



4. AEROGEOFÍSICA

4.1. MAGNETOMETRIA

A magnetometria mede pequenas variações na intensidade do campo magnético terrestre, e assim, as rochas que possuem magnetismos variáveis, distribuídas na crosta terrestre, acima da superfície de Curie. É um método potencial, sendo assim não tem a necessidade de ser excitado. Aferindo a susceptibilidade magnética presente em alguns minerais, sendo os principais minerais com alta susceptibilidade magnética, a magnetita, ilmenita e pirrotita, pode-se calcular o campo magnético de uma superfície isolada, utilizando a seguinte expressão:

$$CMA = CM - (CME + CGM) \quad \text{Equação 4.1}$$

CMA - Campo magnético anômalo (<1%)

CM - Campo medido

CME – Campo magnético Externo (Diurnal – fontes externas ao planeta)

CGM – Campo geomagnético - IGRF (99%)

O Campo magnético anômalo apresenta um caráter dipolar e seu campo de medidas físicas é o campo magnético calculado nas variações da intensidade ou de suas componentes (x, y, z). Sua unidade de medida é nanoTesla.

O campo geomagnético recebe sua maior influência da contribuição do núcleo da Terra, mas como esse não é útil ao mapeamento, pelo fato de apresentar valores de fontes muito profundas e precisa-se retirar sua influência subtraindo o IGRF - International Geomagnetic Reference Field, que são modelos matemáticos que conseguem estimar o valor dessa parte do campo. O campo magnético do planeta, originado no interior da terra, pode ser decomposto em um somatório de movimentos harmônicos esféricos.

A teoria do dínamo implica na transformação de energia gerada do movimento de fluidos em energia do campo magnético, na qual as fontes de energia originam e mantém esse movimento, talvez pela precessão do núcleo (Pacca & Ernesto 1979).

O campo magnético terrestre provavelmente tem sua origem relacionada na relação do núcleo interno da terra (Fé e Ni-sólido), imerso no núcleo externo (Fe e elementos leves-líquido). Os movimentos desses núcleos são iniciados a partir de oscilação de íons livres do núcleo externo que geram correntes elétricas responsáveis pela produção de um campo eletromagnético.

A magnetização das rochas está relacionada à presença de minerais magnéticos presentes nestas, podendo ser causadas por uma magnetização induzida ou remanescente. A magnetização induzida se dá quando as rochas são submetidas a um campo magnético externo, sendo variável com a quantidade de seus minerais magnéticos. A magnetização remanescente está relacionada ao resfriamento de rochas ígneas a baixo da temperatura de Curie e transformações de várias naturezas que alteram o estado da rocha durante sua história geológica.

Os materiais podem se magnetizar(M) na presença de um campo magnético externo, sendo que campos de baixa amplitude magnética, a magnetização induzida é proporcional a magnitude (H) e a susceptibilidade magnética (χ) e ainda, paralela em direção ao campo externo:

$$M=\chi H \text{ Equação 4.2}$$

A susceptibilidade é considerada adimensional em ambos os sistemas, porém difere na magnitude por 4π . O campo magnético está associado as movimento de cargas elétricas gerando atração ou repulsão. Os materiais que apresentam uma susceptibilidade magnética muita fraca e em sentido oposto ao compo externo são os diamagnéticos, os materiais com atração fraca são os paramagnéticos e os materiais com forte atração são denominados ferromagnéticos (Blakely 1996).

4.2. GAMAESPECTOMETRIA

A radiação gama (γ) é detectada na superfície terrestre e resulta da desintegração de elementos radioativos. A desintegração é decorrente da instabilidade do núcleo do átomo radioativo que libera energia pela emissão de partículas alfa (α), beta (β) e radiação gama (γ).

As principais fontes de radiação gama provêm da desintegração natural do potássio (^{40}K), urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th) que estão presentes na composição da

maioria das rochas em superfície. Entretanto somente podem ser detectadas até aproximadamente 40 cm de profundidade.

A contagem total de radiação é obtida pela medida de todos os raios gama dentro da janela energética de 0,41-2,81 MeV, estabelecida para a contagem total. Cada elemento possui uma janela onde as suas energias estão centradas: O potássio monitora os raios gama com valor de energia de 1,46 MeV pelo ^{40}K . Os isótopos ^{238}U e ^{232}Th não emitem radiação gama, porém seus isótopos decorrentes do decaimento radioativo (^{214}Bi e ^{208}Tl) emitem raios gama com energias centradas em 1,76 e 2,61 MeV, respectivamente (Blum 1999).

As emissões de radiação gama são influenciadas por diversos fatores, sendo sua medição prejudicada pela umidade, cobertura vegetal e intemperismo, que afetam não medidas por mobilização química e física. O relevo também pode influenciar as aferições devido a lixiviação dos materiais que podem ser misturados, confundindo a interpretação.

4.3. Conceitos teóricos da aquisição, pré-processamento e processamento

As características de aquisição e pré-processamento foram obtidos dos relatórios confeccionados pela empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A., responsável pelo levantamento utilizado neste trabalho, que tem como referência base os padrões definidos pela IAEA – International Atomic Energy Agency e outros materiais referentes aos levantamentos aeromagnetométricos e aerogamaespectométricos. Em geral, o arranjo teórico comentado a seguir é muito semelhante aos levantamentos aerogeofísicos atuais, porém as características dos equipamentos, aeronaves e região, como topografia e a própria geologia, são diferentes.

Apesar de ser baseada no aerolevanteamento que forneceu dados para esta dissertação, a teoria da aquisição pode servir de exemplo para a compreensão de outros aerolevanteamentos.

4.3.1 Conceitos teóricos da aquisição

Antes de detalhar a metodologia aplicada na aquisição e processamento, é necessário conhecer as características das aeronaves, dos equipamentos e aparelhos utilizados. A aeronave PR-FAS por ser uma aeronave Cessna Caravan, que possui asa

alta e um monomotor de 675 HP, tem a possibilidade de voar com uma velocidade aproximada de 260 km/h, ou seja, uma velocidade mais lenta que a aeronave PT-WQT, que é um Cessna Titan 404 de asa baixa, bimotor com 375 HP (cada) e voa a aproximadamente 302 km/h. Essas diferenças foram fundamentais na junção das linhas no pré-processamento no levantamento da área do Arco de Mara Rosa. O contrato previamente estabelecido com a CPRM solicitava 10 amostras de magnetometria por segundo e 1 gamaespectométrica por segundo. O magnetômetro do PR-FAS realiza uma amostra a cada 7,2m e o PT-WQT a cada 8,4m; já o gamaespectômetro realiza uma leitura a cada 72m e 84m, respectivamente. Para resolver esse problema é necessário realizar uma linha de interposição entre as aeronaves.

O aeromagnetômetro utilizado foi de vapor de césio da marca e modelo Scintrex CS-2, com resolução de 0,001nT instalado na cauda (stringer). O gamaespectômetro utilizado era da marca Exploranium GR-820 de 256 canais espectrais com o volume dos cinco cristais detectores de NaI (Iodeto de Sódio) de 2.560 pol³ (*down*) e 512 pol³ (*up*); nesse caso, foram usados três cristais detectores – sendo dois de 1024 polegadas cúbicas cada e um de 512 - totalizando 2560 polegadas cúbicas de detectores voltadas para baixo (*downward looking*) e dois cristais de 256 polegadas cúbicas cada, totalizando 512 polegadas cúbicas voltadas para cima (*upward looking*). O detector (*upward looking*) monitora as radiações decorrentes da influência do radônio na faixa energética do canal do urânio (1,66 a 1,86 MeV).

As leituras são posicionadas com sistema de observação de satélite GPS da marca e modelo Trimble AGGPS 132 de 12 Canais do tipo DGPS com sua correção feita em tempo real o que possibilita precisão melhor do que 10 m. Essas informações são transmitidas ao mesmo tempo ao piloto e operador num *display*, assim, a correção do posicionamento da aeronave na linha programada pode ser feita com maior rapidez. A altitude da aeronave é controlada pelo altímetro do radar, que possui precisão de 5 pés e alcance de 2.500 pés, e pelo barômetro de precisão com alcance semelhante.

Dois magnetômetro terrestres Overhauser do tipo GEM GSM-19 foram instalados no aeroporto de Uruaçu (GO) para controle da variação diurna do campo magnético terrestre (figura 4.1). Cada um possui sensibilidade de 0,1 nT com medidas do campo magnético total aferidas a cada 3 segundos; a correção é realizada diariamente no pré-processamento de cada vôo pelo geofísico de campo.

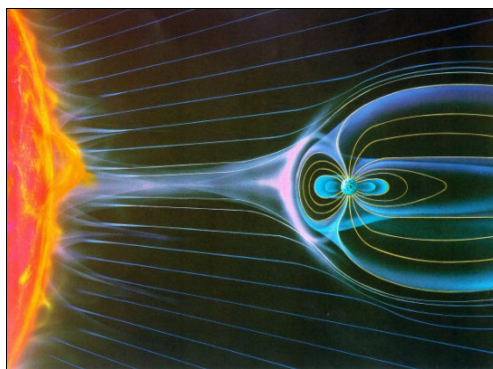


Figura 4.1. - Tempestade magnética e ventos solares interagindo com o campo magnético terrestre (ESA, 2005).

Os vôos são filmados em VHS ou digital para que anomalias e ruídos antrópicos possam ser analisados.

4.3.2. Testes e calibrações

Antes do deslocamento das aeronaves para a região do levantamento, é necessário calibrar os equipamentos em diferentes testes. No sistema detector aerogamaespectrométrico são realizados três etapas. A primeira seria uma estatística com tanques de calibração transportáveis, constituídos por blocos de concreto (*calibration pads*) com resposta radiométrica para os elementos (Figura 4.2) potássio (40^{K}), urânio (238^{U}), tório (232^{Th}) e do *background*, com a finalidade de determinar os coeficientes de espalhamento Compton do sistema detector, realizado no aeroporto de Jacarepaguá. As outras duas calibrações são dinâmicas com a aeronave em vôo. O teste DCR (*dynamic calibration range*), realizado na região de Marica, RJ em uma pista definida pela CPRM, compara os valores coletados a cada 50m por uma equipe que faz o levantamento terrestre com a passagens sucessivas nas alturas de 330, 400, 500, 600, 700 e 800 pés e duas passagens a 330 pés, na lagoa de Maricá no Estado do Rio de Janeiro.

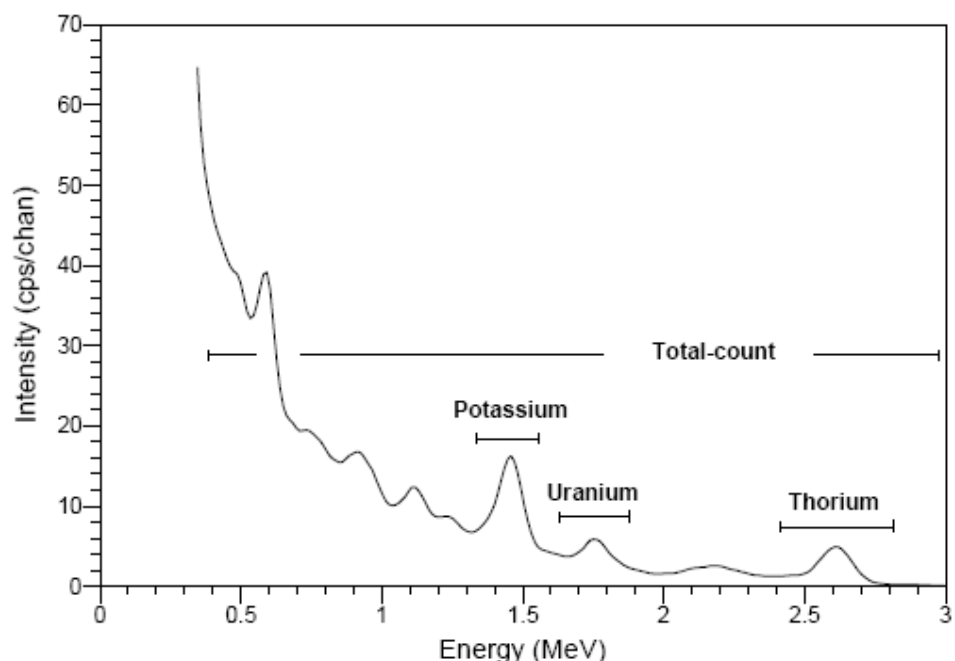


Figura 4.2 – Espectros de radiação gama mostrando as posições da janela de energia para cada elemento (I.A.E.A. 2003).

A sensibilidade do sistema gamaespectrométrico é definida como a razão entre a média dos valores aéreos, medidos na altura nominal do levantamento (100 m) - em cps para os canais de contagem total, K, U e Th - e a média dos valores das estações terrestres (em concentração) para os canais de contagem total, K, eU e eTh. As diferentes alturas servem para determinar os coeficientes de atenuação atmosférica (\square) do sistema de detectores da aeronave utilizados para a correção altimétrica.

O segundo teste em vôo que deve ser realizado antes de seguir para área de levantamento é o teste cósmico (*cosmic flight*), que deve ser realizado a uma distancia média de 20km a 30km com várias passagens em diferentes alturas para determinação dos *backgrounds* cósmico e da aeronave (tabela 4.1).

A partir da fórmula da I.A.E.A., 1991, tem-se:

$$N = a + bC, \text{ onde: } \text{Equação 4.3}$$

N é a contagem (em cps) em determinada janela;

a é o background (em cps) da aeronave em determinada janela;

b é a razão entre a contagem em determinada janela e a contagem no canal cósmico;

C é a contagem na janela cósmica;

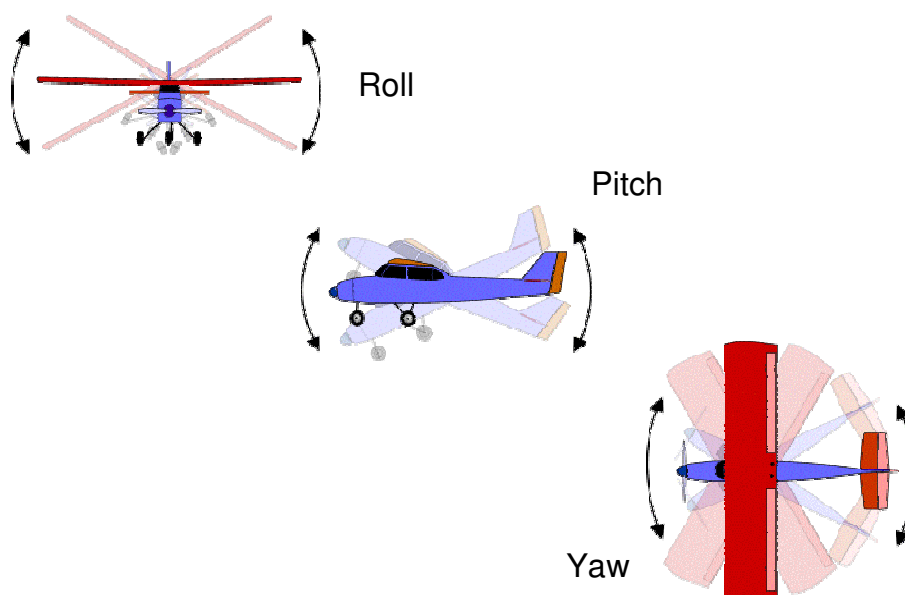
Altitude (pés)	Cósmico (cps)	U (cps)	K (cps)	Th (cps)	Uup (cps)	CT (cps)
2000	165,8	7,1	26,7	6,8	1,6	207,0
3500	195,4	8,4	28,0	7,6	1,8	233,8
5500	248,7	10,4	30,5	9,9	2,3	276,1
7500	324,2	12,8	33,8	12,5	2,7	334,1
9000	397,3	15,2	37,5	15,6	3,4	393,1
10500	492,1	18,6	41,2	19,0	3,8	467,3
11500	568,7	21,1	44,1	22,2	4,6	529,7
12500	653,8	24,5	47,9	25,8	5,2	600,5
13500	756,3	28,2	52,5	29,8	5,9	679,0
14500	872,7	31,8	55,9	34,1	6,6	752,6

Coefficiente	C. Total	K	U	Th	U up
<i>a</i> (cps)	81,38	20,118	1,4667	0,0607	0,4437
<i>b</i>	0,7828	0,0421	0,035	0,0391	0,0072

Tabela 4.1. - Exemplo do teste de vôo cósmico realizado pela aeronave PR-FAZ (Lasa, 2004).

Na região do aerolevanteamento, ainda anterior a produção das linhas, é necessário calibrar o radar altímetro da aeronave com um teste que consiste em passagens com diferentes alturas entre 200 pés a 800 pés, variando a cada 100 pés sobre uma base de altitude conhecida, comparando com as leituras do barômetro.

No local do aerolevanteamento são necessários alguns testes iniciais, como o teste de Compensação Magnética Dinâmica (FOM- Figure of Merit), que consiste em eliminar os ruídos no campo magnético induzido pelo movimento da aeronave. Esse ruído é proveniente da complexa assinatura magnética tridimensional da plataforma que, com a mudança de atitude em relação ao vetor campo magnética terrestre, altera a intensidade deste (LASA, 2004). A compensação é feita realizando três tipos de manobras denominadas de Roll, Pitch e Yaw (figura 4.3.) nas quatro direções de vôo. O magnetômetro *fluxgate* instalado no *stringer* mede a junção dos três eixos com o *background* do campo magnético local. Os valores são processados com método de regressão a fim de determinar os coeficientes de compensação do sistema. O sistema FASDAS realiza a compensação direta, armazenando os valores coletados nas manobras e corrigindo automaticamente, o que livra o campo magnético de interferências causadas por essas manobras. No teste as manobras são realizadas em um ângulo médio de 10° por 30 segundos cada e o resultado do teste calculado pelo geofísico não deve ultrapassar 5 nT para os doze registros (tabela 4.2.). Vale lembrar que é necessária a orientação do sensor de cauda que diverge sua posição devido as diferenças do campo magnético terrestre na região estudada.



VÔO No. 009	DATA: 06.10.2004		BASE: URUAÇU (GO) - PT-WQT		
LINHA	AZIMUTE	PITCH (nT)	ROLL (nT)	YAW (nT)	TOTAL (nT)
N	360°	0,04	0,14	0,07	0,25
E	90°	0,04	0,12	0,09	0,25
S	180°	0,07	0,07	0,02	0,16
W	270°	0,08	0,10	0,08	0,26
Somatório					0,92

Tabela 4.2 e Figura 4.3 – relação das manobras realizadas no teste e tabela de cálculo do teste de compensação magnética dinâmica realizado no dia 06/10/2004 pela aeronave PT-WQT (Lasa, 2004).

Os valores magnéticos coletados possuem um atraso na recepção do sinal, pois o sensor se encontra no *stringer* e o sistema que armazena os dados está no interior da aeronave, o que gera um atraso muito pequeno; às vezes esse valor é ínfimo como foi o caso desse levantamento, sendo assim, o erro de paralaxe não foi observado nos dados radiométricos, não sendo então necessário, sua correção.

Diariamente são realizados testes em solo e no vôo. Os testes de amostras radiométricas no solo são para verificar o funcionamento do sistema gamaespectométrico e para isso utiliza-se amostras de mão dos elementos Potássio, Urânio, Tório e Background. O avião deve sempre estar estacionado no mesmo local e o teste deve ser realizado antes e após o vôo (figura 4.4).

Os testes diários em vôo são os de repetibilidade radioativa (*low level*) e de *background* (*high level*). O *low level* afere se o sistema está corretamente ajustado em repetibilidade e consistência das medidas. Em uma linha de extensão mínima de 5 km são realizados perfis na altura de 100 m antes e depois das linhas de produção. O *high*

level é realizado a uma altura de 2500 pés acima da altura do local; tem a finalidade de calibrar os detectores gamaespectométricos *upward*, ou seja, que estão voltados para cima, em relação às medidas normais. O *background* é o cálculo do valor de radônio já que a essa altura não é possível captar radiação proveniente do solo.



Figura 4.4 – teste de amostras sendo realizado em solo, no interior de uma aeronave (Navajo) da empresa Fugro/Lasa antes de um voo de produção.

4.3.3. Pré-processamento de campo e correções

Ao término de cada jornada de produção, as informações coletadas eram submetidas ao processamento preliminar, conforme roteiro descrito abaixo.

O arquivo, em formato de acordo com o sistema de aquisição da aeronave, chega do voo e o operador entrega ao geofísico de campo os dados do magnetômetro terrestre e da aeronave; no caso da empresa do levantamento em referência, utiliza-se o sistema FASDAS, que é corrigido, transformado para o formato .gdb, que é trabalhado no Oasis montaj ([GEOSOFT](#)). Esse pré-processamento preliminar consiste nas seguintes etapas:

As linhas e canais são separados e interpolados. As linhas são recortadas nos limites da área e são avaliadas por um controle de qualidade padrão, definido pelo contratante, em relação ao deslocamento lateral, altura de voo, velocidade da aeronave, ruído dos sensores magnéticos e variação diurna da influência do campo magnético gerado pelo sol. O deslocamento lateral foi definido com o desvio máximo da linha de

vôo programada de 150 m em 1000 m, a altura não deveria passar de 15 m em um intervalo de 1000 m, a velocidade da aeronave PR-FAS não poderia ultrapassar os 80 m/s e o PT-WQT não poderia ter sua velocidade maior que 85 m/s. O ruído dos sensores aeromagnéticos deve ficar abaixo de 0,5 nT e a variação diurna do campo magnético solar não deve ultrapassar 5nT em 1 minuto. A verificação do nível de ruído e “spikes” é feita por meio da aplicação de um filtro passa-alta nos dados magnéticos compensados com um comprimento de 5,5 segundos e um filtro de 4ª diferença.

Esses padrões são característicos dos levantamentos requisitados pela CPRM mas não necessariamente os mesmos deixam de ser observados; o relevo, na maioria das vezes acidentado, pode gerar situações em que manter esses padrões se torna praticamente impossível.

Além desses controles, o geofísico de campo deve observar se ocorrem diariamente erros no sistema, tais como a perda localizada de algum canal como velocidade, radar altímetro e outros. As verificações estatísticas - na forma de perfis e gráficos dos valores adquiridos de radiação, magnetismo e localização (radar, barômetro e gps) - são fundamentais para a verificação de falhas no sistema.

Diariamente os testes realizados no solo e no vôo são processados. Todos são distribuídos em tabelas comparativas para melhor visualização para caso de haver algum problema no sistema de aquisição.

4.3.4. Pré-processamento no escritório

Além de supervisionar e revisar as etapas anteriores, os geofísicos no escritório central são responsáveis por realizar as correções finais, aplicações de filtros, confecção de relatório e mapas preliminares. A correção de “tempo morto” consiste na divisão das contagens dos canais radiométricos pelo valor do *livetime* registrado pelo aparelho, o que normaliza os valores brutos dos canais da contagem total, potássio, urânio, tório e urânio *upward* para contagens por segundo.

Filtros são aplicados nos dados que foram afetados por variações de alta frequência - sejam eles dados do radar altímetro, do canal de radiação cósmica e do canal de urânio up - utilizado no cálculo da influência do radônio nas medições realizadas. Dependendo do comportamento dos dados, podem-se aplicar filtros não lineares para remoção de *spikes* nos dados e a compensação de variações abruptas do

radar altímetro; a filtragem do tipo passa-baixa reduz o erro estatístico nos dados da radiação cósmica e suaviza o comportamento do radônio.

O nivelamento do canal do campo magnético consiste em ajustar as linhas de controle com base na média das diferenças (ou diferença de 1ª ordem) com as linhas de vôo. Esse procedimento assume que tais diferenças estão distribuídas de forma aleatória, de forma que um trend de no máximo 1ª ordem define o desnível entre as linhas de vôo e controle.

4.4. Processamento

O processamento levou em consideração uma abordagem regional com geração das imagens aerogeofísicas em escala 1:100.000. As mesmas foram fundamentais no mapeamento, na interpretação e na integração para que se pudesse alcançar diferentes níveis de visualização e extrair a maior quantidade de informações. A qualidade do processamento pode influenciar a interpretação dos produtos, pois as feições estruturais ou as diferenças litológicas podem ser mascaradas em um produto de baixa qualidade.

A avaliação visual dos parâmetros do aerolevante, como espaçamentos entre as linhas de produção, altura do vôo e perfis dos dados, é fundamental para escolher o melhor tratamento a ser aplicado.

Foi realizado um controle adicional para encontrar picos muito discrepantes na qualidade dos dados a partir do teste da quarta diferença, que consiste em atribuir locais corretos para os valores dos números de diferença constante e os números de diferença excedente são colocados no resultado $\frac{1}{2}$ elemento abaixo da posição atual e esses são substituídos por valores de um ponto de uma linha de vôo pela diferença entre o segundo ponto anterior e o segundo posterior ao ponto em questão.

A análise dos dados mostrou algumas anomalias de alta frequência, assim como valores espúrios nas junções das linhas de produção e na avaliação dos dados gamaespectométricos, mas que foram mantidos por possuírem significado geológico. Os dados radiométricos dos canais de contagem total, K, Th e U mostraram algumas concentrações negativas devido a não efetiva correção atmosférica e/ou calibração dos instrumentos. A solução encontrada foi adicionar aos dados o menor valor negativo mais 0,01 para que não existissem valores ≤ 0 .

As correções procuraram aproximar os valores das médias dos radioelementos com os conteúdos desses elementos em relação a crosta terrestre (2-2.5% K; 2-3 ppm U e 8-12 ppm Th) (I.A.E.A. 2003).

O tamanho de **célula unitária** das malhas foi definido como $\frac{1}{4}$ do espaçamento das linhas de vôo, evitando a perda de informação e do efeito de *aliasing* com aparecimento de frequências altas sem solução nas frequências baixas. A frequência mais alta que pode ser recuperada pela amostragem é a frequência de Nyquist, cujo comprimento de onda é exatamente duas vezes a distância entre observações sucessivas (Davis, 1986).

O espectro de potência (figura 4.5) possibilitou a identificação de três grupos de fontes magnéticas: profundidades muito rasas, de aproximadamente 0,3km, grupo menos raso entre 0,7 a 1km e fontes intermediárias com profundidade entre 1,5 e 1,7km.

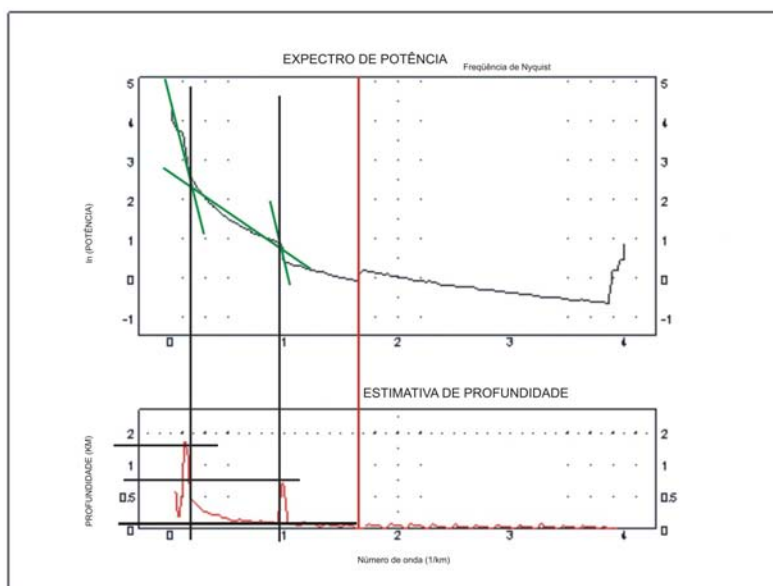


Figura 4.5 - Espectro de potência radial médio do campo magnético anômalo da área estudada.

Para um tamanho de célula de 125 metros, o **método de interpolação** que melhor se apresentou para os dados gamaespectométricos foi o da mínima curvatura. Para os dados magnetométricos os métodos bi-direcional e krigagem são os mais adequados, sendo o primeiro escolhido pela velocidade de processamento. Essa verificação foi a partir de análise visual e dos perfis das linhas, a qual demonstrou os valores que mais se aproximam do perfil dos dados brutos. Os dados gamaespectométricos foram interpolados com uma tolerância de 500m e interação de linhas até 1000m.

A mínima curvatura utiliza *splines* bi-dimensionais para mensurar os dados na direção das linhas de produção em uma malha regular, gerando uma superfície suavizada com os valores o mais próximo possível do original (GEOSOFT 1995).

O método bi-direcional se baseia na interpolação na direção das linhas de vôo, pelo método *splines* cúbicos em um intervalo igual ao do espaçamento da célula, e aplicação de um filtro passa-baixa para remover os picos e falseamento. Posteriormente a interpolação é perpendicular, na direção das linhas de controle, o que cria nós.

Devido o procedimento de aquisição ser de forma anisotrópica (superamostragem em direções paralelas), mesmo realizando todas as correções do pré-processamento, que inclui o nivelamento, normalmente isso ainda podem não ser suficientes para a remoção de erros de diversas origens que aparecem nos mapas, como anomalias elipsoidais alongadas na direção das linhas de vôo. Para reduzir o efeito desses erros, foi realizado o **micronivelamento** proposto por Blum (1999), com base em Minty (1991). A rotina consiste em i) aplicar um filtro passa-alta (PA) em uma malha A na direção perpendicular à linha de vôo, salvando o resultado em uma malha B; ii) aplicar um filtro passa-baixa (PB) na malha B, na direção da linha de vôo, salvando na malha C; iii) e para a malha final subtrai-se da malha A a malha C. Os valores dos filtros passa-alta e passa-baixa são adquiridos pelas seguintes fórmulas :

$$PA = 1a2 \times LC/TC \qquad PB = 1a4 \times LV/TC \qquad \text{Equação 4.4 e 4.5}$$

LC = Linha de controle = 5 km

LV = Linha de Vôo (produção) = 0,5 km

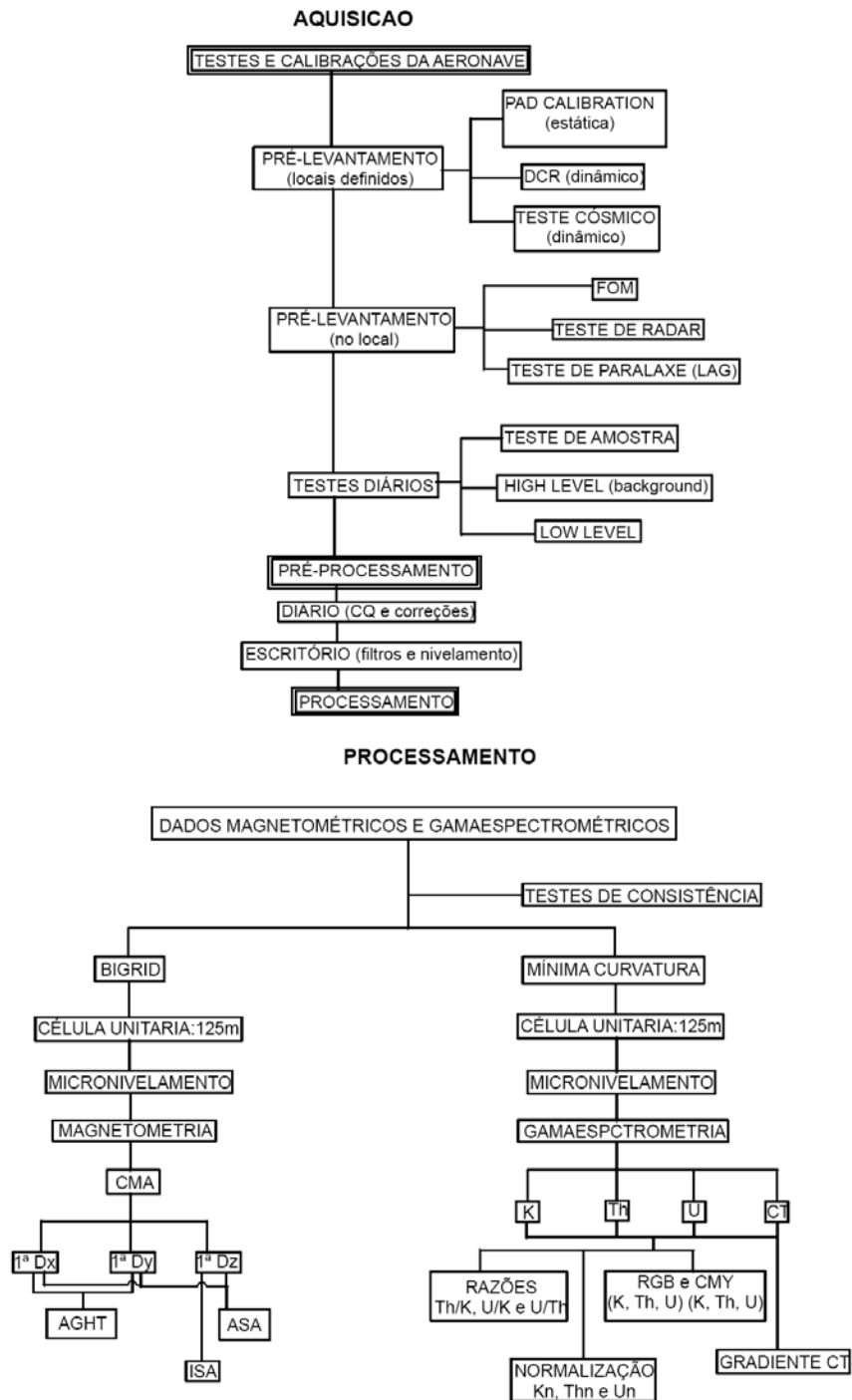
TC = Tamanho da célula = 0,125 km

Depois de várias combinações o procedimento que teve o melhor resultado foi de 56 passagens do filtro PA e 32 passagens do filtro PB.

O valor base do IGRF foi calculado na altitude média da região do levantamento (500 m), referido ao ano de 2000 e atualizado para a data de 13/09/2004 (2004,70). A média do campo magnético da área foi de 23.827,70 nT.

No processamento, interpretação e integração dos dados aerogeofísicos, utilizou-se o programa Oásis Montaj 5.1.8 e 6.4 da GEOSOFT (1995/2005) com rotinas desenvolvidas no Laboratório de Geofísica Aplicada-LGA/UnB e técnicas de aquisição

e pré-processamento desenvolvidas pelo corpo técnico da empresa LASA Engenharia e Prospecções S.A. Na interpretação foram utilizados os programas ARCGIS 9.0, Corel draw 12, Eudepth 2D 1.0 (G.R.J. Cooper 2001), Surfer 8.0. As etapas de aquisição e processamento estão discriminadas no fluxograma abaixo.



4.4.1. TÉCNICAS DE TRATAMENTO DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS E PRODUTOS

Com a finalidade de melhorar a visualização das anomalias e realçar mudanças bruscas das propriedades físicas das unidades geológicas, foram gerados novos produtos a partir dos gradientes horizontais e vertical do CMA.

As derivadas verticais são calculadas com a convolução de filtros, com frequência de resposta

$$\left[\frac{1}{N(u^2 + v^2)^{1/2}} \right]^n \quad \text{Equação 4.6}$$

n = ordem de derivada

Os sinais de menores comprimentos de onda (maiores frequências) podem ser ampliados em relação aos maiores comprimentos de onda (menores frequências).

Os filtros utilizados para as derivadas horizontais realçam as componentes horizontais e as fontes das anomalias.

As transformações para geração dos produtos podem ser realizadas no domínio do comprimento de onda, realizada pela Transformada Rápida de Fourier ou no domínio do espaço.

O Campo Magnético Anômalo (CMA) (Figura 4.6.) apresenta as anomalias sempre como duas respostas, seja um alto e um baixo. Esse caráter dipolar dificulta a sua interpretação, mas mesmo assim auxilia na interpretação da estruturação geral da área em estudo.

Amplitude do Sinal analítico (ASA) - A imagem da Amplitude do Sinal Analítico apresentam uma assinatura localizada das fontes magnéticas realçando as bordas em corpos largos e o centro em corpos estreitos, independente das direções magnéticas da fonte e do campo magnético da Terra (Blum *et al.* 1999). Pode ser facilmente derivada de três gradientes ortogonais do campo magnético (Roest, 1992) como na expressão:

$$[A(x,y)] = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z}\right)^2} \quad \text{Equação 4.7}$$

Além de posicionar as fontes em sua máxima amplitude, pode melhor representar os contatos, como observamos na [Figura 4.7](#).

Inclinação do Sinal Analítico (ISA) - Marca o comportamento espacial do vetor do sinal analítico no plano vertical que contém a resultante de sua componente horizontal ([Blakely 1996](#)). É uma estimativa do mergulho da fonte causadora e conseqüentemente o contraste localizado de diferentes susceptibilidades ([Blum et. al.1999](#)), ou seja, o ângulo formado entre os quocientes resultantes da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal. O ângulo pode ser definido pela seguinte fórmula:

$$\phi = \arctan \left[\frac{\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial y}\right)^2}} \right] \quad \text{Equação 4.8}$$

Onde, $\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial z}$ é a derivada vertical e $\sqrt{\left(\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_{\Delta}}{\partial y}\right)^2}$ é a amplitude do gradiente horizontal total.

As imagens ISA são eficientes para mostrar as feições lineares do relevo magnético ([Figura 4.10](#))

Derivada vertical (Dz) - Transformando o campo magnético anômalo linearmente por meio de derivada, a primeira da componente vertical z em anomalia magnética realça as altas freqüências do sinal analítico. Consiste em estimar a taxa de variação do campo magnético anômalo a medida que se distância ou se aproxima verticalmente da fonte causadora ([Blakely 1996](#)).

O realce das altas freqüências pode fornecer informações sobre os contatos, descontinuidades e lineamentos ([Figura 4.9](#)).

Amplitude de Gradiente Horizontal Total (AGHT) - A Amplitude do Gradiente Horizontal Total revela os picos, em uma análise pontual, que estão acima dos limites das fontes causadoras de anomalias, o que torna a visualização mais abrangente. Indica mudanças laterais abruptas, distinguindo mudanças litológicas e

estruturais (Figura 4.8). É gerada a partir das derivadas x e y como observados na seguinte fórmula:

$$h(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial G(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G(x,y)}{\partial y}\right)^2} \quad \text{Equação 4.9}$$

Onde G (magnitude) = raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas de um dado campo potencial Mz(x,y).

Imagens Compostas – Combinações entre os produtos transformados linearmente podem fornecer imagens eficientes na análise conjunta de domínios e lineamentos magnéticos como as composições binárias ACISA (ASA cor + ISA cinza) (figura 4.11) e AICSA (ASA cinza + ISA cor) (Figura 4.12).

Deconvolução de Euler (Figura 4.24.) - Técnica utilizada para a interpretação quantitativa em três dimensões de um conjunto de anomalias. Relaciona as derivadas horizontal e vertical com a posição da fonte causadora da anomalia, posicionando-a nas dimensões X,Y e Z em coordenadas definidas. Trata do procedimento integrado da localização das fontes magnéticas por meio da relação de homogeneidade de Euler para campos potenciais (Blakely 1996).

$$\nabla^2 T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = 0 \quad \text{Equação 4.10}$$

Sendo T= a função do campo anômalo e para qualquer solução a esta equação de Laplace que suas derivadas primeiras são contínuas e suas derivadas segundas existem é uma função harmônica, assim suas derivadas também. A função do campo magnético (T) é homogênea em grau n se satisfaz a Equação de Euler:

$$\frac{z\partial T}{\partial z} + \frac{z\partial T}{\partial z} + \frac{z\partial T}{\partial z} = nT \quad \text{Equação 4.11}$$

A homogeneidade (índice de atenuação ou estrutural = n) representa a taxa de variação das respostas magnéticas do alvo com a distância entre os pontos. O grau de complexidade ou geometria da fonte magnética definido por Reid 1990 tem como: índice 0 = representa contatos geológicos simples; índice 1 = linhas monopolares, representam diques e falhas; índice 2 = linha de dipolos, representam diques e falhas e índice 3 = fonte 3D, qualquer forma tridimensional bem definida.

Sabemos que os corpos geológicos nem sempre possuem formato regular definido e as anomalias são causadas por diferentes geometrias das fontes, assim, torna-se necessário aplicar todos os índices para que cada fonte tenha sua solução melhor alinhada. O índice 2 foi o que melhor se homogenizou com a área, aplicando uma janela de 7 km e tolerância 15, devido às falhas e zonas de cisalhamento que cortam a região e as faixas de ortognaisses.

O programa EUDEPH, desenvolvido para estimar uma profundidade media das fontes magnéticas, se baseia na idéia de que as camadas estão relacionadas aos corpos causadores de anomalias magnéticas com magnetização uniforme. A distancia entre as fontes, pode apresentar características tanto dipolares como polares (Thompson 1982). Usando janelas de tamanho pequeno o dado é mais confiável, pois usando uma janela maior a probabilidade de agrupar duas ou mais anomalias é maior e o resultado pode ser incorreto (Durrheim & Coopes 1998).

A deconvolução de Euler não produz modelos geológicos através do campo magnético e somente, tentativas de se aplicar em situações geológicas conhecidas (Thompson 1982).

Com base no algoritmo de interpretação 2D de Thompson, Reid *et al.* 1990 utilizou a seguinte equação de homogeneização Euler para interpretações em três dimensões, onde (x0,y0,z0) é a posição da fonte magnética, T o campo total, B o valor residual do campo total e N o grau de homogeneização ou índice estrutural:

$$x_0 \frac{\partial T}{\partial x} + y_0 \frac{\partial T}{\partial y} + z_0 \frac{\partial T}{\partial z} = N (B - T) \quad \text{Equação 4.12}$$

O programa utiliza índices estruturais um pouco diferente, como mostra a tabela (tabela 4.2) utilizada no próprio programa.

Índice estrutural	Modelos	Símbolos
1.0	Contato	+
1.5	Diques finos	x
2.0	Prisma	i
2.5	Cilindro	*
3.0	Esfera	^

Tabela 4.2 – tabela utilizada pelo programa EUDEPH para diferenciar os índices estruturais.

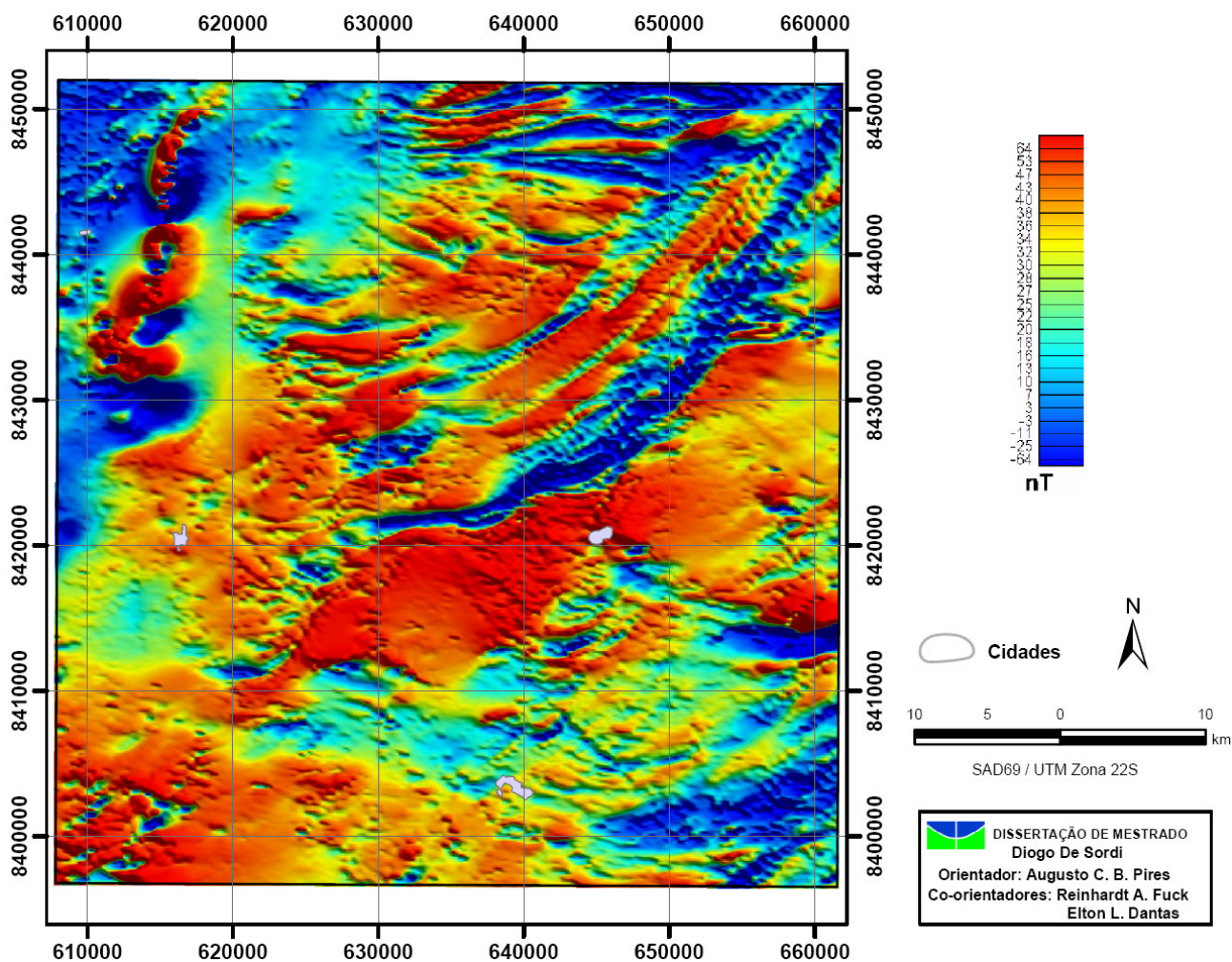


Figura 4.6 – Imagem do Campo magnético anômalo em pseudo-color.

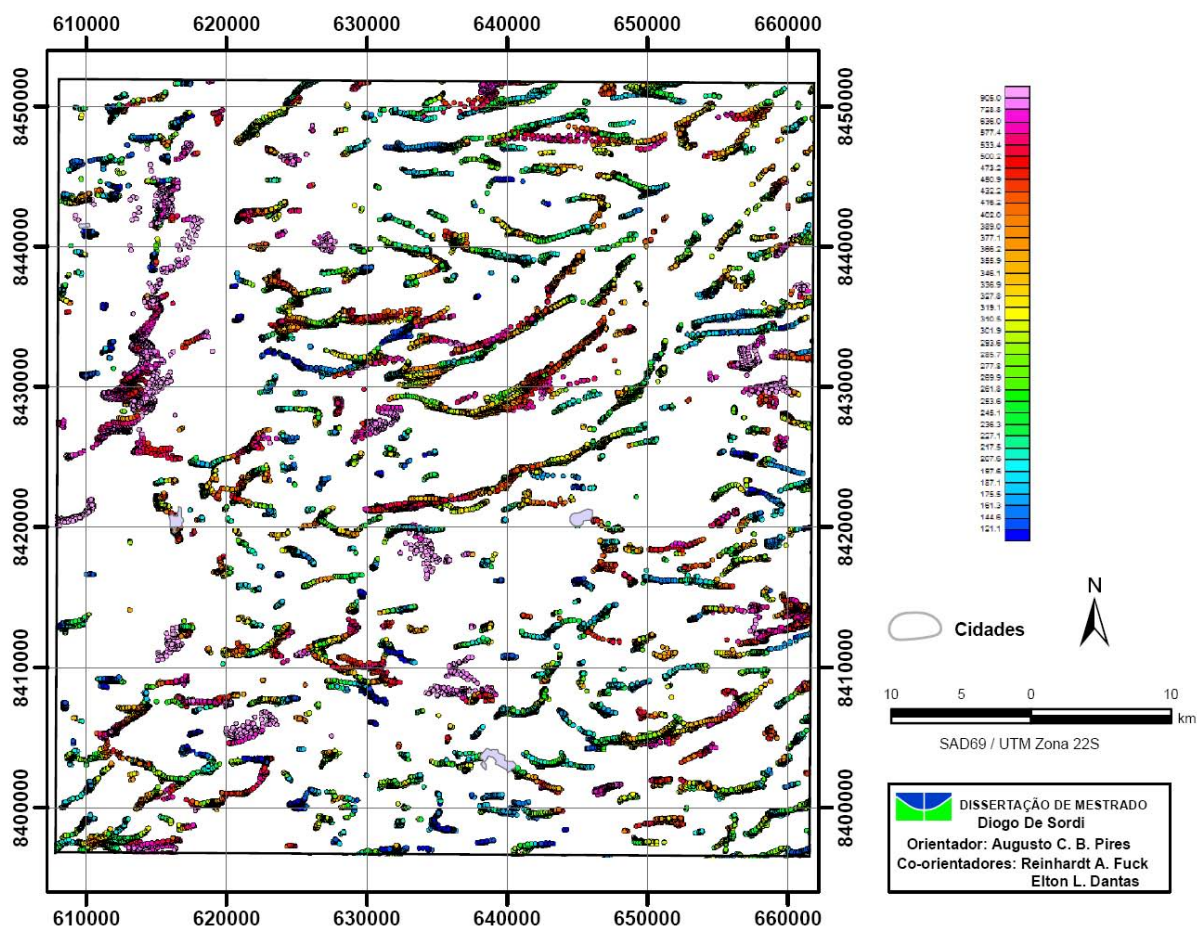


Figura 4.24 – Imagem da deconvolução de Euler (i2j7T15).

4.4.2 TÉCNICAS DE TRATAMENTO DOS DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS E PRODUTOS

O processamento dos dados gamaespectrométricos inicialmente teve como objetivo delimitar e diferenciar as unidades geológicas no mapeamento e posteriormente serviu para visualizar as rochas ultramáficas.

Quando não é originada pela superfície terrestre, a radiação gama é usualmente encarada como *background* cósmico, que é removido durante a aquisição dos dados.

Nas técnicas de tratamento interpretativo dos dados gamaespectrométricos aéreos estão incluídas as técnicas analíticas qualitativas das imagens individualmente tratadas de K, Th, U e Contagem Total; mapas de razões Th/K, U/Th e U/K; técnicas que utilizam a combinação ternária entre os canais radiométricos utilizando os padrões de cores RGB e CMY e técnica de normalização dos elementos K, Th e U. Estas técnicas serão descritas a seguir:

Contagem Total (figura 4.12): A Contagem total compreende a medida de todos os raios gama de interesse geológico abrangendo todo o espectro. Potássio, urânio e tório são elementos que ocorrem com radioisótopos que produzem raios gama de energia e intensidade suficiente para serem medidas em espectrômetros de raios gama com cada um associado a um pico (Minty 1997).

Gradiente da contagem total (figura 4.13): Este produto realça os limites das anomalias da contagem total. Aplicando filtros de primeira derivada nas direções azimutais 45° e 135°, que são as bissetrizes da direção das linhas de produção (N-S), os ruídos de aquisição são minimizados. Os resultados são positivos e desse modo não é considerado o sentido da derivada e sim a direção, independente se é uma anomalia positiva passando a negativa ou vice versa, sendo marcado a taxa de variação sem sinal.

Canal do Potássio (figura 4.16): Dos três elementos radiométricos considerados, o K é o elemento mais abundante na crosta terrestre e ocorre principalmente em Álcali-feldspatos e micas presentes nas rochas félsicas, principalmente granitóides. Pode ser facilmente lixiviado e transportado.

Canal do Tório (figura 4.14): O Th é o elemento mais inerte dos três radioelementos. Sua concentração quando superior a dos outros radioelementos indica região de maior intemperismo químico. O grande equilíbrio desse elemento faz que ele seja o melhor marcador litológico.

Canal de Urânio (figura 4.15): O U é o elemento de menor concentração. Assim como o tório, ocorre em minerais acessórios. Uraninita é o mineral de urânio mais comum como constituinte maior, ocorrem como inclusões em minerais formadores de rochas ou como grandes grãos em granitos mineralizados e pegmatitos (I.A.E.A 2003). Quando ocorre em ambientes oxidantes é solúvel, formando minerais com óxidos de ferro e carbonatos.

Mapas de Razões Th/K, U/Th e U/K (figura 4.21, 4.22 e 4.23): As razões são muito utilizadas para ressaltar um radioelemento em relação a outro e para criar contraste em regiões onde ocorreram processos de hidrotermalismo. O mapa da razão

Th/K foi usado para separar zonas de alteração potássica de outras anomalias relacionadas aos contatos litológicos, porque o tório não possui o mesmo comportamento do potássio em processos hidrotermais.

Composições em Falsa Cor (figura 4.17): São composições em falsa cor dos canais de potássio, tório e urânio. Para cada radioelemento é atribuído uma cor, nas imagens ternárias RGB: a cor vermelha (R-red) para as rochas ricas em potássio; verde (G-green) para as rochas ricas em tório e azul (B-blue) para as com urânio abundante. Para as imagens ternárias CMY: Os altos teores de potássio, tório e urânio são combinadas com as cores: C-cyan, M-magenta e Y-yellow, respectivamente.

Normalização do dados (figura 4.18, 4.19 e 4.20): Utilizando técnica proposta por [Carvalho et al. 2006](#), os dados corrigidos dos canais de K, U e Th foram normalizados para se obter concentrações relativas dos três elementos a partir das seguintes formulas:

$$K_n = \frac{K}{(K + U + Th)}$$

Equação 4.10

$$U_n = \frac{U}{(K + U + Th)}$$

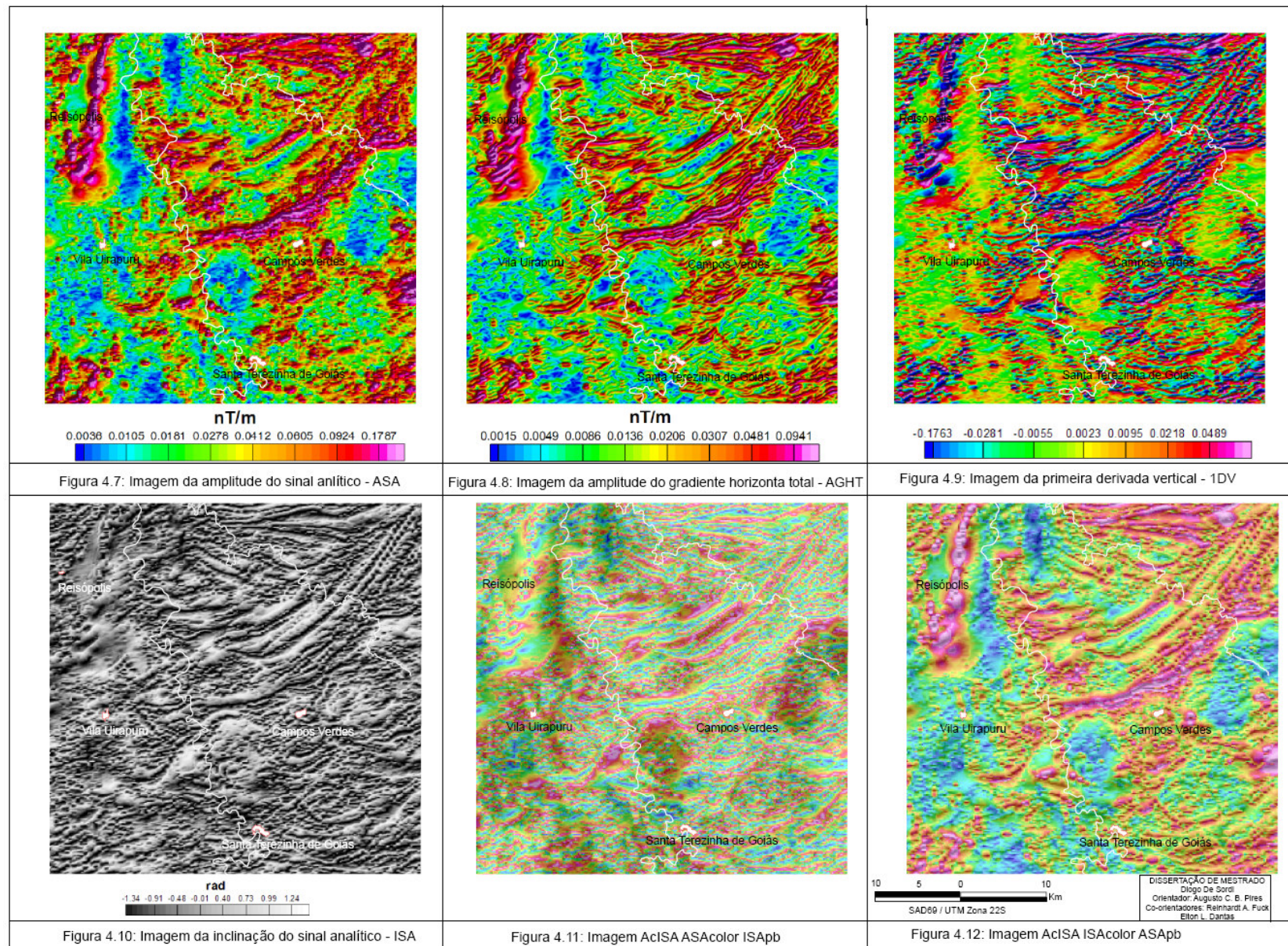
Equação 4.11

$$Th_n = \frac{\frac{Th}{4}}{\frac{(K + U + Th)}{4}}$$

Equação 4.12

Essa técnica pode ser útil para amenizar os efeitos causados pela radiação gama emitida pela vegetação e para que a concentração relativa dos elementos seja convertida a valores que melhor facilitem a interpretação.

AEROGEOFÍSICA - MAGNETOMETRIA E GAMAESPECTOTRIA



AEROGEOFÍSICA - MAGNETOMETRIA E GAMAESPECTOTRIA

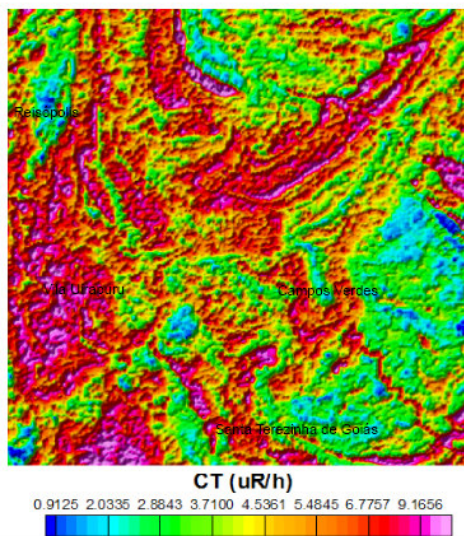


Figura 4.12: Imagem do canal de contagem total - CT

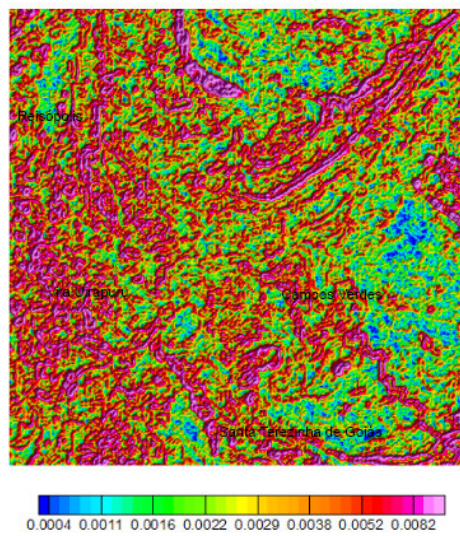


Figura 4.13: Imagem do gradiente de contagem total - GCT

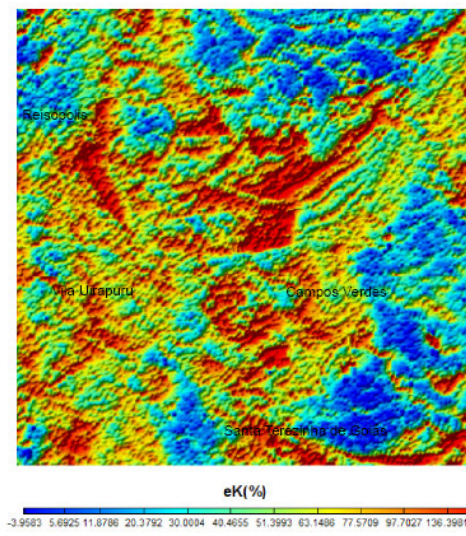


Figura 4.14: Imagem do canal de Torio - Th

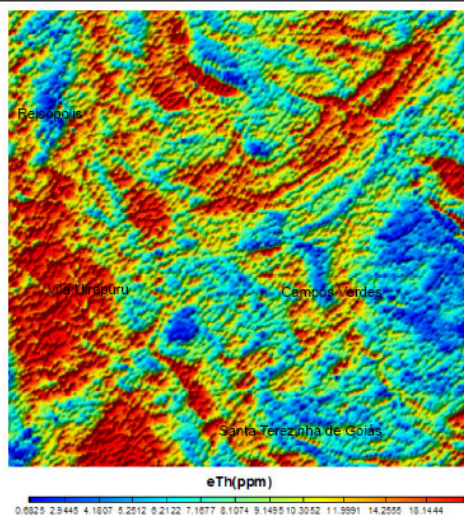


Figura 4.15: Imagem do canal de Urânio - U

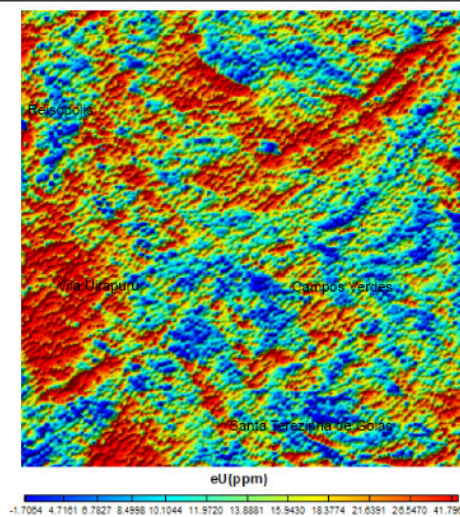


Figura 4.16: Imagem do canal de Potássio - K



Figura 4.17: Imagem da composição ternária RGB (KThU)



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Diogo De Sordi
Orientador: Augusto C. B. Pires
Co-orientadores: Reinhard A. Fuchs
Elton L. Dantas

AEROGEOFÍSICA - MAGNETOMETRIA E GAMAESPECTOTRIA

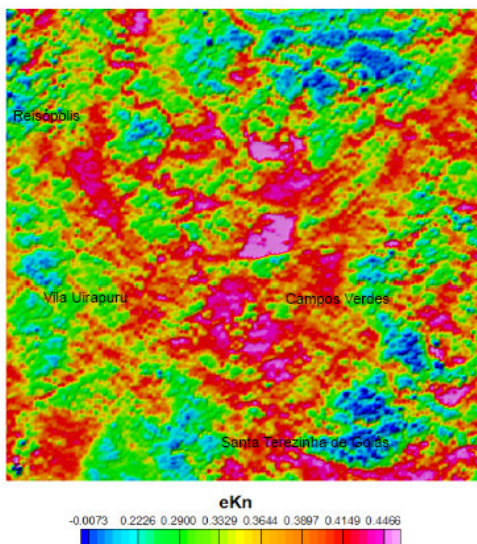


Figura 4.18: Imagem do Potássio Normalizado - Kn

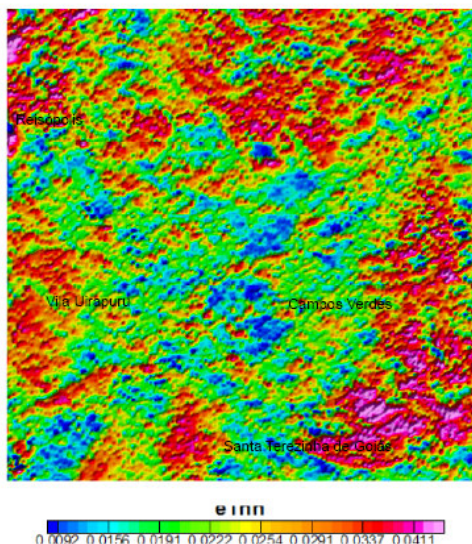


Figura 4.19: Imagem do Urânio Normalizado - Un

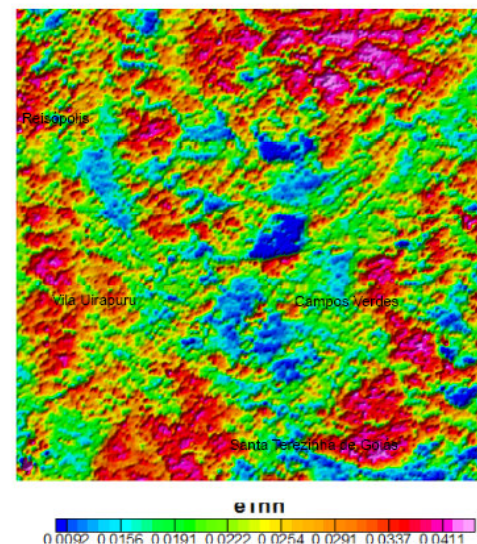


Figura 4.20: Imagem do Torio Normalizado - Thn

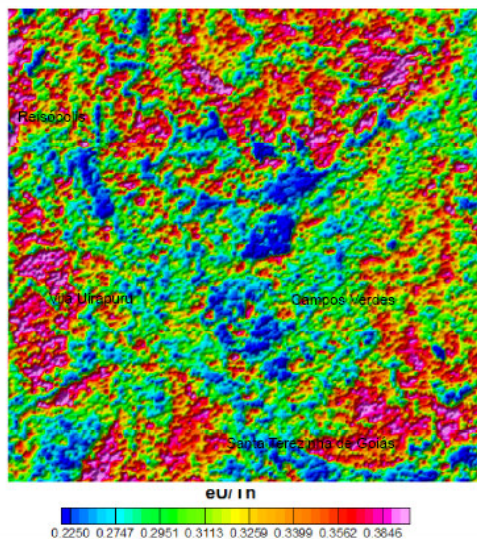


Figura 4.21: Imagem da Razão U/Th

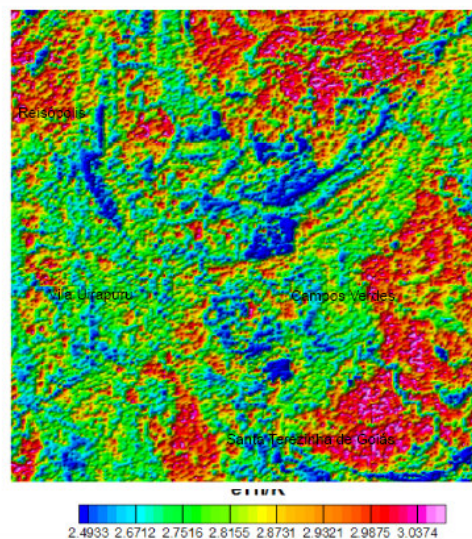


Figura 4.22: Imagem da Razão Th/K

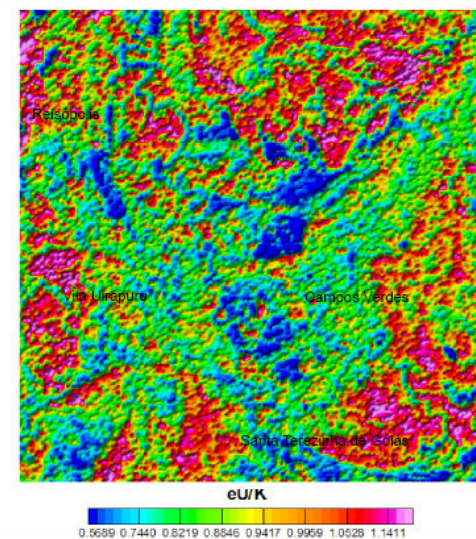
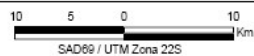


Figura 4.23: Imagem da Razão UK



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
Diogo De Sordi
Orientador: Augusto C. S. Pires
Co-orientadores: Reinhardt A. Fuok
Elton L. Dantas