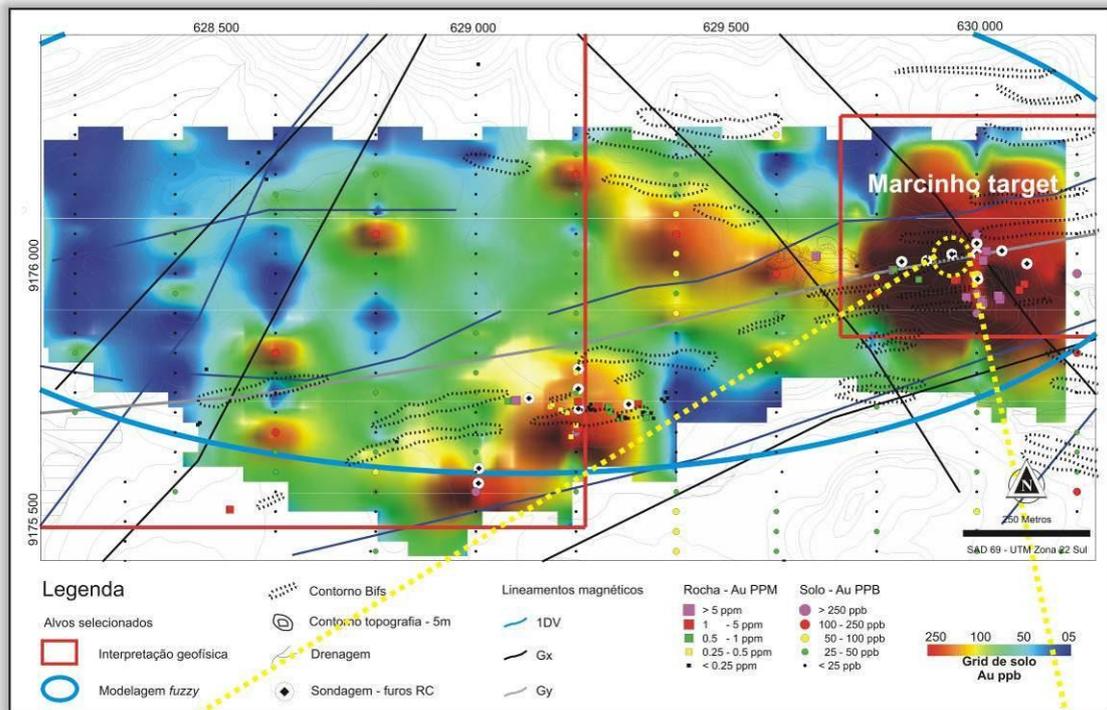


Figura 4.31 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre o bloco Mamão.

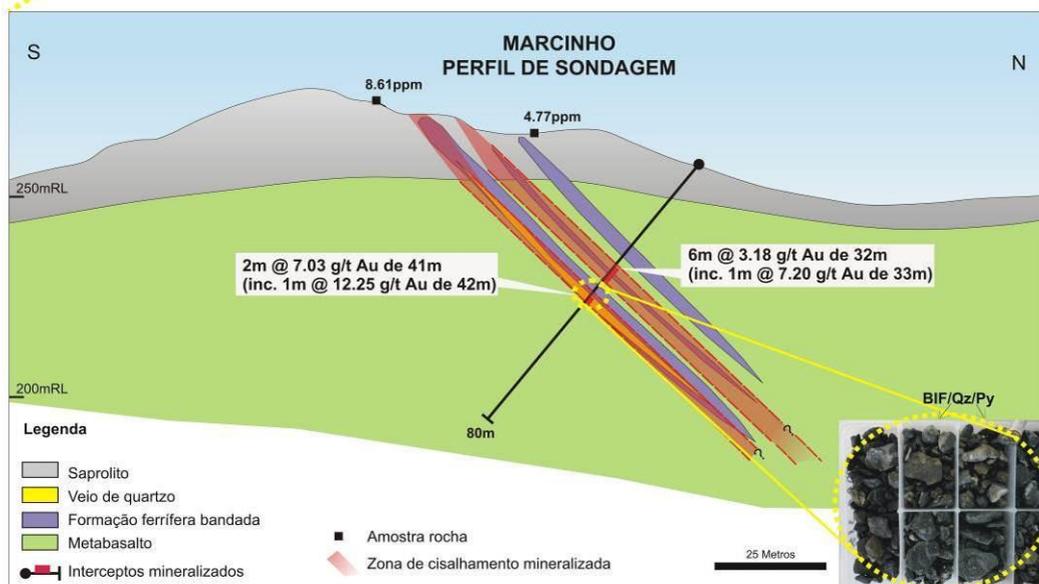
A malha geoquímica de solo confirmou *trend* anômalos em dois alvos selecionados, Lagoa Seca Leste e Marcinho. O alvo Marcinho localiza-se apenas 700 metros da mina do Mamão, sendo uma extensão de um garimpo antigo chamado Marcinho Pit ao longo de um corredor WNW. O alvo é estruturalmente controlado por estruturas NW-SE e NE-SW mapeadas claramente nas imagens dos gradientes G_x , G_y e da primeira derivada vertical do campo magnético anômalo. Está encaixado em metamáficas cisalhadas e intercaladas com espessas lentes de formação ferrífera bandada. A assinatura geofísica é associada a baixo gradiente G_y /alto G_x , e anomalias de potássio observadas na imagem do parâmetro F e canal do $K\%$ (**Figura 4.29**).

Uma vez que os trabalhos de prospecção como amostragem de rocha e solo realizados no alvo Marcinho foram favoráveis, iniciou-se um programa de sondagem com Circulação Reversa (RC - Reverse Circulation). O programa consistiu de oito furos espaçados de 50 m na porção principal do *trend* anômalo e mais sete furos num outro

trend anômalo para sudoeste (**Figura 4.32a**). Até o fechamento dessa dissertação foram realizados apenas seis furos dos quinze programados, sendo os seis na anomalia principal totalizando 476.6 metros. A análise dos dados obtidos a partir da sondagem mostram que a mineralização está associada com rochas metavulcânicas máficas e lentes de formação ferrífera bastante deformadas, com alteração hidrotermal acentuada. Observa-se piritização e veio de quartzo como mostra o perfil de sondagem da **figura 4.32b**. Um modelo em 3D do corpo mineralizado é apresentado na **figura 4.33** em duas direções de visada.



a)



b)

Figura 4.32 Validação alvo Marcinho. a) Mapa ilustrando grid das amostras de solo para Au do alvo Marcinho integrados com geoquímica de ouro em rocha, interpolado com o inverso da distância ponderada, bem como a programação de sondagem sobre dois principais *trends* anômalos. b) Perfil de sondagem ao longo da linha 629950 mE. Furo de circulação reversa (RC) com 80m de profundidade interceptando duas zonas mineralizadas associadas à formação ferrífera com sulfetação e veio de quartzo com ouro.

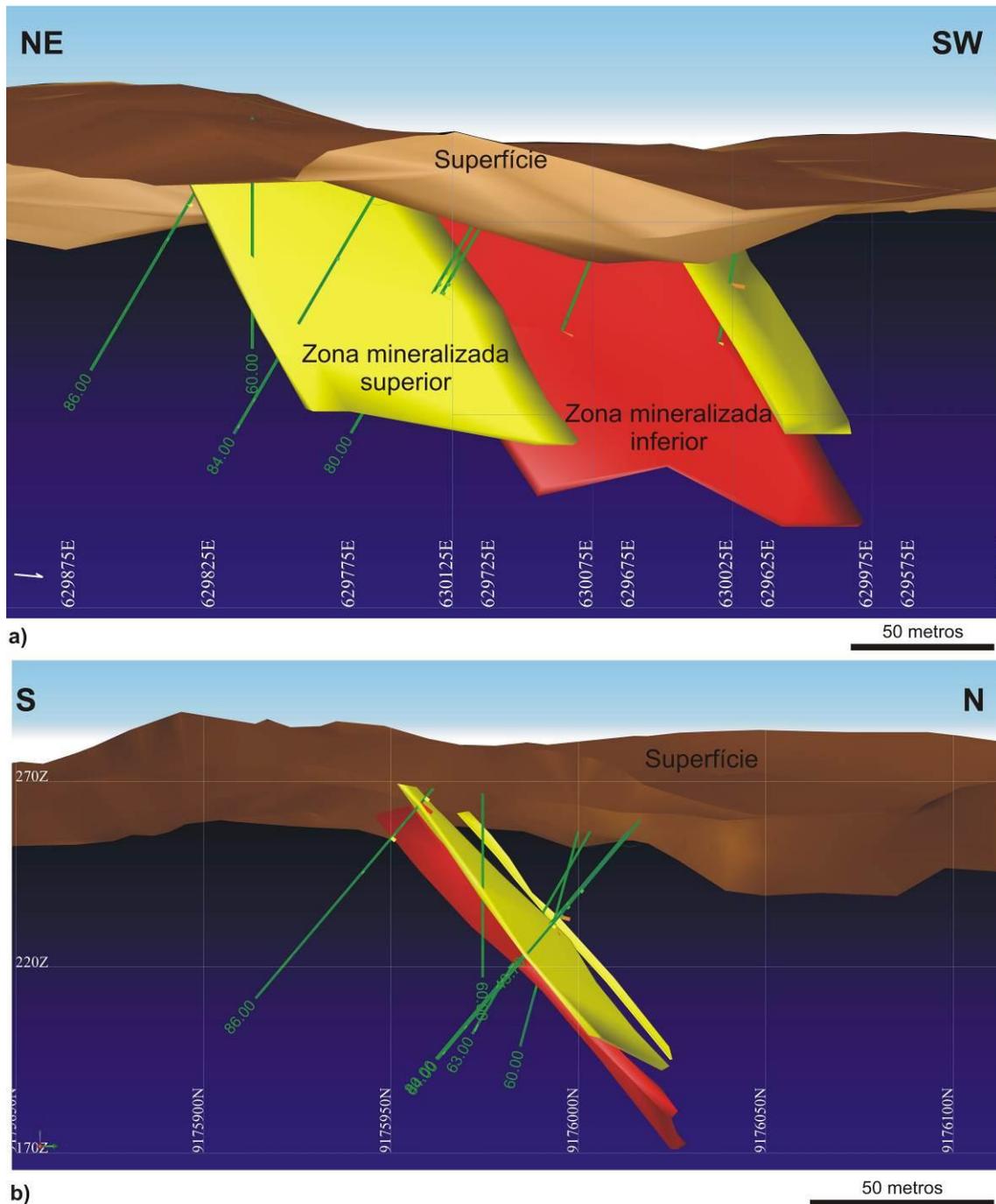


Figura 4.33 Imagem em 3D dos interceptos mineralizados do alvo Marcinho. a) visualização no sentido NE-SW, onde se observa as duas zonas mineralizadas e b) visualização de E para W, observa-se as duas zonas mineralizadas mergulhando aproximadamente 45° para norte.

4.5.2. Bloco WRM - Oeste Rio Maria

Dos oitenta e um alvos gerados no trabalho, dezessete deles se encontram nesse bloco. Na região existem diversas cavas garimpeiras sendo que as mesmas foram mineradas nos anos 80, onde milhares de garimpeiros se espalharam pela região em busca do metal. Dentre eles destacam-se os garimpos Serrinha, Bezerro, Anastácio e Manoel. Estes dois últimos ainda garimpados de forma artesanal por garimpeiros da região e os outros, esporadicamente usando um detector de metal, popularmente chamado de “piu-piu”.

Dentro desse contexto foram validados vários alvos, concentrando trabalhos em dois deles, onde se deu o nome de Resende e Serrinha Norte. Perto de ambos existem ocorrências de garimpo já conhecidas e cartografadas. No alvo Resende existem dois garimpos abandonados há aproximadamente vinte anos, e desconhecidos até a seleção da área como de alta favorabilidade. As cavas garimpeiras foram chamadas pela Troy/RML de Resende e Resende NW (**Figura 4.34a**). Já o alvo Serrinha Norte localiza-se a 4 km à oeste da cidade de Rio Maria e 400 m para norte do alvo Serrinha garimpado nos anos 80.

O alvo Resende localiza-se há aproximadamente 4.5 km a sudoeste do garimpo Manoel, ao longo do contato das rochas máficas do *greenstone* Rio Maria com os granitóides do Trondhjemito Mogno, caracterizado por quartzo-dioritos. Em uma das cavas há veios de quartzo leitoso com fraca sulfetação (pirita) de direção E-W com mergulho de 55° para norte concordante com a foliação (**Figura 4.34d**). Diversos blocos rolados de quartzo dentro da cava e nos arredores mostraram alto teor de ouro com presença de sulfetos como pirita, galena e calcopirita (**Figuras 4.34b e 4.34c**).

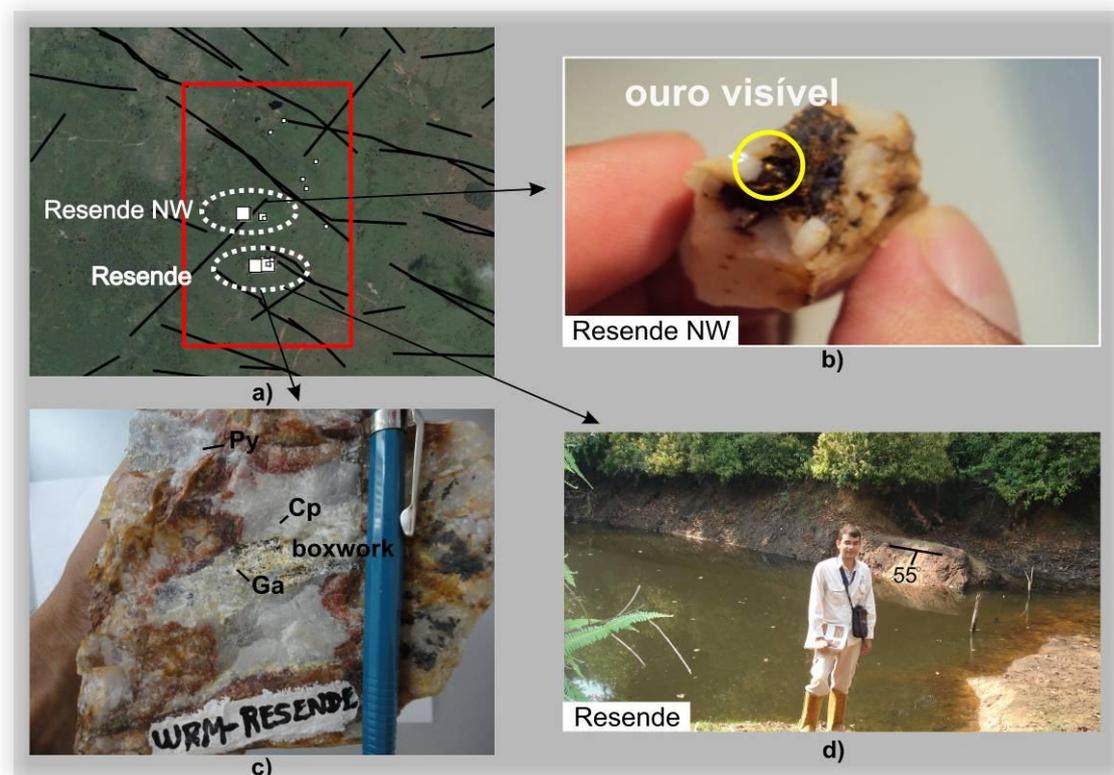


Figura 4.34 a) mapa de localização do alvo Resende mostrando as duas cavas garimpeiras descobertas neste estudo; b) bloco de quartzo com ouro visível; c) veio de quartzo com pirita (Py), calcopirita (Cp) e galena (Ga); d) Cava do alvo Resende mostrando a encaixante máfica cisalhada mergulhando 55° para norte.

4.5.3.2. Amostragem e Discussão

Após mapeamento de campo e amostragem geoquímica de ouro em rocha partiu-se para o programa de amostragem de solo (**Figura 4.35**). Uma malha geoquímica foi programada e executada sobre sete principais alvos mapeados dos dezessete gerados no bloco, tendo coincidência de 4 deles. Expressivos teores de ouro foram encontrados em amostras de rocha o que norteou o programa de solo. A malha geoquímica é caracterizada por uma amostragem N-S aproximadamente a cada 40 m. A amostragem E-W foi realizada a cada 200 m para reconhecimento e a cada 100 m para detalhe. Um total de 300 amostras foram coletadas e analisadas para ouro apenas (**Figura 4.36**).



Figura 4.35 Figura ilustrando amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML no bloco Oeste Rio Maria.

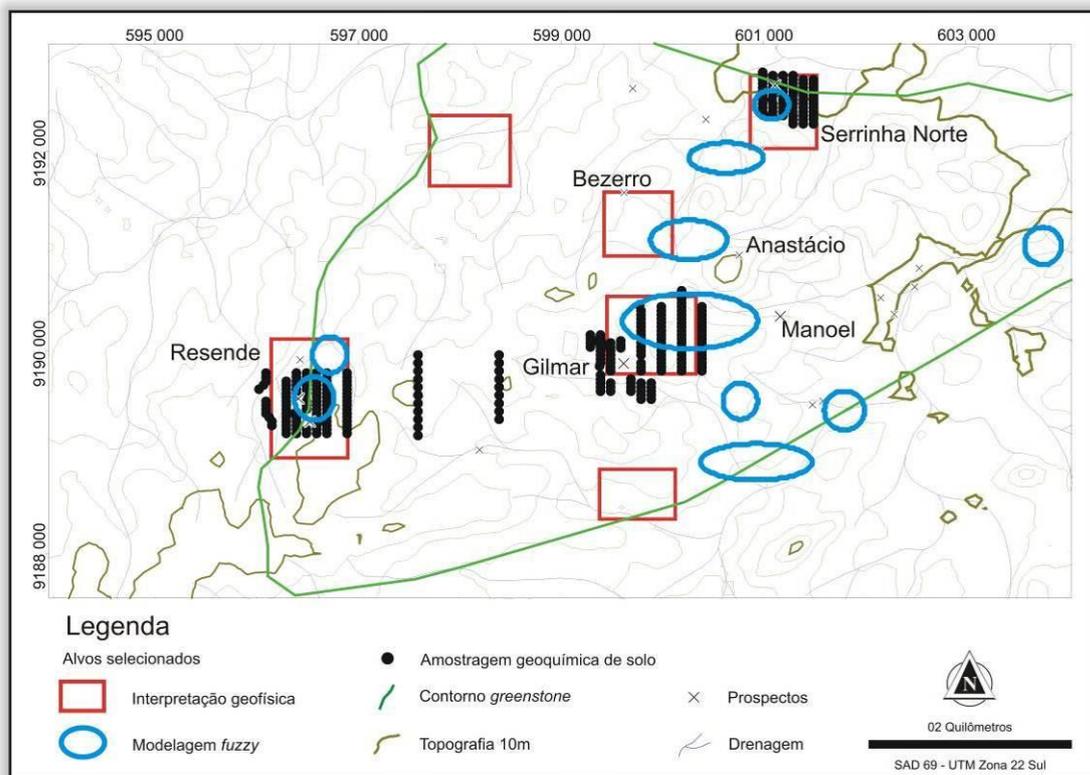


Figura 4.36 Malha de amostragem geoquímica de solo sobre os principais alvos selecionados no bloco Oeste Rio Maria.

Imagens gamaespectrométricas de detalhe foram geradas usando o interpolador curvatura mínima para a região Oeste Rio Maria, a saber: K, eTh, eU. Com base na

análise dos canais gamaespectrométricos verifica-se que a região dos principais garimpos é caracterizada por valores médios de eTh, médios a altos valores de K (mas não compreende os pontos mais anômalos), e um padrão médio de eU. Analisando as figuras da razão K/eTh e da imagem do parâmetro F integradas com dados de geoquímica de ouro em rocha observa-se que várias amostras de rocha com teores acima de 1ppm são relacionadas à alto valores de potássio (**Figura 4.37**).

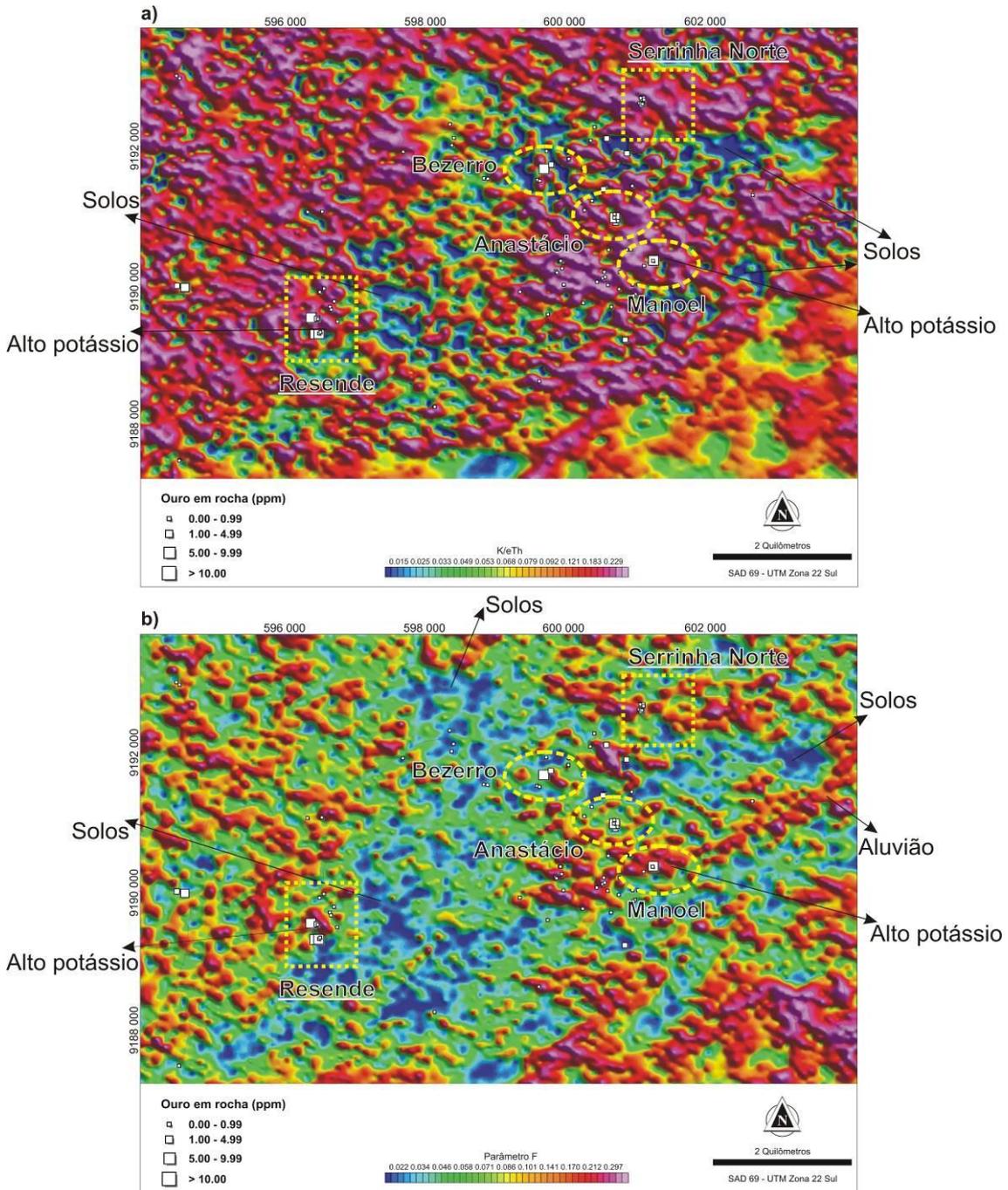


Figura 4.37 Imagens do parâmetro F (a) e da razão K/eTh (b) geradas na tentativa de realçar potassificação associada com processos hidrotermais. Dados de geoquímica de ouro em rocha estão apresentados por quadrados brancos. Amostras de rochas com altos teores de ouro, com até 70 g/t Au, validam o alvo Resende. As zonas de garimpo denominadas de Manoel, Anastácio e Bezerro também são mostradas.

Os dados gamaespectrométricos e magnetométricos foram analisados em perfis de linhas de voo, especialmente a linha L10290 que corresponde espacialmente com as amostragens N-S da geoquímica de ouro em solo (**Figura 4.38**). As amostragens da geoquímica foram realizadas entre 100 m e 40 m, enquanto as amostragens de dados aerogeofísicos equivalem, respectivamente, a 7.21 m e 72.10 m (Lasa Engenharia e Prospecções S.A. 2008).

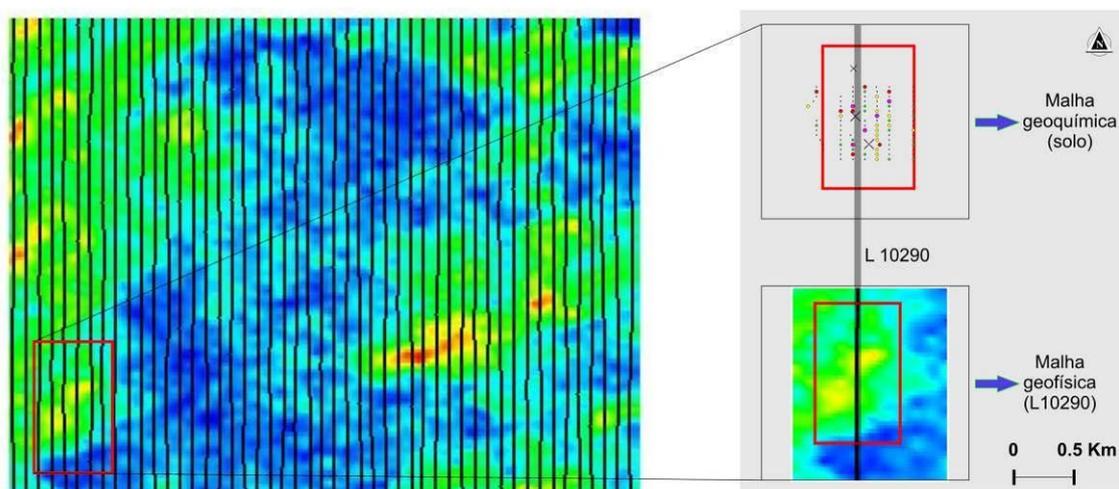


Figura 4.38 Imagem da Contagem Total com os traços das linhas de voo na região do alvo Resende. Em detalhe observa-se a linha de voo (L10290) que corta a área mineralizada e área a amostragem geoquímica (polígono em vermelho) e as linhas de amostragem geoquímica para ouro em solo.

A **figura 4.39** mostra os perfis do potássio anômalo (Kd), parâmetro F e do gradiente medido Gx, onde verifica-se de forma clara que o alvo Resende está associado a altos valores do parâmetro F, Kd e baixo gradiente medido Gx.

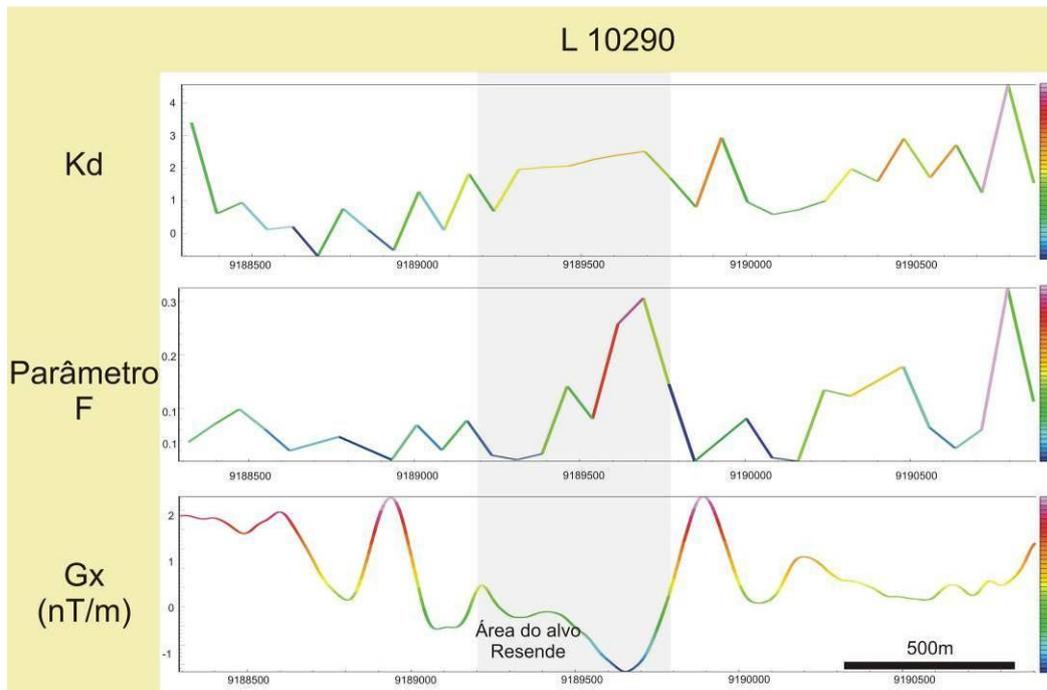


Figura 4.39 Dados gamaespectrométricos (Kd e parâmetro F) e de magnetometria gradiométrica (Gx) relacionados à linha de voo L10290. Destaque para a área do alvo Resende em cor cinza claro.

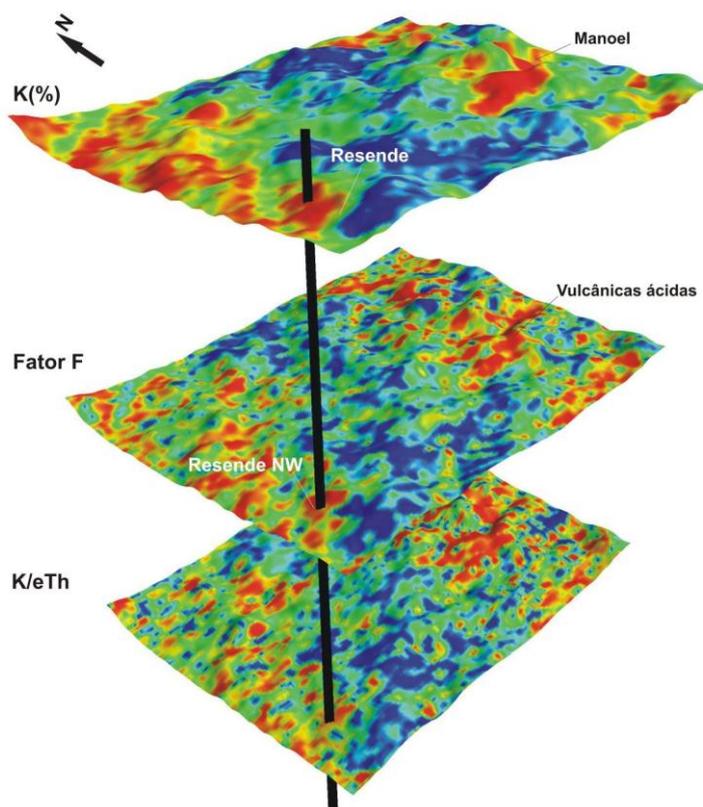


Figura 4.40 Imagem em 2,5D de dados gamaespectrométricos (K%, parâmetro F e razão K/eTh). Notar o alvo Resende NW e o alvo Resende ao lado.

Diferente do garimpo Resende NW, onde a concentração de potássio é alta, no alvo Resende, cerca de 100m para sul do Resende NW, a concentração de potássio é praticamente nula (**Figura 4.40**). Esse efeito, provavelmente, se deve a lixiviação uma vez que são mapeadas silicificações nos garimpos da região. Segundo Gunn *et al.* (1997), o elemento K é pouco resistente ao intemperismo, sendo assim o mesmo pode ser inteiramente lixiviado nas regiões de climas tropicais a subtropicais, razão pela qual as medidas gamaespectrométricas nessas regiões, em solos bem desenvolvidos e aluviões, podem registrar valores próximos de zero ou até zero.

4.5.3. Bloco Malvinas (Votuporanga)

O bloco Votuporanga localiza-se na porção centro-norte da área de estudo, sendo inserida na porção central do *greenstone* Identidade, distando cerca de 24 quilômetros da cidade de Rio Maria. Na área encontra-se o garimpo Pampeana

associado a veios de quartzo, bem como vários pequenos garimpos de aluvião e em paleoaluviões.

A área do bloco Votuporanga foi alvo de pesquisa em 1995 pela empresa Canyon Mineração do Brasil LTDA, onde os trabalhos exploratórios foram efetuados através de amostragem de solo e contagem de pintas de ouro em concentrados de bateia.

Em 2006, a empresa Horizonte Minerals fez mapeamento de detalhe e um programa de amostragem de solo com 400 metros de espaçamento entre linhas. Nesse contexto foram identificados zonas de cisalhamento ESE-WNW com forte alteração hidrotermal e veios de quartzo encaixados próximos ou nas zonas de contato entre metamáficas e intrusivas ácidas como quartzo pórfiro. Dentro do halo de alteração hidrotermal pode-se observar sulfetação com predomínio de pirita. A foliação regional é aproximadamente N70°W mergulhando entre 45°-65° para sul. As encaixantes geralmente são silicificadas com piritas disseminadas e *boxwork*. Em algumas amostras de veio de quartzo há ouro livre de granulação fina (**Figura 4.41**).

Regionalmente a área é afetada por estruturas de primeira ordem com direção NW-SE e estruturas menos relevantes NE-SW. Ambas as direções são cortadas por estruturas rúpteis tardias N-S. A região está inclusa no domínio de rochas vulcânicas do topo do grupo Babaçu, compostas por metapelitos e intrusões félsicas arqueanas (**Figura 4.10**).

4.5.3.3. Amostragem e Discussão

Após o mapeamento de campo e amostragem de rocha partiu-se para o programa de amostragem de solo (**Figura 4.42**). Uma malha geoquímica foi programada e executada sobre apenas dois alvos dos doze gerados no bloco, pois existem dados de ouro em solo disponíveis e efetuados pela RML/Troy e Horizonte Minerals. Essa nova malha geoquímica de solo foi gerada sobre 2 alvos coincidentes. Teores de ouro expressivos com até 19 g/t Au foram encontrados em amostras de rocha e norteou o programa de amostragem de solo através do adensamento (*infill*) de uma antiga malha aberta com 400 m de espaçamento. A malha geoquímica segue o padrão já apresentado com uma amostragem N-S aproximadamente a cada 40 m na linha e amostragem E-W a

cada 100 m (**Figura 4.42**). Um total de 200 amostras foram coletadas e analisadas para ouro apenas como mostra as linhas em vermelho da **figura 4.43**.

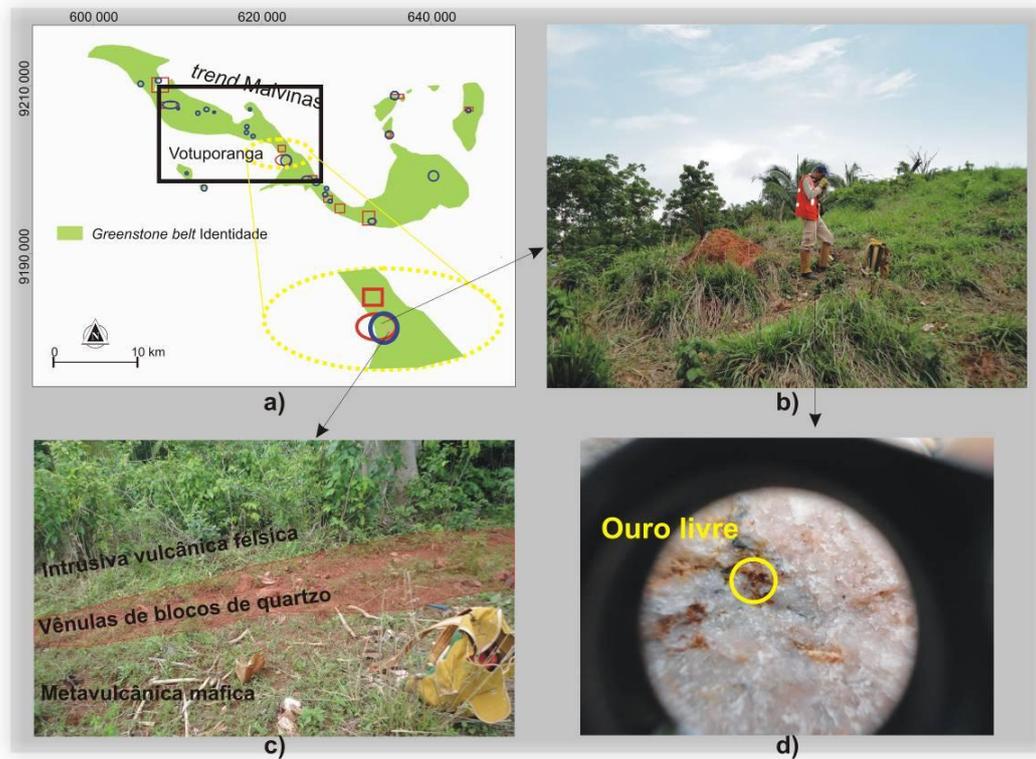


Figura 4.41 a) Localização do bloco Malvinas; b) Detalhe do alvo Votuporanga em dia de mapeamento geológico; c) Contato de vulcânicas máficas e ácidas associados a finas lentes de veio de quartzo mineralizados; d) Detalhe de um veio de quartzo com ouro livre, *boxwork* e sulfetos.



Figura 4.42 Amostragem de malha geoquímica de solo, feitos pelos funcionários da Troy/RML, sobre o bloco Malvinas, alvo Votuporanga.

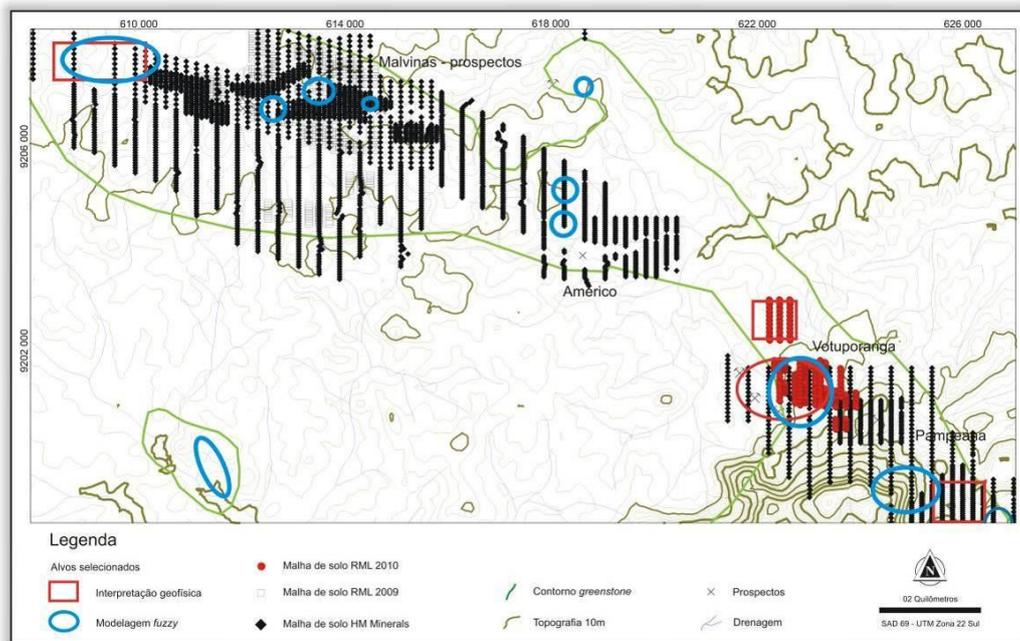


Figura 4.43 Malha de amostragem geoquímica de ouro em solo sobre dois dos doze alvos selecionados no bloco Malvinas (Votuporanga).

A malha geoquímica de solo, do alvo Votuporanga, confirmou *trend* anômalos ($> 100\text{ppb}$) com direção E-W e amostras de rocha (teores acima de 5 g/t Au) confirmaram um *trend* NW com 500 metros de comprimento ao longo do contato vulcânica félsica/máfica. No centro do alvo, dentro do círculo azul, foi mapeado e amostrado blocos de veio de quartzo com ouro visível (**Figura 4.44**). Em breve, uma programação de sondagem será proposta para essa área.

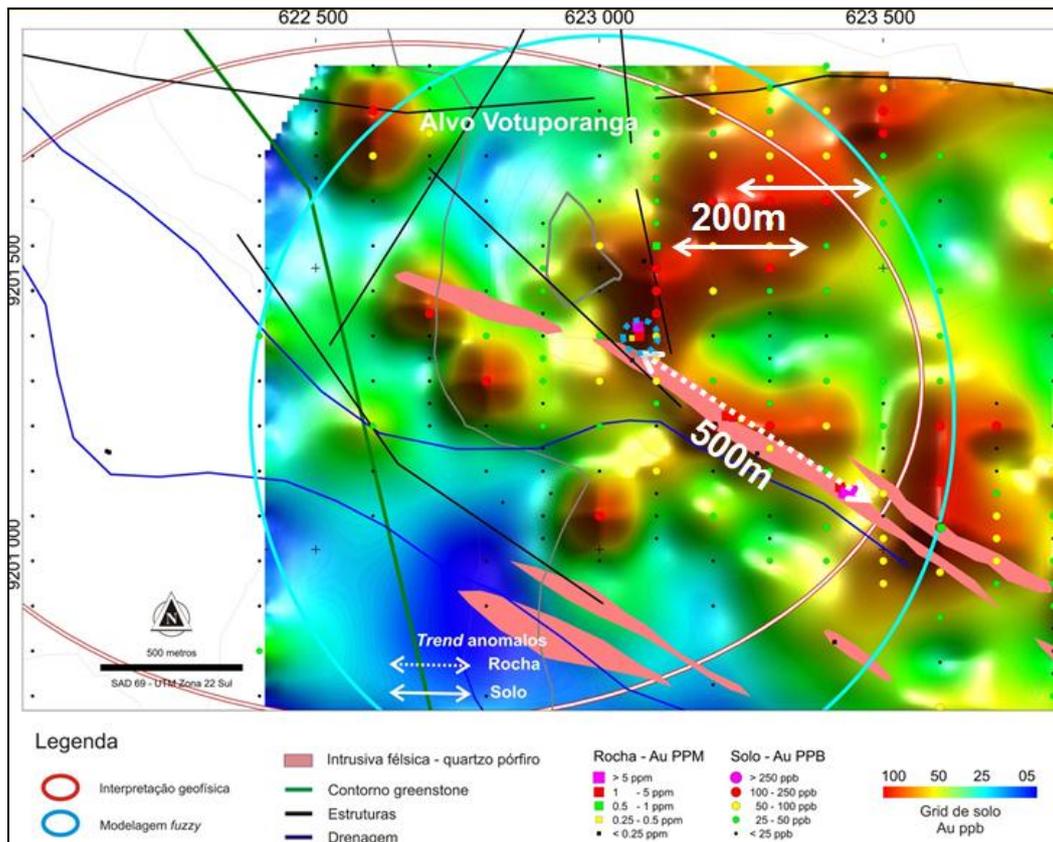


Figura 4.44 Detalhe da amostragem geoquímica de ouro em solo no alvo Votuporanga. Observa-se extensas áreas com teores anômalos maiores que 100ppb e amostras de rochas com ouro visível no centro da área em círculo azul.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados e considerações obtidos nesta dissertação de mestrado visam contribuir para a seleção de alvos para prospecção de ouro na porção sudeste do Terreno granito-*greenstone* Rio Maria.

O presente estudo teve com alicerce principal a aplicação de dados aerogeofísicos magnéticos gradiométricos e radiométricos de alta resolução. Os produtos derivados foram essenciais para o refinamento da cartografia geológica na Província Rio Maria, bem como eficientes no realce de estruturas e porções hidrotermalizadas favoráveis para hospedar mineralizações auríferas. Esses dados permitiram refinar os vetores de exploração já conhecidos na área de pesquisa.

A interpretação dos produtos derivados do campo magnético anômalo realçam extensos lineamentos em diversas direções, predominando longos lineamentos de primeira ordem com direção NW-SE cortando estruturas NE. Estruturas E-W de segunda ordem também são mapeadas, bem como estruturas N-S tardias. A integração dos vários produtos derivados do campo magnético anômalo e os gradientes medidos permitiram refinar o arcabouço estrutural do Projeto Andorinhas e o entendimento de zonas metalogenéticas potenciais.

Para o refinamento da cartografia geológica e, posteriormente, aplicação para fins prospectivos efetuou-se a interpretação das diferentes classes observadas na composição ternária RGB (KThU). Um mapa geológico-geofísico integrado foi gerado com as unidades interpretadas, sendo que parte delas não possui correspondência com os dados geológicos disponíveis e foram checadas em trabalho de campo. Importante observar que a área da Sequência Vulcano-sedimentar interpretada no produto em apreço é maior que a conhecida na literatura. Sugere-se uma validação de detalhe com trabalho de campo e estudos petrográficos, pois caso seja confirmada, isto aumentaria a potencialidade da área da Província Rio Maria no que tange a discriminação de rochas hospedeiras potenciais.

A análise visual dos dados aerogeofísicos processados mostrou-se eficiente na geração de alvos prospectivos para ouro, sendo que cerca de 18 deles foram coincidentes com a modelagem espacial.

A modelagem espacial, usando a lógica *fuzzy* foi empregada em toda a área e, posteriormente, em três áreas com maior detalhe. As modelagens levaram em conta dois modelos: relacionado à mineralização em contato com unidades félsicas e máficas e

mineralização aurífera associadas à formação ferrífera e máficas. Nos modelos foram usados produtos derivados dos dados aerogeofísicos tais como parâmetro F, razão K/eTh, gradientes horizontais medidos Gx e Gy, amplitude do sinal analítico e estruturas com direção preferencial aproximadamente E-W.

A modelagem regional mapeou vários prospectos conhecidos, bem como selecionou novos alvos. Para as áreas detalhadas e aqui denominadas blocos Mamão, Oeste Rio Maria (WRM) e Malvinas obteve-se os seguintes resultados utilizando a lógica *fuzzy*:

- Bloco Mamão: dados de campo e interpretação das estruturas pela magnetometria mostram que os principais depósitos do bloco estão alojados em estruturas de segunda ordem com direções preferenciais E-W dentro de grandes corredores estruturais de cisalhamento. A mina do Mamão está alojada ao longo de uma estrutura de segunda ordem com três quilômetros de extensão e direção aproximada ENE-WSW. A rocha hospedeira da mineralização desse bloco é relacionada à vulcânica máfica e formação ferrífera bandada. Pontualmente, em campo, observa-se que os corpos mineralizados estão espacialmente distribuídos ao longo da direção E-W dentro do corredor de cisalhamento NE.
- Bloco WRM - Oeste Rio Maria: as imagens dos gradientes medidos Gx e Gy realçam as feições das direções das principais estruturas com maior precisão quando comparadas com os produtos calculados a partir das derivadas horizontais de primeira ordem do campo magnético anômalo. Confluência de feições lineares de baixo gradiente nas direções NE-SW e NW-SE (primeira ordem), bem como estruturas com direção preferencial ENE-WSW de segunda ordem foram interpretadas como de alta prioridade para a exploração de ouro. Estruturas ENE-WSW estão espacialmente relacionadas com unidade geofísica de alto K, onde se inserem as principais ocorrências auríferas conhecidas, como por exemplo, as denominadas Manoel e Gilmar. Localmente, como no bloco Mamão, os corpos mineralizados possuem *strike* E-W. Essas unidades de alto K estão extremamente alteradas hidrotermalmente dificultando a identificação do protólito. Estes protólitos podem ser vulcanoclásticas ou rochas metassedimentares do topo do Grupo Babaçu;

- Bloco Malvinas – Votuporanga: interpretação da magnetometria mostra que extensas estruturas de primeira ordem (NW-SE) com estruturas secundárias ESE-WNW predominam nesse bloco. Extensos *sills* de quartzo pórfiro intrusivos dispõem-se ao longo da direção NW-SE. Zonas de cisalhamento associadas ao contato intrusivas félsicas e encaixante máficas são mapeadas em praticamente todo o bloco ao longo dessa mesma direção. Da mesma forma, a imagem do parâmetro F evidencia unidades geofísicas de alto K ao longo da direção NW. Localmente, como nos outros blocos, os corpos de minério possuem *strike* E-W.

A técnica de modelagem espacial testada aqui provou ser uma ferramenta eficiente para os geólogos de exploração integrar dados de diversas fontes geocientíficas. Diversos novos alvos foram gerados e diversos prospectos conhecidos foram mapeados. O método conceitual lógica *fuzzy* é uma ferramenta flexível para testar modelos de exploração com grandes conjuntos de dados de uma maneira de fácil compreensão. As incertezas da modelagem *fuzzy* podem ser difíceis de estimar, uma vez que não é fácil avaliar a magnitude do efeito de classificação (ou seja, como os valores de pertinência *fuzzy* foram atribuídos) e também, o efeito da escolha dos operadores *fuzzy* utilizada na integração de dados. Porém, um processo de validação por especialistas, em muitos casos, é apropriado e pode levar a confirmar os resultados obtidos. Os resultados obtidos nessa pesquisa foram validados com mapeamento de detalhe, *follow up* de solo, sedimento de corrente e amostras de rocha. Até o momento, os 20 alvos mais favoráveis foram validados com trabalhos de campo e prospecção geoquímica. Alvos confirmados com boas respostas geoquímicas de solo e rocha foram testados com furos de sondagem. Até o fechamento dessa dissertação cerca de 476.6 metros de sondagem com circulação reversa foram executados, pela Troy/RML no primeiro alvo, delimitando uma direção (*strike*) E-W com dois corpos do tipo *lode* mineralizados. Estimativas preliminares indicam um recurso inferido de aproximadamente 8.000 oz de ouro.

Os resultados integrados e os mapas prospectivos com os 81 alvos gerados na área de estudo permitem a tomada de decisão local, como locações de furos de sondagem em todos os três blocos. Os resultados obtidos com a validação dos alvos mapeados nesse trabalho permitirão a geração de novos modelos através da aplicação de

ferramentas de análise espacial dirigidas pelos dados (*Data-driven*) como peso de evidências e redes neurais artificiais.

Recomenda-se o desenvolvimento de outros trabalhos envolvendo o uso de imagens de radar (SAR-R99B) objetivando o reconhecimento geológico estrutural de outras regiões do Terreno granito-greenstone Rio Maria. Uma metodologia que pode ser utilizada com sucesso para a caracterização de ambiente mineralizados consiste na determinação de propriedades petrofísicas, uma vez que auxiliará de maneira mais robusta a identificação das principais características de um depósito e posterior seleção de métodos geofísicos mais adequados a se empregar, conforme recomendado por Robert *et al.* (2007).

A aplicação dos dados aerogeofísicos magnetométricos gradiométricos e gamaespectrométricos com espaçamento de 125 metros da área de estudo, adquiridos pela Troy/Reinarda Mineração com um custo de R\$ 750 mil, mostrou uma excelente eficácia para prospecção de mineralizações auríferas do tipo *lode*. Foi possível não só refinar dados geológicos, bem como selecionar alvos nas áreas de interesse. No entanto, outros métodos podem ser aplicados para complementar esse estudo e aumentar as chances de sucesso exploratório. Atualmente, a empresa está preparada para sondar e avaliar os dados obtidos e seria interessante a aplicação de dados eletromagnéticos no domínio tempo a bordo de helicóptero (HTEM). Esses dados permitem utilizar o conceito de *fly-to-drill* em exploração mineral. Nesse sentido, o método mais indicado seria o VTEM (*Versatile Time domain eletromagnetics*).

Essas considerações, somadas aos bons resultados obtidos nesta dissertação, confirmam a excelência de dados aerogeofísicos nas investigações geológicas, motivando pesquisas de mapeamento regional/local e de exploração mineral com base nas geotecnologias podendo-se replicar em outros terrenos granito-*greenstone* que hospedem mineralizações auríferas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B.B. & FUCK, R., 1981. Brazilian structural provinces, an introduction. *Earth Sci. Rev.* 17, 1–29.
- ALMEIDA, J.A.C., DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA, D.C. 2006. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 36: 282-295.
- ALMEIDA, J.A.C., GUIMARÃES, F.V., DALL'AGNOL, R. 2007. Petrologia magnética do granito anorogênico Bannach, terreno granitogreenstone de rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1): 17-36.
- ALTHOFF, F.J., 1996. Etude petrologique et structurale des granitoides de Marajoara (Pará, Bresil); leur role dans l'évolution archeenne du craton amazonien (2.7–3.2 Ga). Doctorate Thesis, Université Henri Poincaré, Nancy. p. 296 (Unpublished).
- AMARAL, G. 1974. Geologia pré-cambriana da região Amazônica. Tese de livre docência. São Paulo. Instituto de Geociências, USP.
- AN P., MOON W.M., RENCZ A. 1991. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 27(1): 1-11.
- ARAÚJO O.J.B., MAIA R.G.N. 1991. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás; Subprojeto Recursos Minerais; Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará. DNPM/CPRM, Brasília, p.136.
- ARAÚJO, O.J.B., MACAMBIRA, E.M.B., VALE, A.G., OLIVEIRA, J.R., SILVA NETO, C.S., COSTA, E.J., SANTOS, A., PENA FILHO, J.I.C., NEVES, A.P., JOÃO, X.S.J. & COSTA, J.B.S. 1994. Primeira integração das investigações geológicas do Programa Grande Carajás na região SE do estado do Para. In: SBG, Simp Geol Amaz, 4, Belém, Anais, p 299-300.
- ARAÚJO, O.J.B., MAIA, R.G.N., JOÃO, X.S.J. & COSTA, J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Carajás. Inc Simp. Latino Americano Geol, 7, Belém, SBG, proceedings, vol-1, pp:324-333.
- BARBOSA, O., RAMOS, J.R.A, GOMES, F., e HELMBOLD, R. 1966. Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia. MME-DNPM-DGM, Rio de Janeiro, monografia 19, 95p.
- BLUM, M. L. B. 1999. Processamento e Interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil Central e sua aplicação à Geologia regional e à prospecção mineral. Brasília. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UnB, 229p.
- BONHAM-CARTER, G.F., 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Pergamon, Oxford, 398p.
- BOYD, D.M., ISLES, D.J. 2007. Geological Interpretation of Airborne Magnetic Surveys - 40 Years On, in *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, edited by B. Milkereit, p. 491-505
- BRIGGS, I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, **39** (1), 39-48.
- CARRANZA, E. J. M & HALE, M. 1997. A catchment basin approach to the analysis of reconnaissance geochemical-geological data from Albay Province, Philippines. *Journal of Geochemical Exploration*, 60: 157 – 171.

- CARRINO, T.A. 2010. Geotecnologias aplicadas ao reconhecimento de áreas chaves à exploração aurífera na Província Mineral do Tapajós. Dissertação de mestrado em Geologia, Universidade de Brasília, DF-Brasília, p. 192.
- CARVALHO, L.M.M. 2006. Integração de dados de geofísica aérea aplicada à geologia e à prospecção mineral no distrito esmeraldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 250p.
- CHENG, Q., AGTERBERG, F. P. 1999. Fuzzy Weights of Evidence Method and Its Application in Mineral Potential Mapping. *Natural Resources Research*, 8(1): 27 – 35.
- COLLINS, W.J., BEAMS, S.D., WHITE, A.J.R.; CHAPPELL, B.W., 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 80, 189-200.
- CONDIE, K.C. 1981. Archean Greenstone Belts. *Developments in Precambrian Geology* 3. Amsterdam, Elsevier. 434p.
- CORDEIRO, A.A.C. & SAUERESSIG, R., 1980. Serra das Andorinhas: geologia e principais ocorrências de ouro. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31., Camboriú, SC. Resumo, p. 344.
- CORDEIRO, A.A.C. 1982. Geologia preliminar da região de Andorinhas. In: SIMP. GEOL. AMAZ., 1. Belém, 1982. Atas...Belém, SBG, v. 1, p. 45-49.
- CORDELL, L., GRAUCH V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico, in: *The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps*, edited By W.J. Hinze, Soc. Expl. Geophys., 181-197.
- COSTA, J. B. S. 1980. Estratigrafia da Região de Cólmeia, GO. Balneário Camboriú: Anais do 31 Congresso Brasileiro De Geologia, V.2, 1980.
- COSTA, J.B.S., ARAÚJO, O.J.B., SANTOS, A., JORGE JOÃO, X.S., MACAMBIRA, M.J.B. & LAFON, J.M., 1994. A província mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. IV Simp. Geol. Amazônia, Belém, pp. 199–235.
- COSTA, J.B.S. & HASUI, Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: Costa M.L. & Angélica R.S. (eds.) *Contribuições à Geologia da Amazônia*. SBG, Núcleo Norte, p.15-19.
- COSTA-SILVA, E., SILVA, A.M., TOLEDO, C.L.B., MOL, A.G., OTTERMAN, D. 2010. Modelagem e interpretação de dados aerogeofísicos de alta resolução na geração de alvos para follow-up para ouro no terreno granito-greenstone Rio Maria, Pará. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília.
- COSTI, H.T., DALL'AGNOL, R. & MOURA, C.A.V. 2000. Geology and Pb-Pb geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitinga Province, Amazonian Cráton, northern Brazil. *Int Geol Ver* 42:832-849.
- CPRM. 2000. Xinguara, Folha SB.22-Z-C. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Brasília. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- CPRM (Cia de Pesquisa de Recursos Minerais). 2006. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Escala 1:1000.000. Mapa Geológico do Estado do Amazonas. Manaus: MME. CD-ROM e Texto. 125p.
- CPRM. 2008. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Xinguara, Folha SB.22-Z-C. Estado do Pará. Escala 1:250.000. Organizado por Marcelo Lacerda Vasquez e Lúcia Travassos da Rosa-Costa – Belém: CPRM, 2008. CD-ROM

- DALL'AGNOL, R., LAFON, J.-M. & MACAMBIRA, M.J.B., 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineral. Petrol.* 50, 113–138.
- DALL'AGNOL, R., OLIVEIRA M.A., ALMEIDA J.A.C., ALTHOFF F.J., LEITE A.A.S., OLIVEIRA D.C., BARROS C.E.M., 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenetic province, eastern Amazonian Craton. In: R. Dall'Agnol, L.T. Rosa-Costa, E.L. Klein (eds.) *Symposium on Magmatism, Crustal Evolution and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Abstracts Vol. and Field Trips Guide.* Belém, PRONEX-UFPA/ SBG-NO, 150p.
- DALL'AGNOL, R., RAMÖ, O.T., MAGALHÃES, M.S., MACAMBIRA, M.J.B. 1999. Petrology of the Anorogenic, Oxidised Jamon and Musa Granites, Amazonian Craton: Implications for the genesis of Proterozoic, A-type Granites. *Lithos.*, 46:431-462.
- DALL'AGNOL, R., TEIXEIRA, N.P., RÄMÖ, O.T., MOURA, C.A.V., MACAMBIRA, M.J.B., OLIVEIRA, D.C.O. 2005. Petrogenesis of the paleoproterozoic rapakivi A-type granite of the Archean Carajás Metallogenetic Province, Brazil. *Lithos.* 80:101-129.
- DARDENNE, M. A. & SCHOBENHAUS, C. 2001. *Metalogênese do Brasil.* CPRM/UnB, Editora UnB, 392p.
- DARDENNE, M.A. & SCHOBENHAUS, C. 2000. The metallogenesis of the South American platform. In: CORDANI UG, MILANI EJ, THOMAZ FILHO A & CAMPOS DA. (Ed.). *Tectonic Evolution of South America.* 31st International Geological Congress, 755–850, Rio de Janeiro-RJ.
- DICKSON, BL & SCOTT, KM. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray surveys – adding the geochemical factors. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2): 187–200.
- DOCEGEO (Rio Doce Geologia e Mineração - Distrito Amazônia) 1988. Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás, Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Volume Província Mineral de Carajás-Litoestratigrafia e Principais Depósitos Minerais, Anexos, p.11-54.
- DUBÉ, B, e GOSELIN, P., 2006, Lode gold: Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits (orogenic, mesothermal, lode gold, shear-zone-related quartz-carbonate or gold-only deposits), Versão preliminar disponível em http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/index_e.php publicado em “Mineral Resources of Canada: A Synthesis of Major Deposit-types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods” to be published by GSC, MDD, GAC.
- EBY, G.N., 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenesis and tectonic implications. *Geology* 20, 641–644.
- EFIMOV, A.V. 1978. Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: *Metody rudnoj geofiziki*, Leningrado, Naucnoproizvodstvennoje objedinenie geofizica Ed., 59-68.
- FERREIRA, A. T. R., ALMEIDA, J. A. C.; DALL'AGNOL R., 2008. Geologia e Petrologia Magnética dos Diques da área de Bannach, Terreno Granito-greenstone de Rio Maria, Sudeste do Pará. IV Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados. Foz do Iguaçu, PR.
- FORNAZZARI NETO, L., FERREIRA, F. J. F. 2003. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 197-208.

- GASTAL, M.C.P. 1987. Petrologia do Maço Granítico Musa. Sudeste do Pará. Belém, Universidade federal do Pará. Centro de Geociências. Tese (Mestrado em Petrologia e Geoquímica)-Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, UFPA. 316 p.
- GEOSOFT. 1997. OASIS Montaj™ Data Processing and analysis (DPA) System. V 7.0 Geosoft Inc., Toronto, Canadá.
- GLOBESAR 2006. Apostila de radar. Disponível em: http://ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/gsarcd/index_e.php. Acesso: 06 de Fevereiro de 2011.
- GNOJEK, I., PRICHYSTAL, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, v. 23, p. 491-502.
- GOLDFARB, R.J., GROVES, D.I., & GARDOLL, S., 2001, Orogenic Gold and geologic time: a global synthesis: *Ore Geology Reviews*, 18, 1-75.
- GOLDFARB, R.J., BAKER T., DUBE, B., GROVES, D.I., HART, C.J.R., GOSSELIN P., 2005, Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes, in *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 407-450.
- GRAUNCH V.J.S., CORDELL L. 1987. Limitations of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudogravity data. *Geophysics*, **52**:118-121.
- GROVES, D.I., BARLEY, M.E., 1994. Archean mineralization. In: *Condie, K.C. (Ed.), Archean Crustal Evolution*. Elsevier, Amsterdam, pp. 451-493.
- GROVES, D.I., GOLDFARB, R.J., GENRE-MARIAM, M., HAGEMANN, S.G., ROBERT, F., 1998, Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationships to other gold deposit types: *Ore Geology Reviews*, 13, 7-17.
- GROVES, D.I., GOLDFARB, R.J., ROBERT, F., and HART, C.J.R., 2003, Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance: *Economic Geology*, 98, 1-29.
- GROVES, D.I., KNOX-ROBISON, C.M., HO, S.E., and ROCK, N.M.S., 1990, An overview of Archean lode gold deposits, in Ho, S.E., Groves, D.I., and Bennett, J.M., eds, *Gold deposits of the Archean Yilgarn block, Western Australia: Nature, Genesis and Exploration Guides: Geology Department & University Extension, The University of Western Australia Publication 20*, 2-18.
- GUNN, P.J., MINTY, B.R.S., MILLIGAN, P.R. 1997. The Airborne Gamma-Ray Spectrometric Response Over Arid Australian Terranes. In: *EXPLORATION 97: FOURTH DECENNIAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MINERAL EXPLORATION*, Proceedings ..., edited by A.G. Gubins, 1997, p.733-740.
- HARALY, N.L.E. & HASUI, Y. - 1982 – Compartimentação geotectônica do Brasil Oriental com base na informação geofísica. In: *CONGR. BRAS. GEOL.*, 32. Salvador, 1982. Anais... Salvador, SBG, V. 1, p. 374-385.
- HASUI, Y., HARALY, N.L.E., SCHOBENHAUSS, C., 1984, Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: Subsídios para o modelo geotectônico. II Symposium Amazônico, Anais, pp. 129-148.
- HIRATA, W.K., RIGON, J.C., KADEKARU, K, CORDEIRO, A.A.C. & MEIRELES, E.M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: *Simp Geol Amaz 1*, Proceedings, Belém, SBG, pg: 100-110.
- HODGSON, C.J., 1993, Mesothermal lode-gold deposits, in R.V. KIRKHAM, W.D. SINCLAIR, R.I. THORPE, and J.M. DUKE, eds, *Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canada Special Paper 40*, 635-678.

ANEXO 1

Mineral Potential Mapping for Orogenic Gold Deposits at Rio Maria Granite Greenstone Terrain, Southeastern Pará State, Brazil

*Artigo submetido na Economic Geology

Ezequiel Costa e Silva,
Reinarda Mineração Ltda (Troy Brasil), Avenida Nove, n° 452, Rio Maria, PA,
Brazil, Zip code: 68530-000

Adalene Moreira Silva, Catarina L. Bemfica Toledo,
Laboratory of Applied Geophysics, Institute of Geosciences, University of Brasília,
DF. Brazil, Zip code: 70910-900

Augusto Mol, David Otterman
Troy Resources NL, Ground Floor, 44 Ord Street, West Perth WA 6005, Australia

Rodrigo Cortez,
Reinarda Mineração Ltda (Troy Brasil), Avenida Nove, n° 452, Rio Maria, PA,
Brazil, Zip code: 68530-000

Corresponding author: e-mail, ezequielcs@gmail.com

Abstract

This study involves the integration of high-resolution airborne magnetic gradiometer and gamma-ray spectrometer surveys, geology and other detailed superficial geoscientific data from the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain, located in southeastern Para State, Brazil in order to map the gold potential of the area.

Geographic Information System (GIS) based automated processing methods employing fuzzy logic techniques were used to derive spatial models for generating lode-type gold exploration targets. Two metallogenic approaches were used. The first considers lode-type gold deposits hosted within the contact between mafic and felsic rocks. The second approach considers shear zone hosted veins associated with mafic rocks and iron formation in the greenstone terrain.

Detailed models were built into three different blocks of the study area. High gold potential areas associated with lode-type gold mineralization have been highlighted in each block. Some of these targets, in particular Marcinho, Resende and Votuporanga, were subsequently followed-up with field evaluations consisting of geological mapping and geochemical sampling. A follow-up reverse circulation drilling program is underway to assess the main target areas where grid soil and rock sampling have delineated anomalous trends. About fifty seven new exploration targets were identified and some warranting further investigated.

Introduction

Significant progress has been made in the field of integration and spatial modeling of exploration geochemical and geophysical data, providing better tools to assist the discovery of new gold deposits (Robert et al., 2007). The application of these new methodologies is considered to be a very useful tool in the search for new gold discoveries in greenstone belt terrains (Jaques et al., 1997). Current standard exploration protocols are focused on defining a “footprint”, based on known gold deposits, which is then applied in a search of available data sets to identify similar or look-alike anomalies (Robert et al., 2007).

The approach outlined in this paper is an integrated GIS-based exploration targeting study employing fuzzy logic techniques for lode-type gold as applied to the Andorinhas region in Para State, within Rio Maria granite-greenstone Terrain (Fig. 1). The area encompasses the cities of Rio Maria and the southern limits of Xinguara, and as far east as Floresta do Araguaia (Pará), 260km to the southeast of the principal city of Marabá (Fig. 1)

Exploration targets for lode-type gold deposits have been generated for the study area by applying automated Geographic Information Systems (GIS) techniques in a process that is typically known as Prospectivity Analysis (Bonham-Carter, 2004). A comprehensive structural analysis was completed based on interpretation of airborne magnetic data. In parallel the radiometric data was used to highlight hydrothermal alteration. Field mapping formed the foundation of this prospectivity analysis and target generation. The current project has generated targets using automated techniques based

on the available data aided by Spatial Data Modeller (SDM) software (Sawatzky et al., 2009) and Spatial Analyst Extension (ESRI), and guided by a knowledge-driven approach.

This paper aims to evaluate the gold potential in the studied area through mineral favorability maps in order to define areas for detailed investigation. These areas were grounded truthed with sampling and a drilling program by Troy/Reinarda, which gave all data sets and support to this study.

Geological Setting

The area studied is located in the southeast Carajás Mineral Province known as the Rio Maria granite-greenstone Terrain (Fig. 1). The Carajás Mineral Province lies at the southeastern margin of the Southern Amazon Craton of Brazil and is represented by granitoid-greenstone terrains, intracratonic basins and high-grade metamorphic complexes (Tassinari & Macambira, 2004). Recently, it has become one of the most studied portions of the Amazon area and is considered to be one of the most important Mineral Provinces of the country with a diversity of rich mineral resources (Dall'Agnol et al., 2006). The Carajás Province comprises two Archean tectonic blocks: the northern Itacaiúnas Belt (Araújo et al., 1988), a tectonic block that hosts the Carajás Basin, and the southern Rio Maria Granite-Greenstone Terrain. The Rio Maria granite-greenstone terrain and the Itacaiúnas belt can be differentiated in terms of both their geological setting and associated mineral deposits. The Rio Maria granite-greenstone terrain is composed largely of east-west, northwest-southeast and northeast-southwest trending shear zones that represent dextral strike-slip faults that have affected chiefly the supracrustal rocks (Holdsworth and Pinheiro, 2000). Synformal structures along the shear directions, previously interpreted as synclines, are considered to be transpressive duplexes. The larger duplexes are related to E-W shear zones whose cores consist of sedimentary rocks and whose borders are defined by thrust faults (Holdsworth and Pinheiro, 2000).

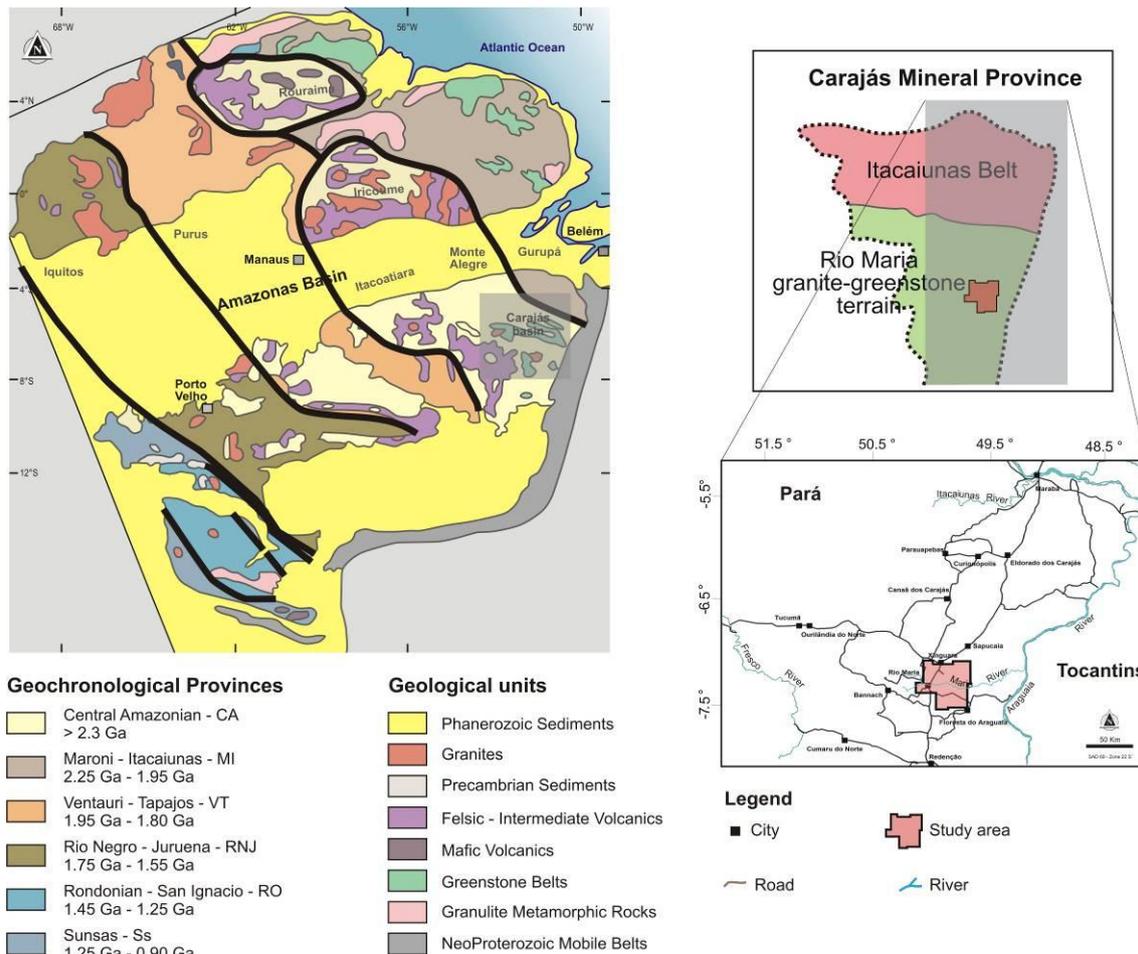


Fig. 1. Simplified Plan of the Amazonian Craton showing the geochronological provinces according to proposals of Tassinari and Macambira (2004). Also highlight the Carajás Mineral Province and the study area location.

The Rio Maria granite-greenstone terrain is composed of greenstone belts and a variety of Archean granitoids (Dall'Agnol et al., 2006). The former of greenstone sequence gave ages of 2.97 to 2.9 Ga and consist of meta-ultramafic (komatiites), metamafic (basalts and gabbros) rocks and subordinate intermediate to felsic rocks, with intercalations of metagraywackes, all grouped into the Andorinhas supergroup (Souza et al., 2001). The granitic rocks were originated between 2.98 and 2.86 Ga.

The Andorinhas supergroup is a greenstone sequence composed of ultramafic and mafic metavolcanic rocks, intercalated with iron formation at the base (Babaçu group) and chemical and clastic metasedimentary rocks at the top (Lagoa Seca group) (Nascimento & Biagini, 1988) (Fig. 2). All these sequences show different grades of deformation and greenschist facies metamorphism. These volcano-sedimentary successions overly high grade granitic and gneissic rocks of the Xingu and Pium Complex, that represent the basement. Several, variably spaced ductile shear zones are responsible for the most prominent deformation observed in these rocks, being later cut by faults and lineaments.

These rocks are intruded by a variety of Archean granitoids aged between 2.98 and 2.86 Ga. Four groups of granitoids have been distinguished (Dall’Agnol et al., 2006): (1) An older TTG series (2.98– 2.93 Ga) represented by the Arco Verde tonalite and the Caracol tonalite complex; (2) The Rio Maria sanukitoid suite (~2.87 Ga; Oliveira et al., 2009) composed dominantly by granodiorites, with associated mafic and intermediate rocks, forming enclaves or, locally, small bodies. These rocks are intrusive into the greenstone belts and the older TTG series and are intruded by the Água Fria trondhjemite (Leite et al., 2004); (3) An younger TTG series (~2.87-2.86 Ga) exposed only in the Rio Maria and Xinguara areas of the Rio Maria granite-greenstone terrain, and represented by the Mogno trondhjemite and the Água Fria trondhjemite; (4) Potassic leucogranites of calcalkaline affinity (~2.87-2.86 Ga) represented by the Xinguara and Mata Surrão granite plutons (Docegeo, 1988; Althoff et al., 2000; Souza et al., 2001; Leite et al., 2004; Dall’Agnol et al., 2006).

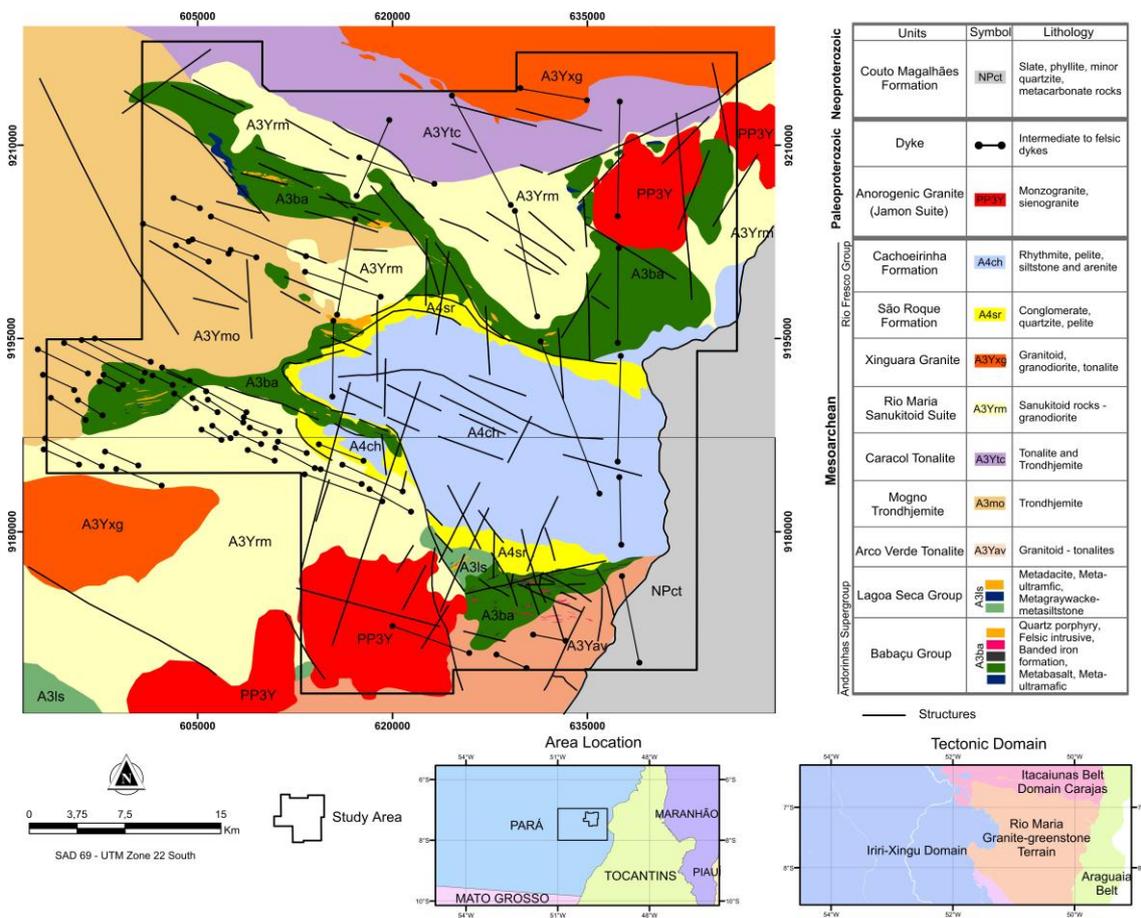


Fig. 2. Integrated geological map of the Rio Maria granite-greenstone terrain showing the location of the study area.

Large Archean batholiths and Paleoproterozoic anorogenic alkaline to subalkaline A-type granitoid stocks and batholiths cut the greenstone belt rocks as well as dikes and sills (Gastal et al., 1987). Similar greenstone sequences (Tucumã, Gradaus, and Sapucaia groups) occur elsewhere (Oliveira, 1987; Souza, 1994). Small lode gold deposits such as Mamão, Babaçu, Lagoa Seca, Diadema and Serrinha are located in

these greenstone sequences (Huhn, 1992). Currently the only operating gold mine is the Mamão Mine being mined by Troy Resources NL(Troy) and Reinarda Mineração Ltda (RML).

Gold Mineralization at Andorinhas Greenstone Belt

Archean orogenic lode gold deposits are the result of large, complex mineralizing systems that have developed within many Archean terrains (Goldfarb et al., 2005). This coherent class of gold deposits, previously called mesothermal but recently renamed orogenic gold deposits, is thought to be related to the final stages of terrane accretion in a subduction setting (Groves et al., 1998). This includes gold deposits formed during late orogenic extension (Goldfarb et al., 1997).

Orogenic style gold mineralization at Andorinhas is generally associated with quartz veining in shear zones with high hydrothermal alteration and variable amounts of sulfide. The lode gold deposits in general have formed in dilational zones within the shear zones (Huhn, 1992).

Over the study area three main types of deposits are distinguished based on their host-rock environment: greenstone-hosted (e.g. Mamão Mine), turbidite-hosted (e.g. Lagoa Seca deposit), and BIF-hosted types (e.g. Marcinho target) (Fig. 3).

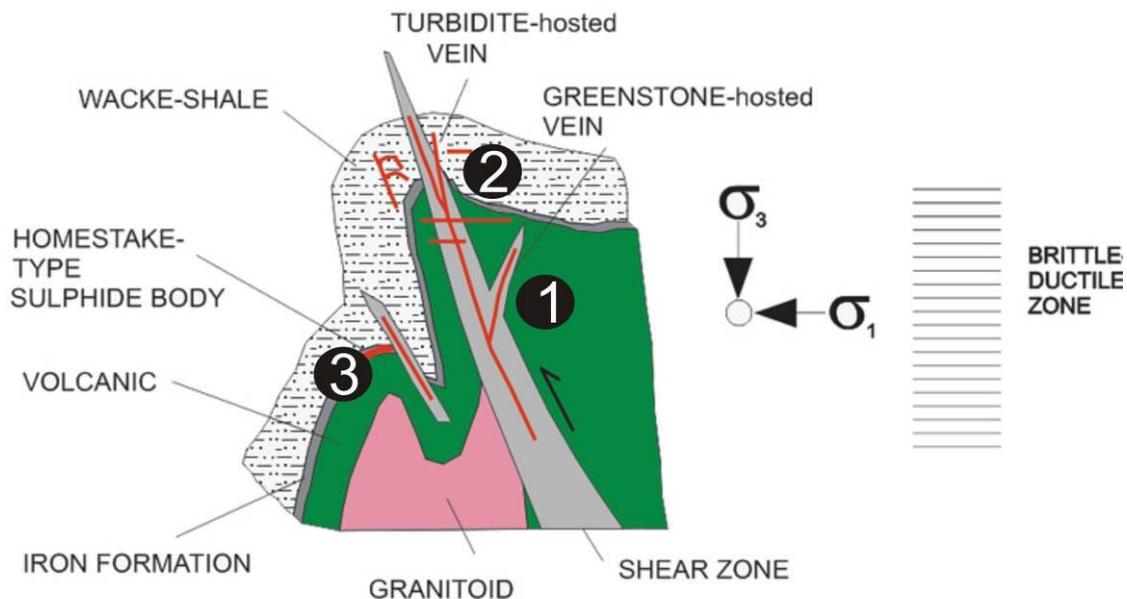


Fig. 3. Schematic figure proposed by Poulsen et al. (2000), illustrating the types of orogenic deposits. The figure also shows the three types of deposits found in the study area: (1) greenstone-hosted, Mamão/Babaçu lode-type gold deposit, (2) turbidite-hosted, Lagoa Seca deposit (3) deposits related to banded iron formation, Marcinho target.

Lithological and Structural Controls

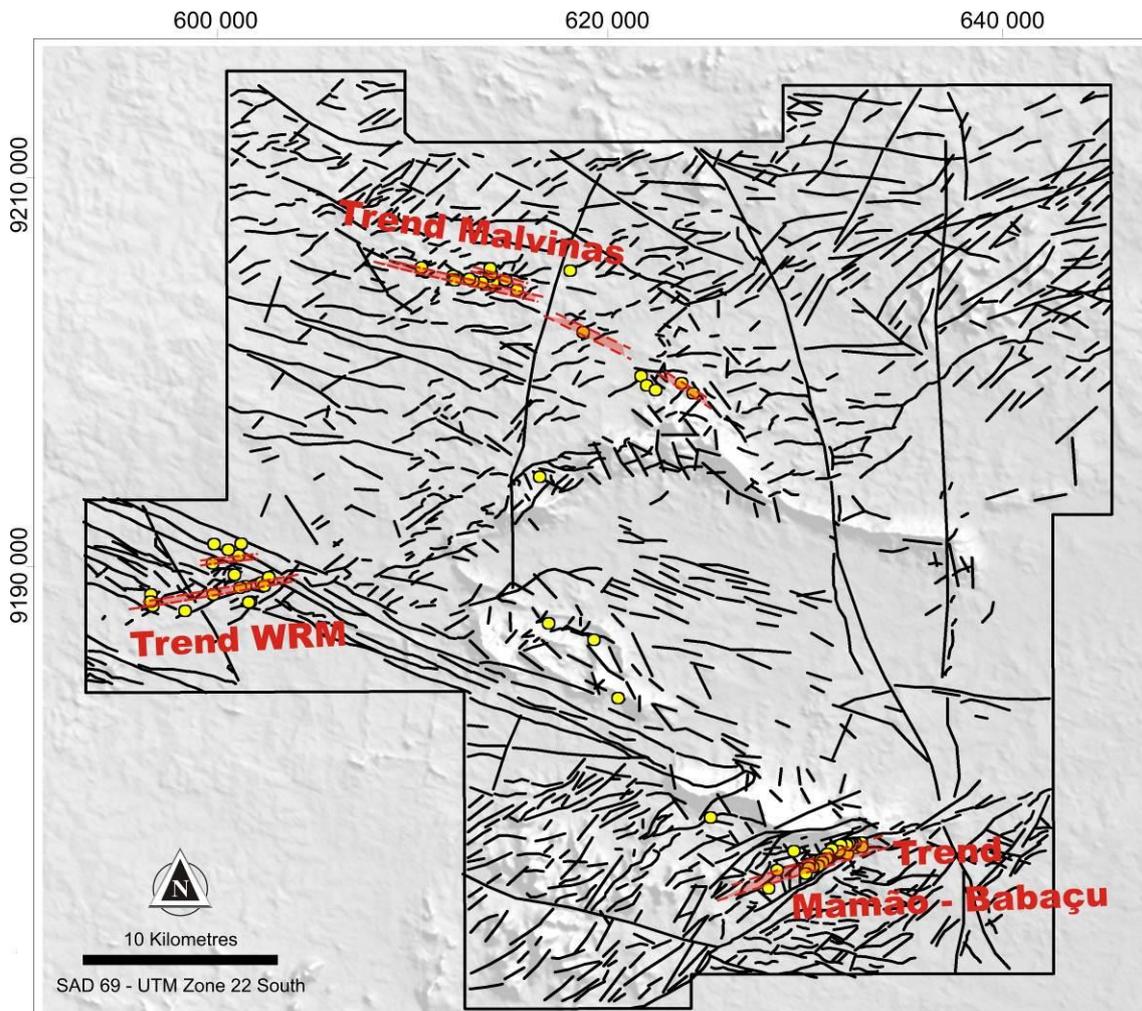
Lithologies were interpreted from the geophysical data and by geological field mapping of the study area. Principle lithologies included ultramafic, mafic, felsic, banded iron formation, sedimentary rocks, and granites.

The main deposits of study area are hosted in the Andorinhas greenstone belt. The belt is comprised of two Groups: the Babaçu Group (dominantly metabasalts, minor ultramafics, banded iron formation and felsic rocks) and the Lagoa Seca Group (dominantly metasediments, felsic intrusive with minor mafics and ultramafics). Gold mineralization in the Andorinhas greenstone belt is hosted within three different lithologies. In the Mamão area, lode-type gold is hosted by mafic volcanics. In the Lagoa Seca deposit the mineralisation occurs within metasediments within a broad shear zone and is better developed along contrasting rheological contacts with dacites units and intrusive ultramafics. Some gold occurrences are associated with Fe-rich lithologies and are principally represented by Marcinho and Rufino prospects.

Apart from the Andorinhas greenstone belt, two more small portions of greenstone are mapped in the study area, namely the Rio Maria greenstone belt and Identidade greenstone belt (Souza, 1994). Most of gold occurrences in the Rio Maria and Identidade greenstones are associated with quartz veining in contact between felsic and mafic rocks. These felsic units are related to the Babaçu Group and are represented by dacites, rhyolites, quartz-porphiry and minor metasediments.

The Mamão gold deposit is a shear-hosted gold deposit located in dilational jogs of a high-strained zone branch, within the early foliation present in metavolcanic rocks of a particular greenstone keel. The main east-northeast – west-southwest trending corridor that hosts the Mamão mine contains over 20 smaller pits and surface workings previously mined by garimpeiros. The lode gold is hosted in those dilatational jogs which represent secondary structures.

A rose diagram of the magnetic lineaments indicates three dominant orientations, the NW-SE (Trend Malvinas), NE-SW (Trend WRM and Mamão/Babaçu) and E-W (ore zone). All of them showed significant spatial association with the gold bearing mineralization in the area (Fig. 4A, 4B). The NW, NE and E-W trending lineaments were extracted as separate maps. According to Huhn (1992) the E-W trending high-strain zones, as splays and jogs along NE–SW corridor have more gold bearing mineral occurrences in the Andorinhas greenstone belt and as interpreted in this study also in the Identidade and Rio Maria greenstone belts.



A)

Legend

- Gold occurrence
- Magnetic lineaments
- Main Shear zone

B)

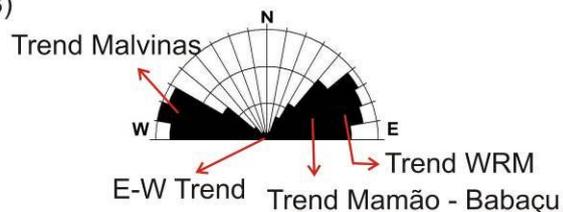


Fig. 4. Map of lineaments outlined by magnetic products showing gold occurrences. (A) Map of lineaments showing the main trend areas. (B) Rose diagram of the lineaments obtained indicating four dominant orientations related to the main shear zone.

Hydrothermal Alteration Zones

Deposits in Rio Maria Province exhibit lateral zonation of alteration phases from distal to proximal assemblages on a scale of meters. Mineralogical assemblages within the alteration zones and the width of these zones generally vary with wallrock type and crustal level. In the mafic host rocks the distal alteration is composed of chloritization,

carbonatization and sericitization. Proximal assemblages are formed by biotitization and sulfidization. In proximal zones biotite replacing chlorite, total or partially, suggests a potassium metasomatism related the hydrothermal alteration. Sulfidization is extreme in BIF and Fe-rich mafic host rocks and predominant sulfides consist of pyrite and pyrrhotite. However gold concentrations are restricted to sites with percolation of fluids rich in CO² and Si forming mineralized quartz carbonate veins. The metamorphism is equivalent to upper greenschist to low amphibolite facies.

Airbone Geophysical Data and Other Multi-source Data

The study area was covered by an airborne geophysical magnetic gradiometer and radiometric survey flown at a constant ground clearance of 100 m above the ground surface. The airborne data were acquired using 125 m spaced flight lines with tie lines spaced 1,500 meters, respectively, N-S and E-W directions. The area covered is approximately 1,952 km², which involves about 16,924 km linear.

A comprehensive digital database covering the entire study area is essential to conduct the mineral potential modelling using GIS-based analytical methods. In total the current GIS database contains over 12 layers of digital geoscience data including surficial geology, geochemistry, geophysics, gold occurrences, mineral deposits and topographic data (Table 1).

A total of 300 rock samples, 1120 soil samples and 502 stream sediment samples were collected by Troy/Reinarda Mineração within the study area and were used to help model mineral potential.

Table 1. Summary of Data Used in the GIS Modeling

Data Type	Format	Source
Airbone magnetics gradiometric	Raster	RML/TROY
Airborne gamma-ray	Raster	RML/TROY
Geochemistry - stream sediment samples	Points	RML/TROY
Geochemistry - soil samples	Points	RML/TROY
Geochemistry - rock samples	Points	RML/TROY
Geology (lithology)	Polygons	CPRM, 2008
Geology (lithology and structure)	Polygons and vectors	RML/TROY
Remotely-sensed data (SRTM)	Raster	NASA/NGA
Mineral prospects	Points	CPRM, 2008 RML/TROY

The data were obtained and processed in a variety of formats including Oasis Montaj 7.0 from GeosoftTM, MapInfo 9.5 (Pitney Bowes), Profile Analyst 10.0 (Encom) and Surpac (Gemcom) Software. Data layers were converted to raster form then processed, analyzed, and interpreted into ArcGis 9.3.1 software. The commercial GIS packages ArcGIS 9.3 from ESRI (Environmental Research Institute), enhanced with advanced public domain extensions or add-ons called ArcSDM (Kemp and others 2001;

Sawatzky and others 2004) were employed in this study to create assessment of mineral potential within a greenstone belt terrain that is known to be permissive for gold.

Methods

Geophysical Processing

The geophysical data provide additional evidence to help build the mineral deposit knowledge base. The general processing of airborne geophysical data in this study involved three steps: data preparation and formatting, processing of airborne data and calculated data/derivative products. The processing of airborne data involved the sequential editing followed by application of a gridding routine, removal of apparent residual errors and microleveling of all data to a common base. The main derivative magnetic products calculated from the total magnetic field data were: analytic signal amplitude and phase, first vertical derivative and horizontal gradient (Fig. 5). These products and the measured gradients (Gx and Gy) were also used in.

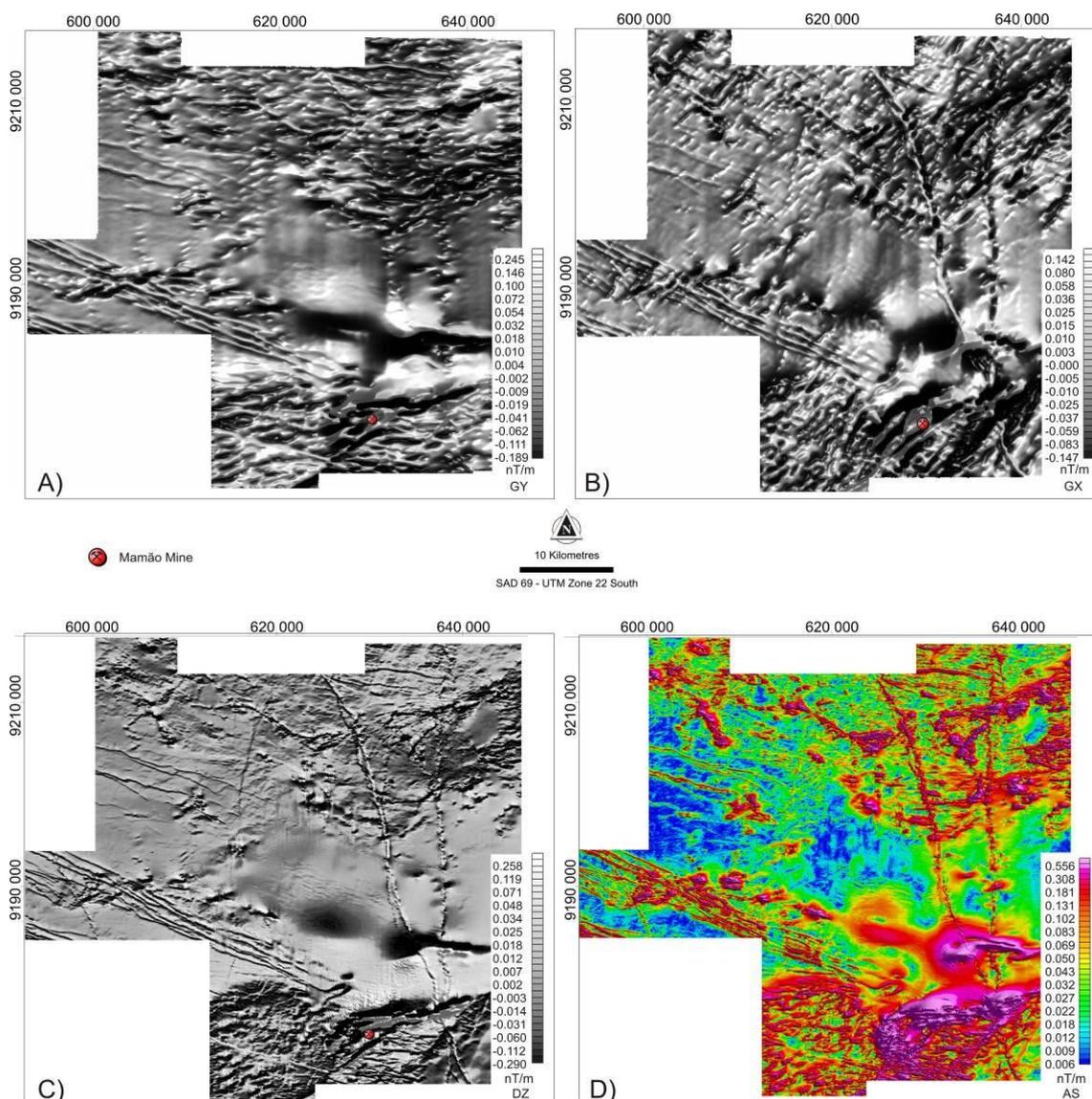


Fig. 5. The main magnetic products used in this approach. (A) Gy gradient. (B) Gx gradient. (C) first derivative from TMI. (D) Analytic signal image from TMI.

Industry standard processing of airborne gamma-ray surveys requires a minimum of four maps (total count, potassium, uranium and thorium) to present the four variables measured. Important information is also obtained from four additional derivative product maps that involve ratios between the various radioelements: eU/eTh, eU/K, eTh/K and K/eU/eTh. In this approach mainly K/eTh, F Parameter and K anomalous (Pires, 1995) images were used to highlight the K enrichment. The F Parameter (Efimov, 1978) shows the potassium distribution related to the uranium and thorium radioelements and has been used for the discrimination of hydrothermal alteration zones. It is expressed by the formula: $F=(K*eU)/eTh$ (Fig. 6).

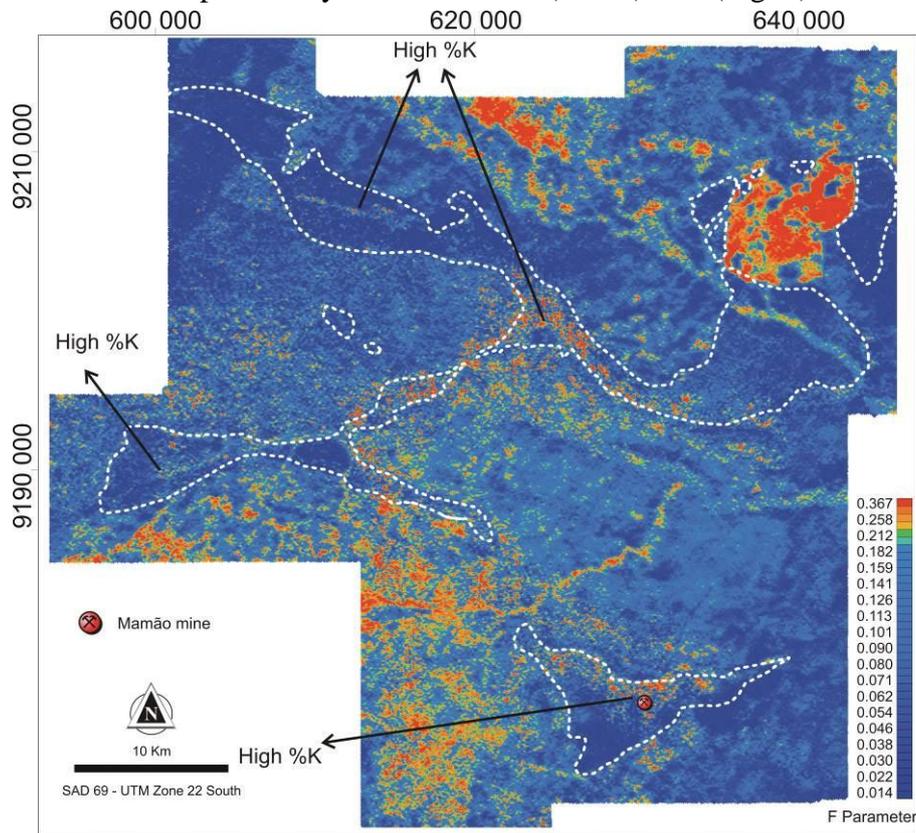


Fig. 6. F Parameter image showing the K enrichment within the greenstone sequence.

Gradiometer magnetic survey data associated with high-resolution gamma ray spectrometric data shows a technological advance on available geophysical technology for low magnetic gradient structures of interest in mineral exploration. Therefore the combination of measured gradients (G_x and G_y) with products derived from combining K, Th and U channels has shown effectiveness in selecting targets for follow-up in tropical terrain.

Spatial Data Analysis

Data-driven approaches require that “a prior” knowledge (expressed in terms of a prior probability) exists in the form of known mineral deposits or occurrences (e.g., prospects) for the study area. Spatial relationships between the input data (evidence

maps) and the spatial location of the mineral prospects are used to establish the importance (weight) of each evidence map. In other data-driven approaches, training areas can be established for each mineral deposit from which diagnostic signatures of mineralization can be calculated from the various data (e.g., geochemistry, geophysics, etc.) used in the modeling process (Harris et al., 2001).

Knowledge-driven approaches rely on the geologist's input to weight the importance of each data layer (evidence map) as they relate to the particular exploration model being used. This approach is more subjective but has the advantage of incorporating the knowledge and expertise of the geologist to build models to generate the prospectivity maps. Where empirical methods use statistics to select the evidential layers that show the strongest relationship to the known mineralization and subsequently use statistically-derived weights for combining these layers to generate the prospectivity maps. Fuzzy Logic allows the geologist to select the evidential layers they believe are the most critical for the particular style of mineralization being targeted, and allows the geologist to assign weights ranging in value from 0 to 1 to each of these layers based on their expert opinion. Examples of knowledge-driven approaches include boolean logic, index overlays (Harris, 1989), analytical hierarchy process (AHP) (Harris et al., 1995); and fuzzy logic (An et al., 1992) (Fig. 7).

Mamão/Babaçu	
Host rock	Mafic rocks (Basalts and Dolerite)
Main structure	Inverse / Thrust shear zone
Trend	N70E , secondary structures E-W
Magnetics	Intermediate values of magnetic gradient
Radiometrics	High K in the F Parameter image
Metamorphic grade	Green schist to low amphibolite
Infill	Quartz vein + pyrite narrow and proximal
Alteration	Biotite + pyrite. Minor chalcopyrite narrow and proximal
Heat activities	No evidence. Some late small diorite intrusions without relationship to mineralisation
Brittle structures	Ore zone displaced by late normal faults
Lithological contacts	Near sediments and dacites
WRM (West Rio Maria)	
Host rock	Mafic rocks (Basalts, Dolerites) and felsic rocks
Main structure	Inverse / Thrust shear zone (regional folds)
Trend	N70E / E-W; conduits for Au-bearing fluids
Magnetics	Low magnetic gradient
Radiometrics	High K in the F Parameter image
Metamorphic grade	Greenschist to low amphibolite
Infill	Quartz vein + chlorite (pyrite low) narrow and proximal
Alteration	Sericite + Biotite + Chlorite + Pyrite + Silicification
Heat activities	No evidence. Some late small diorite intrusions without relationship to mineralisation
Lithological contacts	Close felsic rocks; conduits for Au-bearing fluids
Malvinas (Votuporanga)	
Host rock	Mafic rocks and quartz porphyry
Main structure	Strike slip shear zone / Dipping steeply
Trend	NW corridor, secondary structures E-W
Magnetics	Low magnetic gradient
Radiometrics	High K in the F Parameter image
Infill	Quartz vein in the contact
Alteration	Chlorite + biotite + pyrite + silicification
Brittle structures	Falts pos mineralisation
Lithological contacts	Very important / Close to felsic intrusive; conduits for Au-bearing fluids

The conceptual model proposed for this region of the Rio Maria Province consists of the association of mineralisation with high values of K and structural conditioning based on descriptions of field work and study made by Huhn et al. (1988), Huhn (1992), Souza (1994), Souza (1999), Souza et al. (2001). Based on the patterns defined on the descriptive model (Table 2), it was possible to direct the processing of geological, geophysical and geochemical data sets in order to extract useful information for knowledge-driven spatial analysis.

The fuzzification of lithology and structures was done using fuzzy categorical membership. Higher membership values were assigned to lithological formations that were reported to host the gold bearing deposits (Table 3). In the study area two different host rocks types associated with mineralization were reported. The first one, felsic and mafic units; the second, mafic and iron formation units. A 0.95 fuzzy membership (definitely anomalous) was assigned to felsic and banded iron formation units followed by metamafic rocks (Fig. 8). The new targets selected are related to both host rocks types.

Lithological units such as ultramafic, quartzite, granitoid, and anorogenic granite were assigned lower values because they are not believed to be significant for gold bearing deposits. All thematic layers in the GIS database were converted to raster format prior to further processing.

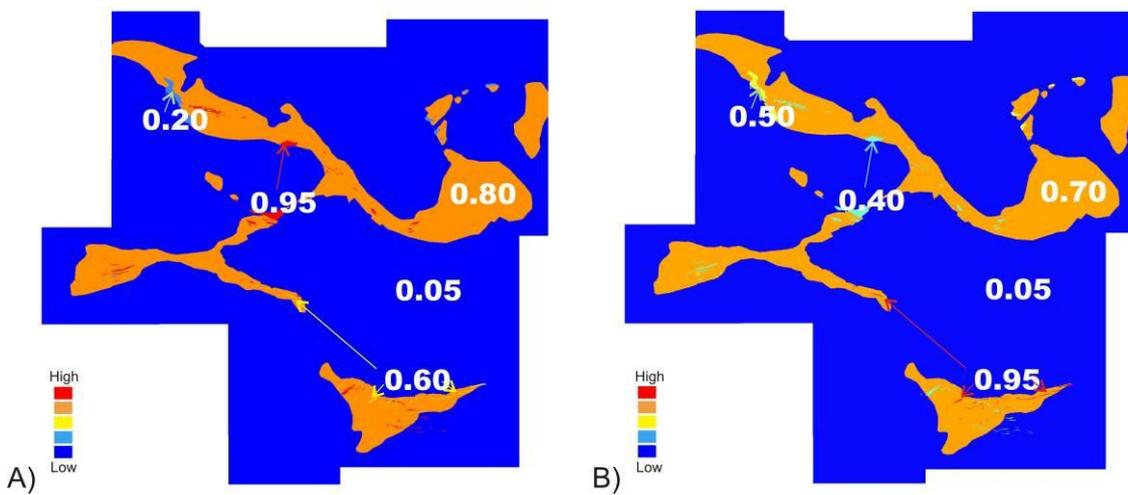


Fig. 8. The fuzzification of lithology showing each fuzzy membership units. (A) First approach related the mineralization in contact of felsic/mafic units. (B) The second approach the host rock mineralization is associated with BIF and mafic units.

Table 3. Summary of the two lithological approaches used in this modeling.

Model A) Felsic/Mafic		Model B) BIF/Mafic	
Lithology	Fuzzy membership	Lithology	Fuzzy membership
Felsic	0.95	Felsic	0.40
Mafic	0.80	Mafic	0.70
Iron formation	0.60	Iron formation	0.95
Ultramafic	0.20	Ultramafic	0.50
Granite, granitoid, quartzite, phyllite, siltstone, graywacke,	0.05	Granite, granitoid, quartzite, phyllite, siltstone, graywacke,	0.05
...		...	

Vector data, such as magnetic lineaments and faults (mapped and interpreted), were transformed to continuous surface maps by dilating (buffering) around each line in successive zones from 0 to 200 meters (Fig. 9). In this way the spatial association between gold prospects and selected structural features can be evaluated using fuzzy logic to determine whether gold prospects are preferentially located closer to geologic structures than would be expected by chance. Therefore, a higher membership value of 0.95 was assigned to the 0 - 100 m structural E-W lineament corridor and 0.5 for 100 - 200 m.

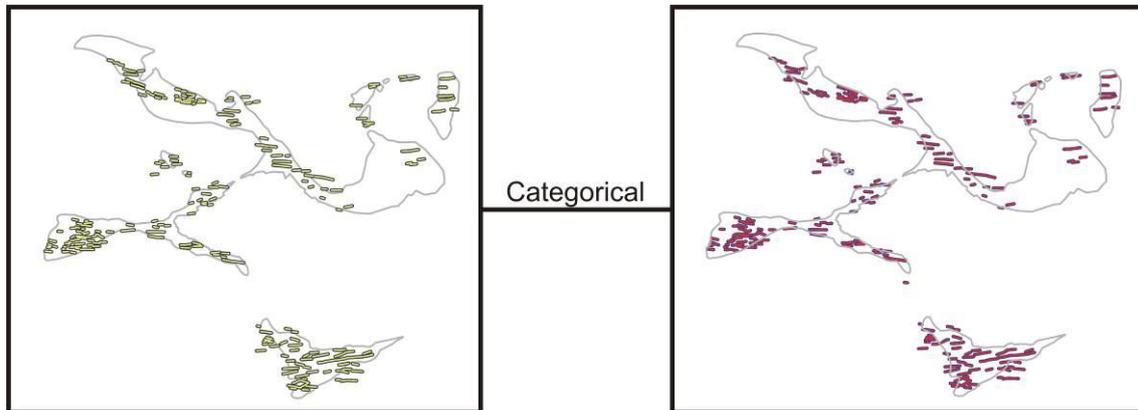


Fig. 9. The fuzzification of the main magnetic lineaments with successive zones from 0 to 200 meters using categorical operators. A higher membership value of 0.95 was assigned to the 0 - 100 m structural E-W lineament corridor and 0.5 for 100 - 200 m

Structural data used in knowledge-driven modeling analysis included: (1) deformation zones (NE and NW corridors) interpreted from field observations, airborne magnetic lineaments; (2) E-W, ENE-WSW, ESE-WNW trending zones (mapped in the field and interpreted from horizontal measured gradients - G_x and G_y). After generating dozens of predictive models, the best models proved to be those using only proximal E-W trends.

The integration of F parameter and the measured horizontal gradients (G_x and G_y) have shown that known mineralized zones are mapped by high F parameter values and low magnetic gradient features. The input layers as geological maps, F parameter, K/Th ratio, anomalous K (Kd), eTh channel, horizontal measured gradients images (G_x and G_y) and E-W low gradient zones were used in the fuzzy logic modeling. Each of the desired evidential layers were then combined using one (or a combination of) fuzzy operators.

The F parameter was used to highlight K enrichment, so was assigned large membership value. K/Th ratio and Kd were used similarly and a small membership value was assigned to eTh channel. Also a small value was used to highlight the low values of G_x and G_y gradients.

For the magnetic evidence layers, the fuzzy algebraic product was used to combine the individual element groups. Therefore, the resulting combination of the radiometric elements was achieved by using the minimum operator, Fuzzy AND, to be a sign of favourable K enrichment environment. The final combination was done using

the fuzzy Gamma operator with a γ parameter value of 0.90 adding the lithology and main structures.

The integration of parameters into a single prospectivity map was completed using the fuzzy-logic overlay method described by Bonham-Carter (1994). The inference network showed in the models Fig. is a concise statement of the exploration model for lode-type gold deposit by defining the combination procedure. The integration was done in steps, and the intermediate maps, together with some of the original maps, and the final prospectivity map are shown in fig. 14.

Table 4. Summary of evidence maps used in the modeling (knowledge-driven).

Evidence theme	Characteristics	Fuzzification
Airborne magnetics - Gx and Gy	Low gradients features	Fuzzy small
Airborne magnetics - analytic signal amplitude	Magnetic anomalies	Fuzzy large
Airborne gamma-ray - K/eTh; Kd; F Parameter	Highlight the K enrichment	Fuzzy large
Airborne gamma-ray - eTh	Highlight the greenstone belt area	Fuzzy small
Lithology	Different fuzzy membership to host rocks	Fuzzy categorical Highest membership (0.95) to iron formations and felsic units, followed by mafic rocks
Structure	Interpreted from magnetics data. Proximal E-W lineaments and NE, NW corridor.	Fuzzy categorical. 0 - 100 m (membership of 0.95) 100 - 200 (membership of 0.50)

The fuzzification and data integration using the fuzzy operators described above (Table 4) as well as validation calculations were carried out using an ArcGIS extension called Arc-SDM or Spatial Data Modeller for ArcGIS described by Raines et al. (2000), Raines and Bonham-Carter (2006) and more recently by Nykänen et al. (2008). The code is freely downloadable from <http://www.ige.unicamp.br/sdm/default_e.htm>.

The final prospectivity map outlined about fifty seven targets (Fig. 14) over four different parts of the study area. Two metallogenic approaches were used. The first considers lode-type gold deposits hosted with mafic and felsic volcanics. The second approach considers shear zone hosted veins associated with mafic rocks and iron formation in the greenstone terrain. Details of spatial modeling in three main mineralized blocks (shown in Fig. 10) are presented below.

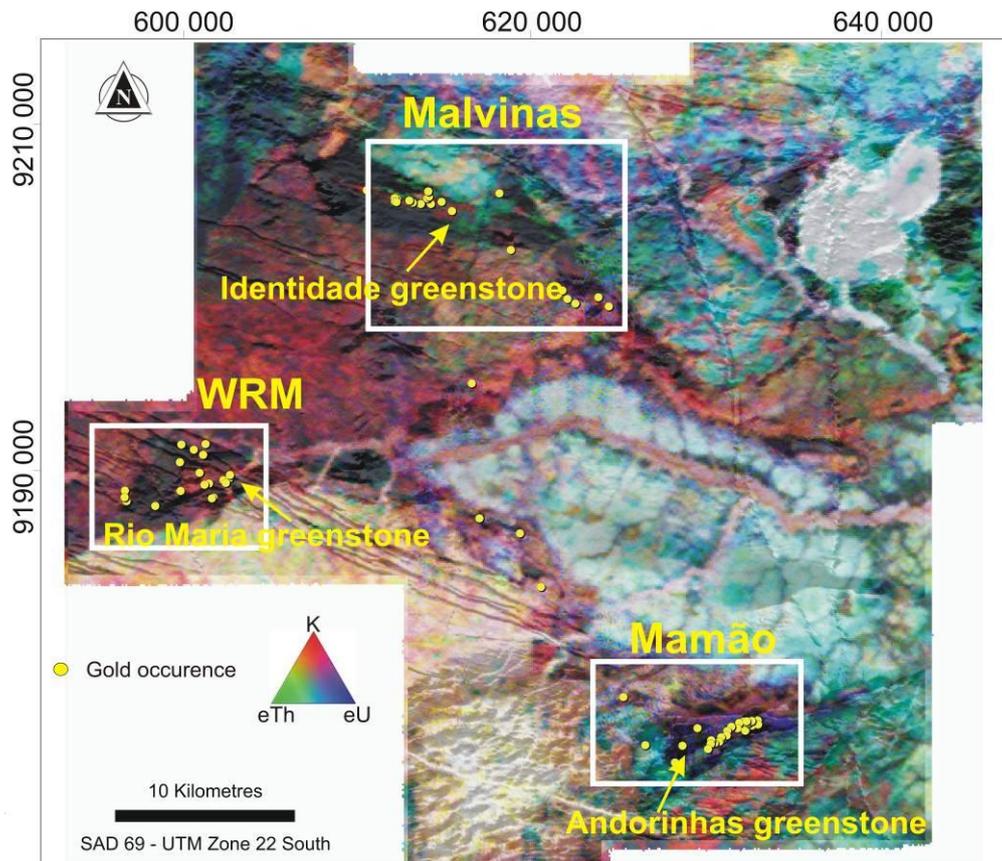
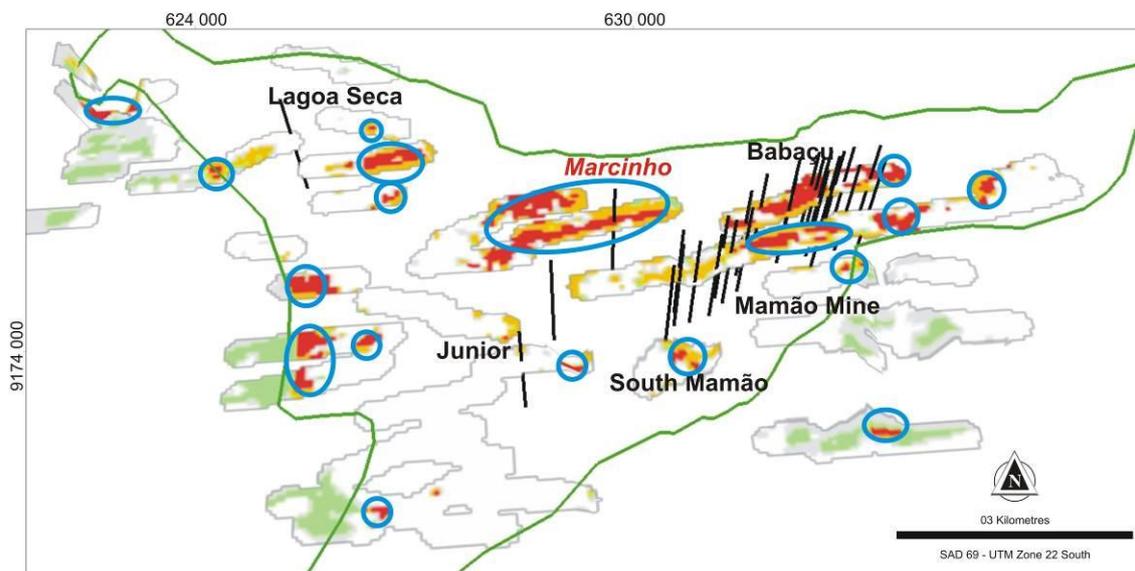
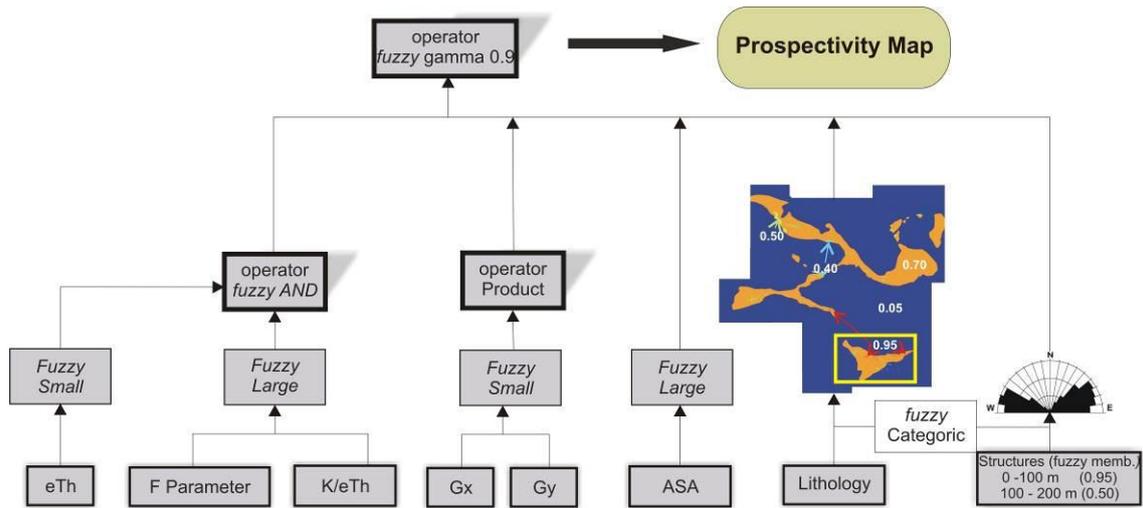


Fig. 10. Ternary RGB image overlapping the first derivative image from TMI. The Fig. shows the three main mineralized blocks, each one corresponding the greenstone belts, Identidade, Rio Maria and Andorinhas.

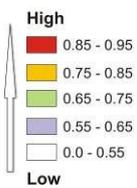
Mamão Block

The analysis of results shows that the highest favorability of Mamão-Babaçu area is associated with metamafic and secondarily lenses of iron formation (Fig. 11). Most of the prospects, such as Coruja NE, Luiza, Piauí et al., along the NE corridor are represented by medium / high favorability. The model shows that the Mamão mine is sited within a medium favorability domain in the lode-type prospectivity map. This is due the fact that the mine area is not associated with iron formation but only metamafic and the highest fuzzy membership used in the lithology was iron formation following by metamafic rocks. About eighteen targets were selected.



Operator - Fuzzy gamma 0.9

Favourability fuzzy



- Selected targets - high favourability
- Greenstone belt
- Prospects

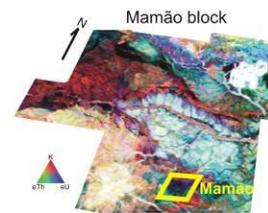


Fig. 11. 2.5D final prospectivity map over Mamão block. Most of the prospects were sited within medium/high favourability area. The technique also identified the know gold occurrences.

WRM - West Rio Maria Block

As commented by Raines (2010), after completing the model or models, it is important to validate the results. If there are known examples of what is being modeled (i.e., known deposits), these can be used to test how well the model classifies known examples. Thus the modelling validated important historically mined regions such as Manoel, Anastácio, Bezerro and Resende target (Fig. 12). The high favourability in the WRM is associated with sheared felsic units hosted in mafic rocks and the Resende target is associated with sheared granitoid in contact with metamafic units. The model showed ten new areas, three of them in the granite-greenstone contact. As well showed some lithological effect to the west of the Manoel prospect.

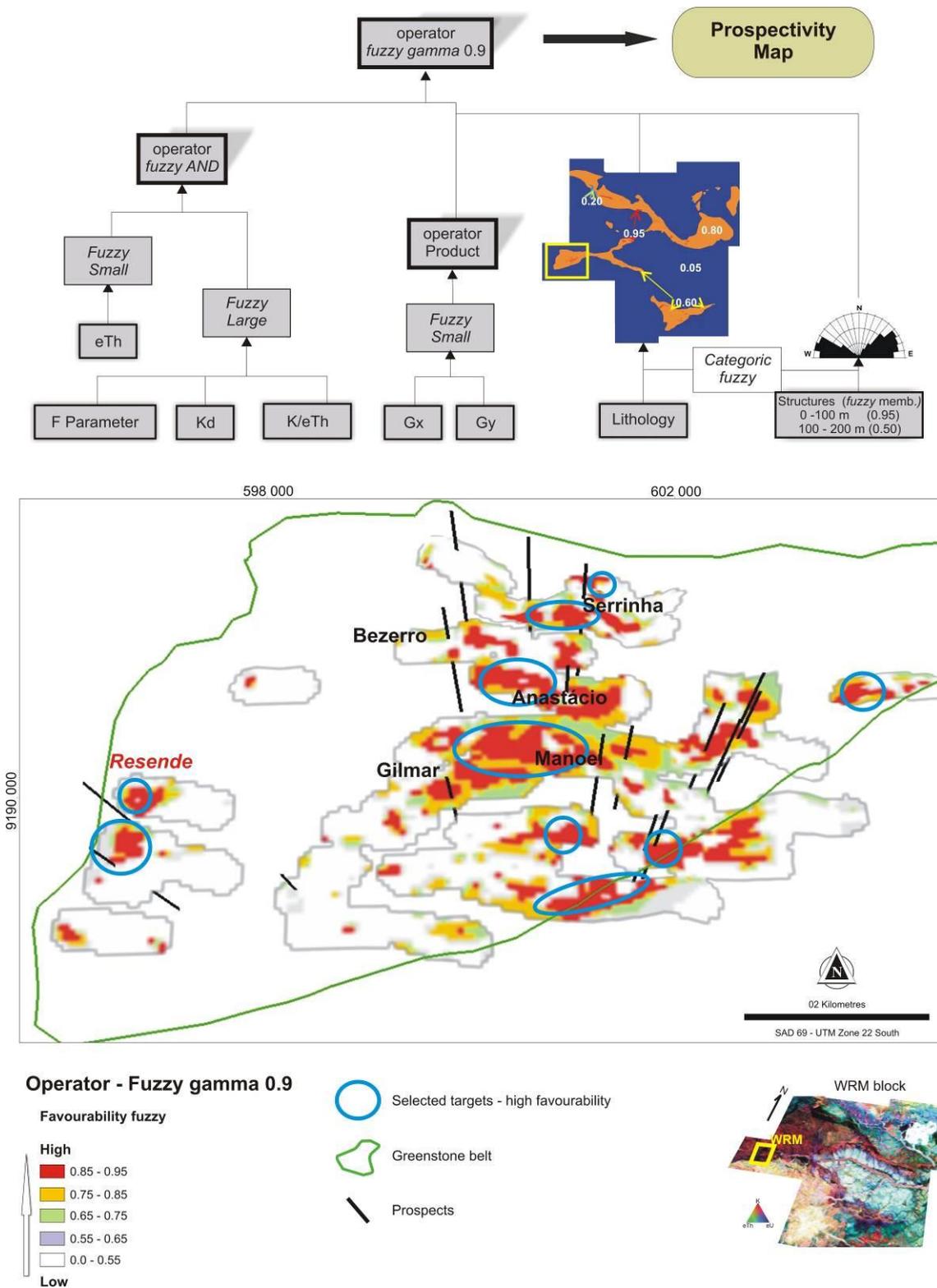


Fig. 12. Final prospectivity map over WRM block. The model shows a lithological effect to the west of the Manoel prospect, but highlights previously mined prospects and identified new targets such Resende.

Malvinas Block

As in the WRM block, the analysis of modeling shows that the highest favorability in the Malvinas Block is associated with felsic intrusive - quartz porphyry. Historical prospects such as Gerson, Américo and Pampeana were sited within a favorability of > 0.75 . The target Votuporanga, one of the most important targets generated was also selected within an area of high favorability (Fig. 13). Eight small new targets were selected in this block.

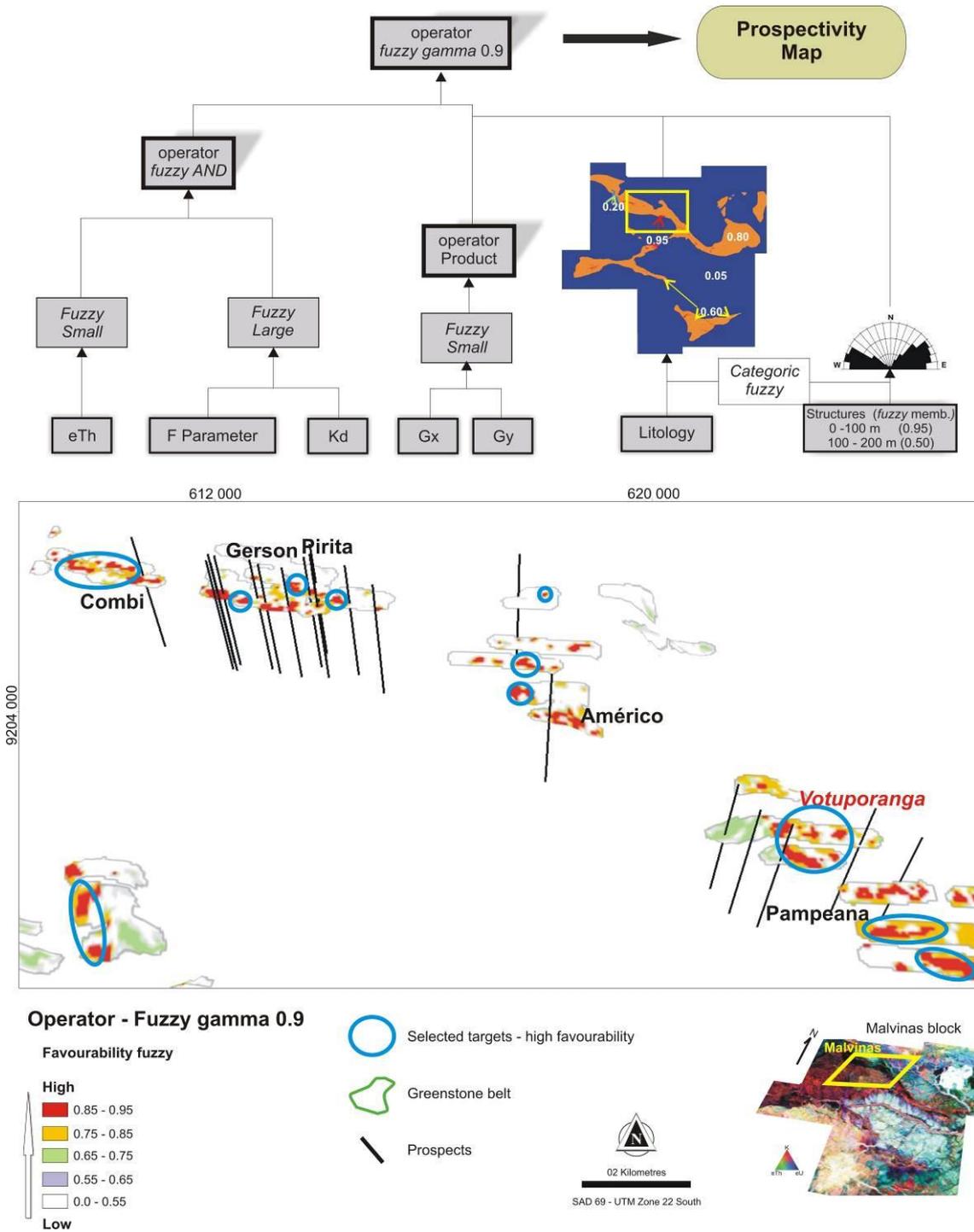


Fig. 13. 2.5D final prospectivity map in the Malvinas block. The model highlighted known prospects such as Gerson, Combi, Américo and Pampeana. The model also showed the Votuporanga target which has been evaluated with field works and further will be conducted a drilling test program.



Fig. 14. Final prospectivity map including the entire individual blocks in the study area.

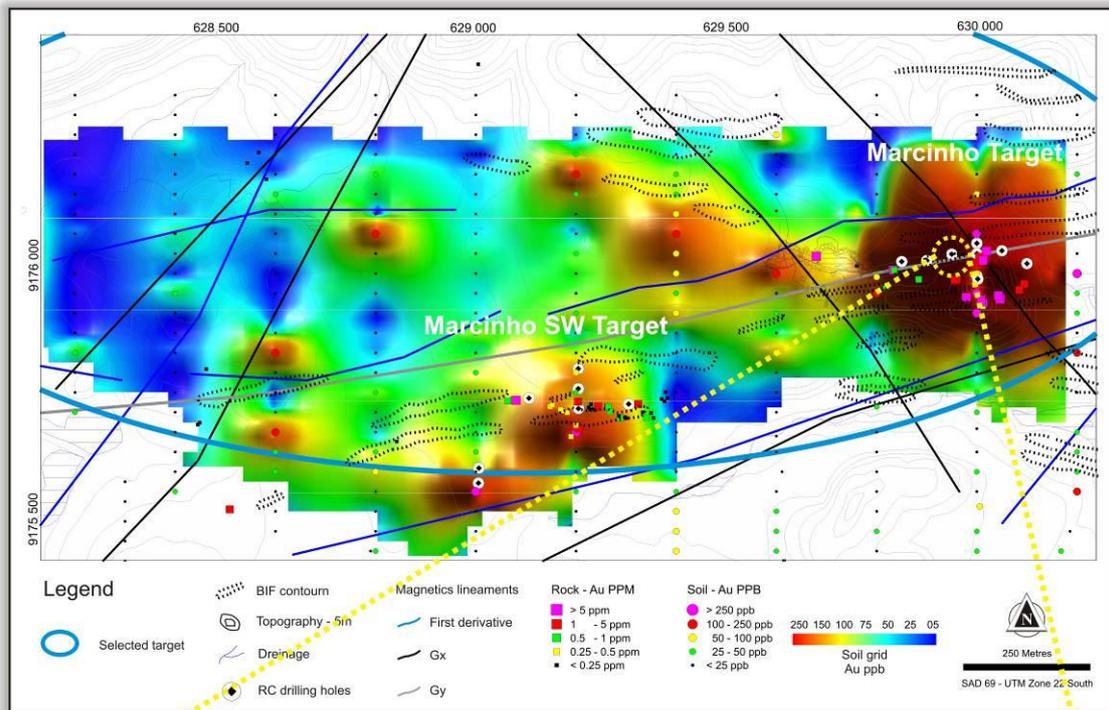
Validation and Evaluation of Best Gold Predictors - Drilling Program

The ultimate test of this fuzzy logic model for lode-type gold deposits is the predictive ability of the favorability map. The best and most difficult test is if this prediction leads to new discoveries. According Raines (1999) practical tests include the following: do the fuzzy membership make sense and are the known lode-type gold deposits in areas of high favorability?

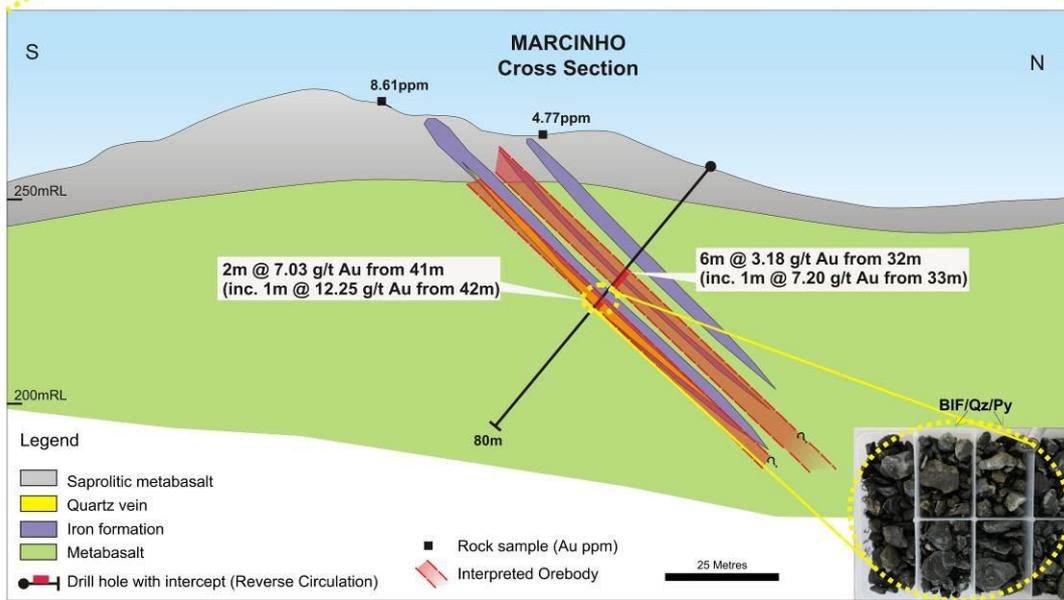
Geochemical data were used to rank all targeting and the three highest targets identified on the basis of fuzzy logic model are: Marcinho Target (Mamão block); Resende (WRM block) and Votuporanga (Malvinas block).

The Marcinho target is located to the east of the old Marcinho Pit along a WNW striking corridor, just 700m from the Mamão processing plant. The target is structurally controlled by NW-SE and NE-SW structures outlined with Gx, Gy and ISA. It is associated with low gradient features in Gy image.

The field testing was done by detailed geological mapping, sampling of outcrops, soil sampling and later by drilling. Grid soil sampling (620 samples) over the main targets selected in the Mamão block area, highlighted 400 m of anomalous E-W trend with high grades returning up to 2300 ppm. Subsequently a drilling program, consisting of fifteen reverse circulation (RC) holes at 50 meters spacing along the shear, was conducted over the Marcinho target (Fig. 15A). To date only seven holes have been completed totaling 476.6 meters. The holes intersected mafic rocks intercalated with banded iron formation (Fig. 15B). Shear zones cross cut the host units. Thin lenses of quartz veins and minor to major amounts of sulfides are associated with gold in iron formation. Most holes encountered two mineralized intervals at shallow depths (Fig. 16). Hole MAC118 encountered an interval of mineralization from 32 to 38 m downhole averaging 3.18 g/t Au. This interval is associated with mafic rock and iron formation a contains 5 to 10% pyrite. Hole MAC116 also returned narrow lenses of encouraging results in shallow levels from 17 to 18 m at 5.19 g/t Au and hole MAC117 23 to 24 m at 4.02 g/t Au.



A)



B)

Fig. 15. Surface geochimetry and drill cross section over Marcinho target. (A) Surface gold geochemistry and MAC118 drill hole location. (B) Cross section showing rock units and mineralization. The ore is associated with sulfide in BIF and quartz veinlets.

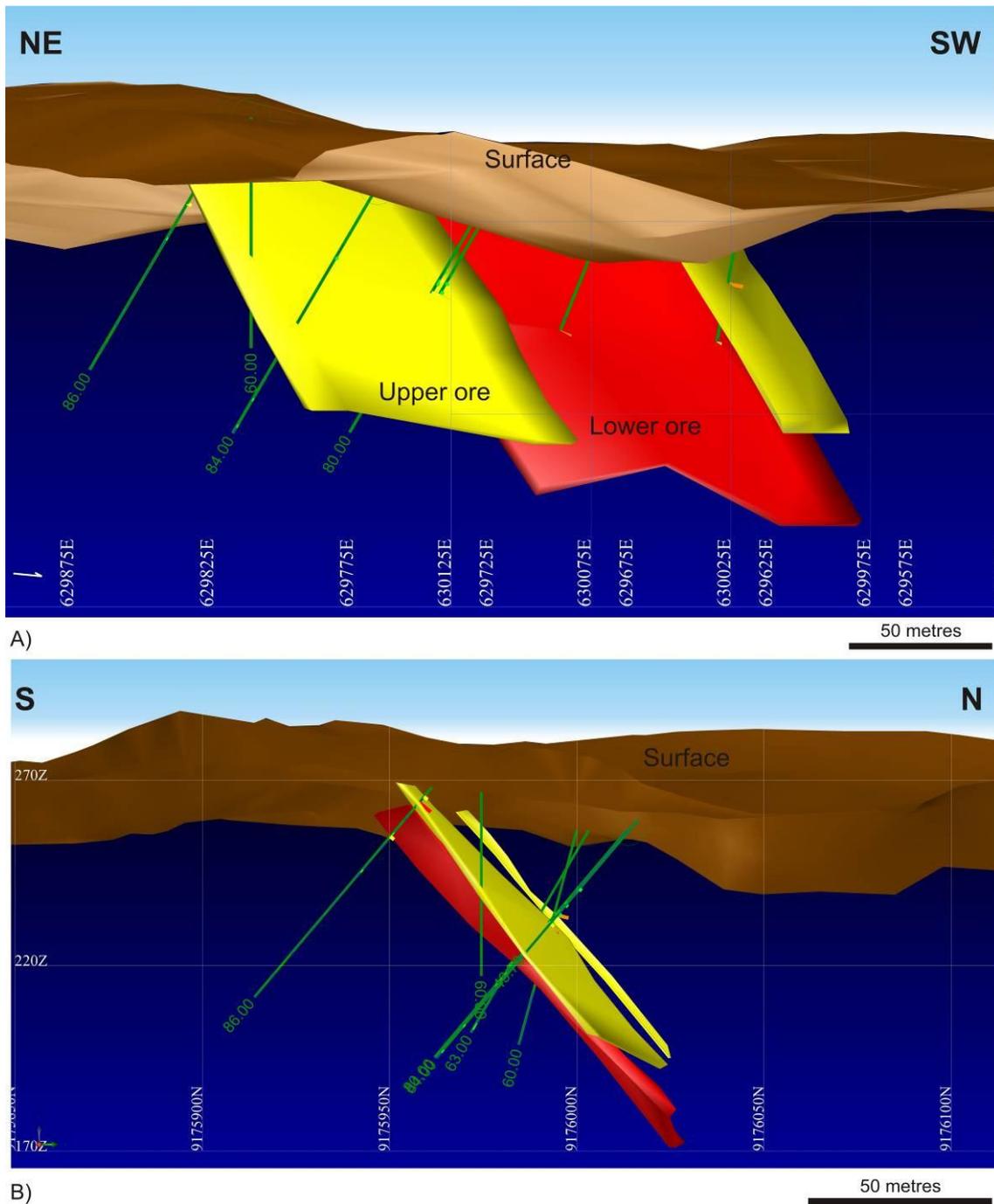


Fig. 16. 3D mineralization model of the Marcinho target. This target represents the success of the methodology used. (A) The first image the viewer is looking to SW. The second is an E-W view.

Other targets within Malvinas and WRM blocks have shown gold potential through evaluation with rock and soil sampling. Within WRM block the most important target area Resende has confirmed that the methodology employed was effective in generating targets for follow up mineral prospecting. In the Resende area field validation, consisting of geological reconnaissance, identified two previously mined pits. Three quartz-vein float samples taken within the pits and along the strike to the

east returned assay results of 74.32 g/t, 29.64 g/t and 1.64 g/t of gold. The best assay received came from a sample with visible gold (Fig. 17).

Within the Malvinas block the Votuporanga area was evaluated in the field and is considered to be the most important target generated by the fuzzy logic modeling. Quartz vein samples taken along the contact of quartz porphyry and mafic units returned assay results of 18.98 g/t, 10.51 g/t, 5.48 g/t and 4.25 g/t of gold, some of them with visible gold (Fig. 17). Grid soil sampling was carried out and delineated a 500 m anomalous trends. A follow-up Reverse Circulation drilling program was planned to assess the main target areas where surface geochemistry has delineated anomalous trends.



Fig. 17. Figure showing all the positive validation over the main ranked targets.

Discussion and Conclusion

The case study shows the practical aspects of the proposed fuzzy mineral favorability index and in identifying exploration targets for lode-type gold deposits in the Andorinhas greenstone belt, Brazil. The proposed method identifies fifty seven geologically consistent targets for further detailed exploration. A follow-up RC drilling program is underway in the Marcinho target with narrow but interesting grades and is proposed for other targets.

Data integration using GIS and interpretation resulted in the following main conclusions with respect to lode-type gold exploration potential in the Rio Maria Province.

- * Based on the GIS-based prospectivity analysis, there is considerable potential for lode-type gold deposits along the Andorinhas Greenstone Belt, and several prospective areas can be defined associated with mafic and iron formation units,
- * Several deposits within Rio Maria and Identidade Greenstone Belt are associated with felsic units and this is demonstrated by the fuzzy logic models;
- * Many of the previously known targets that have been re-identified should be re-evaluated with a focused research effort to best identify those targets which show the most promise for discovery of a gold deposit.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the staff of the Troy Resources NL/Reinarda Mineração Ltda for their support in this research. The present and former JV partners, Talon Metals Corp and Horizonte Minerals are also thanked for the permission to publish this paper. In particular, we would like to thank the Peter J. Doyle, Troy's VP Exploration & Business Development for his continued support, comments, and useful discussions of exploration targeting. Prof. A. Silva acknowledges the CNPq for her research grant.

REFERENCES

- Althoff, F.J., Barbey, P., Boullier, A.M., 2000, 2.8–3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Res.*, v. 104, p. 187–206.

- An, P., Moon, W.M., and Bonham-Carter, G.F., 1992, On a knowledge-based approach of integrating remote sensing, geophysical and geological information: Proc. IGARSS'92 (Houston, Texas), p. 34–38.
- Araújo, O.J.B., Maia, R.G.N., João, X.S.J. & Costa, J.B.S., 1988, A megaestruturacao arqueana da Folha Carajás. Inc Simp. Latinoamericano Geol 7, Belém, SBG, proceedings, v.1, p 324-333.
- Bonham-Carter, G.F., 1994, Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon, Oxford, 398 p.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M., 2006, Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás metallogenic province, eastern Amazonian Craton. In: R. Dall'Agnol, L.T. Rosa- Costa, E.L. Klein (eds.) Symposium on Magmatism, Crustal Evolution and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Abstracts Vol. and Field Trips Guide. Belém, PRONEX-UFPA/ SBG-NO, 150 p.
- Docegeo (Rio Doce Geologia e Mineração - Distrito Amazônia), 1988, Revisão litoestratigráfica da província mineral de Carajás, Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Volume Província Mineral de Carajás-Litoestratigrafia e Principais Depósitos Minerais, Anexos, p.11-54.
- Efimov, A.V., 1978, Multiplikativniyi pokazatel dlja vydelenija endogennykh rud aerogamma-spectrometriceskim dannym. In: Metody rudnoj geofiziki, Leningrado, Naucnoproizvodstvennojc objedinenie geofizica Ed., 59-68.
- Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI), 2009, ArcGIS. Professional GIS for the desktop, versão 9.3.1 CA.
- Gastal, M.C.P., 1987, Petrologia do Maço Granítico Musa. Sudeste do Pará. Belém: Unpublished M.Sc. thesis, Centro de Geociências, Universidade federal do Pará. 316 p.
- Goldfarb, R.J., Miller, L.D., Leach, D.L., and Snee, L.W., 1997, Gold deposits in metamorphic rocks in Alaska: ECONOMIC GEOLOGY MONOGRAPH, v. 9, p. 151–190.
- Goldfarb, R.J., Baker T., Dubé, B., Groves, D.I., Hart, C.J.R., Gosselin P., 2005, Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes, in Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 407-450.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., and Robert, F., 1998, Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types: Ore Geology Reviews, v. 13, p. 7–27.
- Harris, J.R., 1989, Data integration for gold exploration in eastern Nova Scotia using a GIS: Proc. Remote Sensing for Exploration Geology (Calgary, Alberta), p. 233–249.
- Harris, J.R., Wilkinson, L., and Broome, J., 1995, Mineral exploration using GIS-based favourability analysis, Swayze Greenstone Belt, northern Ontario: Proc. Can. Geomatics Conf. (CD-ROM), National Defense.
- Harris, J.R., Wilkison, L., Heather, K., Fumerton, S., Bernier, M.A., Ayer, J. and Dahn, R., 2001, Application of GIS processing techniques for producing

- mineral prospectivity maps – A case study: Mesothermal Au in the Swayze Greenstone Belt, Ontário, Canada. *Natural Resources Research*, Vol 10, No. 2. p. 91-124.
- Harris, J.R., Sanborn-Barrie, M., Panagapko, D., Skulski, T., and Parker, J.R., 2006, Gold prospectivity maps of the Red Lake greenstone belt: application of GIS technology: *Can. J. Earth Sci.*, v. 43, p. 865–893. doi:10.1139/E06-020.
- Huhn, S.R.B., 1992, Geologia, controle estrutural e gênese do depósito aurífero Babaçu, região de Rio Maria, sul do Pará: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Universidade de Brasília, 169 p.
- Huhn, S.R.B., Santos, A.B.S., Amaral, A.F., Ledshan, E.J., Gouvêa, J.L., Martins, L.P.B., Montalvão, R.G.M. & Costa, V.G., 1988, O terreno granito-greenstone da Região de Rio Maria, sul do Para. In: *Cong Brás Geol 35, Anais, Belém, SBG*, v.3, p. 1438-1452.
- Holdsworth, R.E., and Pinheiro, R.V.L., 2000, The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: insights from the Archaean Carajás fault zone, Amazon, Brazil. *Journal of Structural Geology*, v. 22, p. 1105-1124.
- Jaques, A.L., Wellman, P., Whitaker, A. and Wyborn, D., 1997, High-resolution geophysics in modern geological mapping. Commonwealth of Australia. AGSO *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17 (2), p. 159-173.
- Kemp, L.D., Bonham-Carter G.F., Raines G.L. & Looney, C.G, 2001, Arc-SDM and DataXplore-spatial data modeler for Arcview and Spatial Analyst.
- Leite, A.A.S., Dall’Agnol, R., Macambira, M.J.B., Althoff, F.J., 2004, Geologia e Geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara-PA e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências* 34 (4), p. 447-458.
- Mapinfo, 2008, MapInfo Professional, version 9.5. Pitney Bowes Software Inc.. User Guide.
- Nascimento, J.S., & Biagini, D.O., 1988, Conhecimento atual da jazida de ouro de Lagoa Seca, sul do Pará. In: *Cong. Bras. Geol.*, 35, Belém, 1988. Anexo aos Anais... Belém, SBG, p.143-155.
- Nykänen, V., Groves, D. I., Ojala, V.J., Eilu, P. and Gardolli, S.J., 2008, 'Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper - gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland', *Australian Journal of Earth Sciences*, 55 (1), p. 25–38.
- Oliveira, C.G. 1987, Mineralizações auríferas de Diadema, Pará: Unpublished M.Sc. thesis, Brasília, Universidade de Brasília, 93 p.
- Oliveira, M.A., Dall’Agnol, R., Althoff, F.J., Leite, A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 27, p. 146-160.
- Pan, G., Harris, D.P., 2000, Information synthesis for mineral exploration: Oxford Univ. Press, New York, 461 p.

- Pires, A.C.B., 1995, Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25 (1), p. 61-68.
- Poulsen, K.H., Robert, F., and Dubé, B., 2000, Geological classification of Canadian gold deposits: Geological Survey of Canada Bulletin 540, 106 p.
- Profile Analyst, 2010, Profile Analyst Professional, version 11.0. Encom, Pitney Bowes Software Inc., User Guide.
- Raines, G.L., 1999, Evaluation of Weights of Evidence to Predict Epithermal-Gold Deposits in the Great Basin of the United States. *Natural Resources Research*, 8 (4): 257 – 276.
- Raines, G.L., and Bonham-Carter, G.F., 2006, “Exploratory Spatial Modelling Demonstration for Carlin-type deposits, Central Nevada, USA, using Arc-SDM,” Harris, J. R. (editor), in *GIS Applications in Earth Sciences: Special Publication*. Geological Association of Canada, Special Publication 44, p. 23–52.
- Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., and Kemp, L.D., 2000, Weights of Evidence An Arcview Extension for Predictive Probabilistic Modeling: ArcUser. ESRI.
- Raines, G.L., Sawatzky, D.L., Bonham-Carter, G.F., 2010, New fuzzy logic tools in ArcGis 10. ArcUser, ESRI, 13 p.
- Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B. T., Dobak, P. J., Mcewan, C. J., Rowe, R. R., Zhou, X., 2007, Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types, in *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*, edited by B. Milkereit, p. 691-711.
- Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., Looney, C.G., Souza Filho, C.R., 2004, ARCSDM 3.1: ArcMAP extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis (<http://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM31/>).
- Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., Looney, C.G., 2009, Spatial Data Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks. (<http://arcscripits.esri.com/details.asp?dbid=15341>).
- Silva, A.M., 1999, Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero: Unpublished PhD. thesis n°. 29, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195 p.
- Souza, C.S., 1999, Gênese e controle do depósito aurífero de Lagoa Seca, Greenstone Belt de Andorinhas, Rio Maria, PA: Unpublished M.Sc. thesis n°. 146, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195 p.
- Souza Z.S., 1994, Geologia e petrogênese do “Greenstone Belt” Identidade: implicações sobre a evolução geodinâmica do terreno granito-“greenstone” de Rio Maria, SE do Pará: Unpublished PhD. thesis, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 624 p.

- Souza, Z.S., Potrel, A., Lafon, J.M., Althoff, F.J., Pimentel, M.M., Dall'Agnol, R., Oliveira, C.G., 2001, Nd, Pb and isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, v. 109, p. 293-315.
- Surpac Minex Group, 2009, Surpac 6.1.4, Pty Ltd, Gemcom Company, Perth, Western Australia, User Manual.
- Tassinari, C.C.G., Macambira, M., 2004, A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantessi-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (org.). *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: BECA, p. 471-486.

- HOOVER, D. B., PIERCE, H. A. 1990. Annotated bibliography of gamma-ray methods applied to gold exploration: US Geol. Survey Open-File Report 90-203, 23p.
- HUHN, S.R.B., 1992. Geologia, controle estrutural e gênese do depósito aurífero Babaçu, região de Rio Maria, sul do Pará. UnB, Brasília, Dissertação de Mestrado, 169p.
- HUHN, S.R.B., MARTINS, L.P.B. & MONTALVAO, R.M.G., 1986. Caracterizações petrográficas, texturais e estruturais dos fluxos mafico-ultramaficos do greenstone belt Seringa, sul do Estado do Pará. In: 34th Congr. Bras. Geol., SBG, Goiânia. Proceedings, vol. 2, pp. 648–662.
- HUHN, S.R.B., SANTOS, A.B.S., AMARAL, A.F., LEDSHAN, E.J., GOUVÊA, J.L., MARTINS, L.P.B., MONTALVAO, R.G.M. & COSTA, V.G. 1988. O terreno granito-greenstone da Região de Rio Maria, sul do Para. In: Cong Brás Geol 35, Anais, Belém, SBG, vol3, pp 1438-1452.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) 2003. Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. Viena, IAEA-TECDOC, 173p.
- KARIMI, M., VALADAN ZOEJ, M. J. 2004. Mineral Potential Mapping of Copper Minerals with GIS. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35(4): 1103 – 1108.
- KEMP, L.D., BONHAM-CARTER, G.F., RAINES, G.L., LOONEY, C.G., 2001, Arc-SDM: Arcview extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis.
- LAFON, J. M., SCHELLER, T., 1994. Geocronologia Pb/Pb em zircão do granodiorito Cumaru, Serra dos Gradaús, PA. In: 4th Simp. Geol. Amaz., Belém. Extended Abstract and Excursion Guide, pp. 321–324.
- LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÕES S.A. 2008. Relatório Final do Levantamento Aeromagnetométrico Gradiométrico e Aerogamaespectrométrico da Área Andorinhas, Rio Maria, PA. Textos técnicos e anexos. 98p.
- LEE, S. 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52(4): 615 – 623.
- LEITE, A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos Granitóides Arqueanos da Região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 330p.
- LEITE, A.A.S., DALL'AGNOL, R., MACAMBIRA, M.J.B., ALTHOFF, F.J., 2004. Geologia e Geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara–PA e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências* 34 (4), 447-458.
- LUO, X., DIMITRAKOPOULOS, R. 2003. Data-driven fuzzy analysis in quantitative mineral resource assessment. *Computers & Geosciences*, 29: 3 – 13.
- MACAMBIRA, M. J. B. 1992. Chronologie U/Pb, Rb/Sr, K/Ar et croissance de la croûte continentale dans L'Amazonie du sud-est; exemple de la région de Rio Maria, Province de Carajas, Brésil. Université Montpellier II - France. 212 p. (Tese de Doutorado).
- MACAMBIRA, M.J.B. & LANCELOT, J., 1992. Idade U–Pb em zircões de metavulcanica do greenstone do Supergrupo Andorinhas; delimitante da estratigrafia arqueana de Carajás, Estado do Pará. Congr. Bras. Geol., Sao Paulo 2, 188–189.
- MACAMBIRA, M. J. B. & LAFON, J. M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, 7: 263-288.
- MACAMBIRA, M. J. B., LANCELOT, J. R. 1996. Time constraints for the formation of the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Craton, Brazil. *International Geology Review*, 38: 1134-1142.

- MACHADO, N., LINDENMAYER, Z., KROGH, T. E., LINDENMAYER, D. 1991. U/Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Área, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49: 329-354.
- MAGALHÃES, L. A. 2008. Integração e análise espacial de dados para a geração de modelos prospectivos de mineralizações auríferas na região de Amaparí - Amapá. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 132p.
- MEDEIROS, H. 1987. Petrologia da porção leste do maciço Granodiorito Rio Maria, sudeste do Pará. Dissertação de Mestrado. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 184p.
- MIETHKE, C. 2004. Assinatura Geofísica & Modelos Prospectivos 'Knowledge-Driven' De Mineralizações Auríferas Em Zonas De Cisalhamento – Estudo De Caso No Lineamento Congonhas, Porção Sul Do Cráton São Francisco, MG. Trabalho e Conclusão de Curso. IG-UNICAMP.
- MILLER, J., MOL A.G. 2010. Melechete and M2 lodes, Mamão Mine, Andorinhas, Brasil. Relatório interno da Troy Resources NL / Reinarda Mineração LTDA. Center for Exploration Targeting, University of Western Australia, 38p.
- MILLER, H. G., SINGH, V. 1994, Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources: *Journal of Applied Geophysics*, 32, 213–217.
- MINTY, B.R.S., LUYENDYK, A.P.G., BRODIE, R.C. 1997. Calibration and data processing for airborne geophysical data. *ASGO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(2):51-62.
- MOURA, C.A.V. 1992. Geochronology and Geochemistry of the Basement Orthogneisses of the Araguaia Belt, Brazil. Durham. 236 p. (PhD. Thesis, University of New Hampshire).
- MOURA, C.A.V. & GAUDETTE, H.E. 1993. Evidence of Brasiliano-Panafrican deformation in the Araguaia belt: implications for Gondwana evolution. *Rev Brás Geocienc* 23:117-123.
- NABIGHIAN, N.M. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section: its properties and use for automated anomaly interpretation, *Geophysics*, 37: 507-517.
- NABIGHIAN, N.M. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross section, *Geophysics*, 39: 89-92.
- NABIGHIAN, N.M, GRAUCH V. J. S., HANSEN R. O., LAFEHR T. R., Li Y., PEIRCE J. W., PHILLIPS J. D., and RUDER M. E. 2005. The historical development of the magnetic method in exploration, *Geophysics*, 70, 33ND-61ND.
- NASCIMENTO, J.S. & BIAGINI, D.O., 1988. Conhecimento atual da jazida de ouro de Lagoa Seca, sul do Pará. In: Cong. Bras. Geol., 35, Belém, 1988. Anexo aos Anais... Belém, SBG, p.143-155.
- NELSON, E. P., CONNORS, K. A., SUÁREZ S., C. 2007. GIS-Based Slope Stability Analysis, Chuquicamata Open Pit Copper Mine, Chile. *Natural Resources Research*, 16(2): 171 – 190.
- NÓBREGA, R. P. 2001. Análise espacial “knowledge-driven” e “data-driven”: o uso das lógicas booleana, fuzzy e redes neurais para geração de mapas de favorabilidade mineral na região centro-leste da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 72p.
- NYKÄNEN, V. M., GROVES D. I., OJALA, V. J., EILU P., GARDOLL S. J. 2008. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper - gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55:1, 25-38.
- OLIVEIRA, C.G.. 1993. Interação entre os processos de deformação, metamorfismo e mineralização aurífera durante a evolução da zona de cisalhamento de diadema, sul do Pará. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília. 187p.

- OLIVEIRA, C.G.. 1987. Mineralizações auríferas de Diadema, Pará. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília. 93p.
- OLIVEIRA, M. A., 2005. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granodiorito Sanukitóide Arqueano Rio Maria e Rochas Máficas Associadas, Leste de Bannach-PA. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. 151 p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, M.A., DALL'AGNOL, R., ALTHOFF, F.J., LEITE, A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 27:146-160.
- OLIVEIRA, M.A., DALL'AGNOL, SCAILLET, B. 2010. Petrological constraints on crystallization of mesoarchean sanukitoid rocks, southeastern Amazon Craton, Brazil. *Journal of Petrology*, Vol 51, 10:2121-2148.
- PAN, G., HARRIS, D.P., 2000, Information synthesis for mineral exploration: Oxford Univ. Press, New York, 461 p.
- PARRO, P. S., 1998. Magnetometria e gamaespectrometria aerotranspostadas na interpretação geológico-estrutural da região dos rios Jurena e Teles Pires – MT. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 60p.
- PIMENTEL, M.M. & MACHADO, N., 1994. Geocronologia U–Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú, pp. 390–391.
- PINHEIRO, R.V.L. 2009. Technical report, structural geology. Rio Maria Region. Rio Maria - Floresta do Araguaia, Pará, Brazil. Internal Troy/Reinarda Mineração reports. 17p.
- PIRES, A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 25(1): 61-68.
- PORWAL, A., CARRANZA, E. J. M., HALE, M. 2004. A Hybrid Neuro-Fuzzy Model for Mineral Potential Mapping. *Mathematical Geology*, 36(7): 803–826.
- POULSEN, K.H., ROBERT, F., and DUBÉ, B., 2000, Geological classification of Canadian gold deposits: Geological Survey of Canada Bulletin 540.
- QUADROS, T. F. P., KOPPE, J. C., STRIEDER, A. J., COSTA, J. C. L. 2006. Mineral -Potential Mapping: A Comparison of Weights-of-Evidence and Fuzzy Methods. *Natural Resources Research*, 15(1): 49 – 65.
- QUADROS, T. F. P., KOPPE, J. C., STRIEDER, A. J., COSTA, J. C. L. 2003. Gamma-ray data processing and integration for lode-Au deposits exploration. *Natural Resources Research*, vol. 12 (1).
- RAINES, G.L, SAWATZKY, D.L, BONHAM-CARTER, G.F. 2010. New fuzzy logic tools in ArcGis 10. Esri. ArcUser. 13p.
- RIVALENTI, G.; MAZZUCHELLI, M.; GIRARDI, V. A. V.; CAVAZZINI, G.; FINATTI, C.; BARBIERI, M. A.; TEIXEIRA, W. 1998. Petrogenesis of the paleoproterozoic basalt-andesit-rhyolite dyke association in the Carajás region. Amazonian Craton. *Lithos*, v. 43, p. 235-265.
- ROBERT, F., 2004, Characteristics of lode gold deposits in greenstone belts, in 24ct Au Workshop, Hobart, CODES Special Publication 5, 1-12.
- ROBERT, F., BROMMECKER, R., BOURNE, B. T., DOBAK, P. J., MCEWAN, C. J., ROWE, R. R., ZHOU, X., 2007. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types, in Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration, edited by B. Milkereit, 2007, p. 691-711.

- ROBERT, F., POULSEN, K.H., 2001, Vein Formation and Deformation in Greenstone Gold Deposits, in Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology* **14**, 111-155.
- ROBERT, F., POULSEN, K.H., CASSIDY, K.F., and HODGSON C.J., 2005, Gold Metallogeny of the Superior and Yilgarn Cratons, in Economic Geology 100th Anniversary Volume, 1001-1034.
- ROEST, W.R., VERHOEF, J., PILKINGTON, M. 1992. Magnetic interpretation using 3-D analytic signal. *Geophysics*, *57*: 116-125.
- ROLANDO, A.P., MACAMBIRA, M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. *In: South American Symposium on Isotope Geology*, 4, Salvador. Expanded Abstracts. Salvador. (CD-ROM).
- RUY, A. C. 2009. Processamento e Interpretação dos Dados Aerogeofísicos de Alta Resolução do Greenstone Belt Palmeiras, Pará. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília. 85p.
- SABINS, F. F. 1996. Remote Sensing: Principles and interpretation. Third Edition, WH Freeman, New York, 494p.
- SARDINHA, A.S., BARROS, C.E.M., KRYMSKY, R. 2006. Geology, geochemistry, and U–Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* *20*, 327–339.
- SANTOS, M.D., 1995. O papel dos granitóides na gênese dos depósitos de ouro tipo "lode" arqueano: o caso da jazida do cumaru - PA. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- SANTOS, J.O.S., HARTMANN, L.A., GAUDETTE, H.E., GROVES, D.I., MCNAUGHTON, N.J. & FLETCHER, I.R., 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U–Pb and Sm–Nd geochronology. *Gondwana Res.* *3* (4), 453–488.
- SCHMIDT, P.W., CLARK, D.A. 2006. The magnetic gradient tensor: its properties and uses in sources characterization. *The Leading Edge*, 75-78.
- SCHOBENHAUS, C. & CAMPOS, D.A. 1984. Geologia do Brasil, MME- DNPM, Brasília, 501p.
- SIBSON, R. H., ROBERT, F. R., POULSEN, H. 1988, High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits: *Geology*, v. **16**, p. 551–555.
- SILVA, A.M. 1999. Integração de dados geológicos e geofísicos utilizando-se uma nova técnica para seleção de alvos para exploração mineral, aplicada ao Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado n°. 29, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 195p.
- SILVA, A.A.C. 2003. Processamento, interpretação e integração de dados geológicos e geofísicos da Província Mineral Tapajós. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 136 p.
- SILVA, G.G., LIMA, M.I.C., ANDRADE, A.R.F., ISSLER, R.S. & GUIMARÃES, G. 1974. Geologia Folha SB-22 Araguaia e parte SC-22 Tocantins. Projeto Radam Brasil. vol-4, pg: 22-30.
- SILVA, Jr., R.O., DALLI'AGNOL, R., Oliveira, E. P., 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozóicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, *13*.
- SOUZA, Z. S., DALL'AGNOL, R. 1995. Geochemistry of metavolcanic rocks in the Archean Greenstone Belt of Identidade, SE Pará, Brazil. *An. Academia Brasileira Ciências* **67** (2), 217-233.
- SOUZA, C. S. 1999. Gênese e controle do depósito aurífero de Lagoa Seca, Greenstone Belt de Andorinhas, Rio Maria, PA. Dissertação de Mestrado n°. 146, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

- SOUZA, Z.S. 1994. Geologia e petrogênese do “Greenstone Belt” Identidade: implicações sobre a evolução geodinâmica do terreno granito-“greenstone” de Rio Maria, SE do Pará. Tese de Doutorado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 624p.
- SOUZA, Z.S., DALL’AGNOL, R., OLIVEIRA, C.G. & HUHN, S.R.B., 1997. Geochemistry and petrogenesis of metavolcanic rocks from Archaean greenstone belts: Rio Maria region (Southeast Pará, Brazil). *Rev. Bras. Geoc.* **27**, 169–180.
- SOUZA, Z.S., MEDEIROS, H., ALTHOFF, F.J. & DALL’AGNOL, R., 1990. Geologia do terreno “granito-greenstone” da região de Rio Maria, sudeste do Pará. Congresso Brasileiro de Geologia, Natal 6, 2913–2928.
- SOUZA, Z. S.; POTREL, A.; LAFON, J. M.; ALTHOFF, F. J.; PIMENTEL, M. M.; DALL’AGNOL, R.; OLIVEIRA, C. G. 2001. Nd, Pb and isotopes in the Identidade Belt, na Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil: implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, v. 109, p. 293-315.
- SOUZA, Z.S., SANTOS, A.B., LEDSHAM, E.J., MARTINS, L.P.B., HUHN, S.R.B. & COSTA, V.G., 1988. Feições geológicas e estruturais do ‘greenstone belt’ de Identidade, região de Xinguara-Rio Maria, sul do Pará. Congresso Brasileiro de Geologia, Belém 3, 1453–1467.
- TASSINARI, C.C.G. 1996. O mapa geocronológico do cráton amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos. Tese de livre docência. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 139p.
- TASSINARI, C.C.G., MACAMBIRA, M. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantessi-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (org.). Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: BECA, 471-486.
- TASSINARI, C.C.G. & MACAMBIRA, M.J.B., 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Craton. *Episodes* 22, 174–182.
- TEIXEIRA, A.A. 2003. Integração de dados multifontes para exploração de ouro no Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG. Brasília, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UnB, 158 p.
- TEIXEIRA, A. A.; SILVA, A. M.; PIRES, A. C. B.; MORAES, R. A. V.; SOUZA FILHO, C. R., 2006. Integração e Análise de Dados Aerogeofísicos por meio da Aplicação de Técnicas de Processamento Digital de Imagens e Classificação Não Supervisionada: O Exemplo do Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG., v. 24,n4, p. 559-572.
- TELFORD, W.M., GELDART, L.P., SHERIFF, R.E. 1990b. Radioactivity method. In: Telford W.M., Gerald L.P., Sheriff R.E. (ed) *Applied geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press, 611-644.
- THURSTON, J. B. SMITH, R. S., 1997. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal: *Geophysics* **57**: 116-125
- VASQUEZ, M.L., RICCI, P.S.F., KLEIN, E.L. 2002. Granitóides pós-colisionais da porção leste da Província Tapajós. In Klein E. L., Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T. (eds) Contribuições à geologia da Amazônia. Belém, SBG-Núcleo Norte, 3:67-83.
- ZACCHI, E. N. P. 2010. Integração de dados aerogeofísicos, estruturais e geoquímicos para a caracterização de formações ferríferas bandadas na região de Itapanhoacanga, MG. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade de Brasília. 97p.