

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

Victor do Couto Pereira

**Fluxo de Pós-Processamento e Inversão de Dados Aeromagnéticos na
Região “Offshore” do Estado do Rio de Janeiro.**

Niterói

2012

Victor do Couto Pereira

**Fluxo de Pós-Processamento e Inversão de Dados Aeromagnéticos na
Região “Offshore” do Estado do Rio de Janeiro.**

**Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Programa de Graduação
em geofísica da Universidade Federal
Fluminense como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado. Área de
concentração: Pós Processamento e
Inversão de dados Aero-geofísicos.**

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Silva

Niterói

2012

Victor do Couto Pereira

**Fluxo de Pós-Processamento e Inversão de Dados Aeromagnéticos na
Região “Offshore” do Estado do Rio de Janeiro.**

**Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Programa de Graduação
em geofísica da Universidade Federal
Fluminense como requisito parcial para
obtenção do título de Graduado. Área de
concentração: Pós Processamento e
Inversão de dados Aero-geofísicos.**

BANCA EXAMINADORA

Dr. Adalberto Silva

LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense

Dr. André E.E.P.D Ferraz

LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense

Dr. Alexandre Motta Borges

LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense

Niterói

2012

Agradecimentos

Agradecimentos especiais aos meus colegas de turma que sempre me apoiaram e ajudaram de todas as formas para o meu crescimento intelectual e não desistência do período de estudo.

Ao Adalberto Silva pela orientação no projeto e horas de diálogos sobre o universo geofísico, bem como o mercado de trabalho.

Ao André Etienne pelo pronto-atendimento e execução das inversões dos perfis magnéticos.

A minha família pelo costumeiro apoio desde os primeiros passos de vida.

A Manoela Mendonça, companheira inseparável e sempre dedicada aos meus interesses nestes últimos sete meses.

Ao Observatório Nacional pela primeira oportunidade extra-curricular concreta através de uma bolsa de iniciação, e por despertar o meu interesse na compreensão dos métodos potenciais, em específico o Mauro Andrade Souza.

Ao Emanuele e a Patricia Lugão pelos períodos de prática e compreensão acerca de métodos geofísicos eletromagnéticos em campo, bem como suas prazerosas viagens pelo Brasil.

Aos colegas da Geosoft que durante meu tempo de estágio, de alguma maneira colaboraram com este projeto e minha evolução no decorrer do período de estudo.

A UFF pela estrutura e ambiente tranquilo para se desenvolver e alcançar o título de bacharel em geofísica.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE EQUAÇÕES	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
3. ÁREA DE PESQUISA.....	2
3.1 Localização	2
3.2 Contexto Geológico	3
4. RELEVÂNCIA	6
5. METODOLOGIA	7
5.1 Dados aeromagnéticos	7
5.1.1 Anomalia de Campo Total	8
5.2 Métodos aplicados	10
5.2.1 Sinal Analítico	11
5.2.1.1 <i>Amplitude do Sinal Analítico</i>	12
5.2.2 Teoria da Inversão	14
5.2.2.1 <i>Deconvolução de Euler</i>	15
5.2.2.1.1 Índice Estrutural	17
5.2.2.1.2 Janela da Fonte.....	18
5.2.2.2 <i>Inversão Compacta Generalizada</i>	18
5.2.2.2.1 Informação "a priori"	19
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
7. CONCLUSÃO.....	30
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Limites da localização do corpo alvo evidenciados pelo quadrado vermelho e ainda os perfis magnéticos utilizados. As isolinhas pretas correspondem às curvas batimétricas.....	3
Figura 2: Reconstrução tectônica dos blocos continentais da América do Sul e África no Atlântico Sul evidenciando as bacias marginais continentais do Brasil. Fonte: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves, 2003.	5
Figura 3: Mapa geológico do gráben Guanabara evidenciando diques básicos do Cretáceo Inferior e rochas alcalinas do mesozóico-cenozóico. Figura retirada de Ferrari (2001).	6
Figura 4: Localização do bloco 4322 utilizado na pesquisa referente à bacia de Santos (Ferraz, 2010).....	7
Figura 5: Localização do bloco 4318 utilizado na pesquisa referente à bacia de Campos (Ferraz, 2010).	8
Figura 6: Mapa do campo magnético total evidenciando o polígono da área de estudo e a anomalia de interesse, posicionada mais ao sul do <i>grid</i> e à porção proximal NE da Bacia de Santos.....	9
Figura 7: Mapa de campo total da anomalia magnética produzida pelo corpo alcalino.	10
Figura 8: Mapa da amplitude do Sinal Analítico evidenciando o polígono da área de estudo e a anomalia de interesse mais posicionada ao sul do <i>grid</i> e à porção proximal NE da Bacia de Santos.....	21
Figura 9: Mapa de amplitude do Sinal Analítico da anomalia magnética produzida pelo corpo alcalino.....	22
Figura 10: Modelo 3D do corpo alvo e as seções 2D 8, 9, 10, 12, 16, 19 e 20 extraídas deste.....	24
Figura 11: Localização do modelo 3D em relação à linha de costa do estado do RJ.....	25
Figura 12: Seção 8. Apófise lateralmente posicionada à direita e corpo alcalino mais à esquerda.....	26
Figura 13: Seção 9. Apófise lateralmente posicionada à direita e corpo alcalino mais à esquerda.....	27

Figura 14: Seção 10. Aumento dos valores de susceptibilidade magnética à medida que se aproxima da porção mais interna do corpo alcalino, evidenciando estruturas anelares associadas.....	27
Figura 15: Seção 12. Limites do corpo alcalino intrusivo com uma forte assinatura magnética em sua porção mais central.	28
Figura 16: Seção 16. Valor de susceptibilidade limite na porção mais central do corpo alcalino e seus limites laterais bem expressivos.	28
Figura 17: Seção 19. Afinamento do corpo alcalino à medida que aumenta a profundidade.	29
Figura 18: Seção 20.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Segundo MacLeod <i>et. al.</i> (1993), as larguras da anomalia dadas pelo Sinal Analítico são proporcionais à profundidade do corpo. D é a distância entre os pontos de inflexão, L_{ma} é a largura referente à meia amplitude e p a profundidade da fonte magnética.	13
Tabela 2: Relação Fonte-Índice de Thompson (1982).	16

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Função Complexa do Sinal Analítico.....	11
Equação 2: Amplitude do Sinal Analítico 2D.....	12
Equação 3: Amplitude do Sinal Analítico 3D.....	12
Equação 4: Deconvolução de Euler 2D.....	15
Equação 5: Anomalia h; adição do nível de base.....	16
Equação 6: Análise do conjunto de soluções.....	17

RESUMO

O emprego de métodos geofísicos potenciais é capaz de fornecer informações valiosas acerca de feições geológicas de grande porte em sub-superfície. No presente estudo, dados obtidos a partir de levantamentos aeromagnéticos foram utilizados para determinar os limites e estruturas de um corpo alcalino com expressiva assinatura magnética. O corpo possui extensão aproximada de 10 km e localiza-se no nordeste da bacia de Santos, nas adjacências de Ilha Grande, Sul do Estado do Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil. O tratamento dos dados cedidos pela FUGRO, pertencentes ao bloco 4318 e 4322, foi realizado através de um fluxo de pós-processamento e inversão conduzido a partir do algoritmo proposto por Ferraz (2010). Neste, o autor faz uso de técnicas clássicas, o Sinal Analítico e a Deconvolução de Euler, a fim de criar vínculos geofísicos como informações *a priori*, posteriormente utilizadas no método de Inversão Magnética Compacta Generalizada. A partir da inversão 2D, foi gerado um modelo 3D dos quais foram extraídas seções representativas do corpo alvo e devidamente identificadas as evidências de intrusão magmática no contexto da bacia de Santos. A metodologia empregada é bastante eficiente e de suma importância principalmente na criação de vínculos geofísicos para inversões, uma vez que supre a escassez de informações de natureza geofísica, geológica ou de outro tipo, nos ambientes atualmente estudados. Ainda é possível ressaltar que a análise 2D em escalas locais do presente projeto, constitui uma boa alternativa à modelagem em larga escala de grandes conjuntos de dados, os quais dependem demasiado tempo e capacidade computacional para serem executados.

ABSTRACT

The usage of geophysical methods can provide valuable information about large geophysical features in the subsurface. In this study, data obtained from aero-magnetic surveys were used to determine the boundaries and structures of an intrusive alkaline body with significant magnetic signature. The body of approximately 10 km length is located in the northeast of the Santos basin, adjacent to the Big Island, the southern state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. The data transferred by FUGRO, belonging to the block 4318 and 4322, was made by post-processing and inversion flow driven from the algorithm proposed by Ferraz (2010). In this, the author makes use of classical techniques, the Analytic Signal and Euler Deconvolution in order to create links and geophysical information *a priori*, then used the method of Generalized Compact Magnetic Inversion. A 3D model was generated from the 2D inversion, of which representative sections of the target body were extracted from. After that evidence of magmatic intrusion in the context of the Santos basin was properly identified. The applied methodology is very efficient and extremely important especially on the creation of links to geophysical inversion, since it makes up the lack of geophysical, geological information or otherwise, in environments currently studied. It is still possible reiterated that the 2D analysis for local scales of the present project, constitutes a good alternative to modeling large-scale of large dataset, which expend too much time and requires a large computational capacity to be executed.

1. INTRODUÇÃO

Ao lidar com dados geofísicos é importante, após a aquisição e correção (processamento) destes, a utilização de técnicas interpretativas com o intuito de se obter informações acerca de feições geológicas e corpos-alvo em sub-superfície. Sendo assim, não é diferente quando se trata de dados potenciais em específico, neste estudo, os aeromagnéticos.

Dados magnéticos têm sido amplamente utilizados na determinação de profundidades de fontes ou anomalias magnéticas, o que confere à técnica grande utilidade na investigação e prospecção geofísica, que abrange desde a resolução de problemas ambientais até a exploração mineral. Devido à tamanha aplicabilidade, se faz necessário o desenvolvimento de novos algoritmos que aprimorem essa capacidade (Correia *et. al.*, 2010).

O método interpretativo de Sinal Analítico proposto por Nabighian (1972) expõe, de maneira simples e prática, consistentes inferências acerca de fontes oriundas de campos potenciais. Já Thompson (1982) sugere através da equação homogênea de Euler aplicada, modelos físicos a serem questionados quanto às suas propriedades cuja importância interpretativa é bastante confiável.

A caracterização e resolução do problema inverso, neste caso, permitem conclusões quantitativas acerca da região “*offshore*” do estado do RJ, área de interesse do presente projeto. Esta região também foi estudada por Zalán e Oliveira (2005) qualitativamente em um momento anterior, através dos mesmos dados aeromagnéticos. Ferraz (2010) realizou o estudo base qualitativo e quantitativo que reúne as técnicas clássicas de inversão, bem como sugere um método pioneiro a ser estudado e estendido para uma abordagem 3D.

De maneira geral, tais metodologias são aplicadas em casos práticos de interpretação no contexto da margem continental do sudeste brasileiro, limitado ao sul pelas bacias de Santos e Campos.

2. OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é compreender um fluxo completo de pós-processamento, tradicional, utilizando dados aeromagnéticos já processados, e cedidos pela FUGRO referentes à plataforma e talude do Estado do Rio de Janeiro, entre Sepetiba e Cabo Frio. Após abordar o contexto geológico e a disponibilidade dos dados, a metodologia proposta de inversão clássica de Deconvolução de Euler pretende obter informações *a priori* valiosas, como parâmetros físicos de rochas alcalinas os quais constituem o corpo alvo. Posteriormente, almeja-se a utilização de um método pioneiro de inversão introduzido por Ferraz (2010) a fim de estimar outros parâmetros físicos como susceptibilidades magnéticas e constituir um modelo 3D do substrato geológico alcalino na área de interesse.

Como ferramenta de auxílio a esta técnica de interpretação utilizou-se a teoria do Sinal Analítico. A partir da aplicação destas metodologias clássicas, o caráter comparativo deste trabalho, à Ferraz (2010), pretende facilitar a compreensão de técnicas amplamente aplicadas e outra pioneira no âmbito geocientífico.

3. ÁREA DE PESQUISA

3.1 Localização

A área de pesquisa corresponde à porção “*offshore*” do estado do Rio de Janeiro e está limitada a oeste pela cidade de Paraty e a leste pelo Alto de Cabo Frio (Mohriak *et. al.* 1990). Esta configuração encontra-se inserida nas bacias de Santos e Campos, ainda na plataforma continental, no embasamento raso emerso até o Alto de Cabo Frio. Esta faixa apresenta estruturas de interesse intensamente magnetizadas, que são referenciadas como domínio de

alta frequência por Ferraz (2010) em contraste com a área adjacente, onde o embasamento tende a se aprofundar.

3.1.1) Corpo-alvo

O corpo-alvo do estudo (Figura 1) encontra-se na porção sul do polígono da área de interesse e à NE da bacia de Santos. A feição é um tipo litológico de caráter alcalino bastante extenso originado por uma intrusão magmática. Esta apresenta uma clássica anomalia magnética onde é possível identificar perfeitamente o seu caráter dipolar (Figura 7), com forte remanescência magnética.

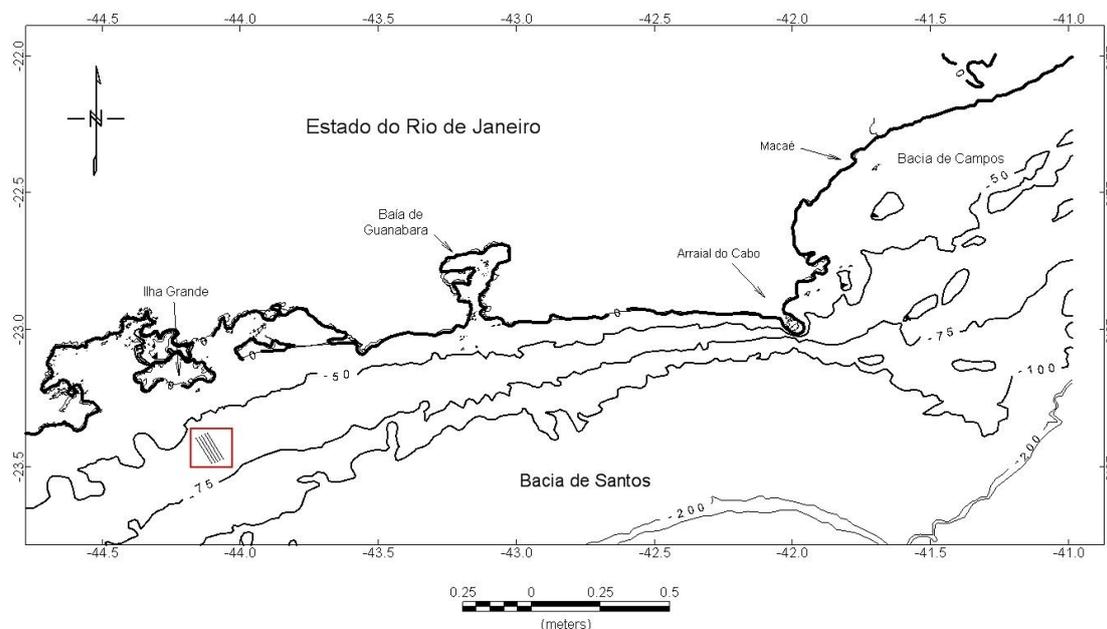


Figura 1: Limites da localização do corpo alvo evidenciados pelo quadrado vermelho e ainda os perfis magnéticos utilizados. As isolinhas pretas correspondem às curvas batimétricas

3.2 Contexto Geológico

As estruturas analisadas neste trabalho têm sua gênese associada ao processo de distensão ocorrido na abertura do Oceano Atlântico explicado sucintamente a seguir. Considera-se para tanto a caracterização da evolução e formação da margem continental leste do Brasil. Segundo Ferrari (2001) tal

configuração tem relação genética direta ou indireta nestas estruturas mesozóico-cenozóicas, podendo apresentar caráter magnético de forte interesse para o presente estudo.

Durante o mesozóico, dois grandes blocos – América do Sul e África – (Figura 2) se separaram, dando origem à margem continental do Brasil. Isto ocorreu por meio de esforços distensivos litosféricos, característicos do processo de rifteamento, originando a margem passiva leste.

O primeiro episódio magmático ocorrido durante o Cretáceo correspondeu a um típico e intenso magmatismo toleítico referente à reativação da região sudeste, e é caracterizado por um “enxame” de diques orientados preferencialmente NE-SW de basalto e diabásio. Ocorrem ainda, com menor frequência na direção ENE, e mais raramente NW, E-W e N-S (Ferrari, 1990) (Figura 3).

Já o magmatismo alcalino marcou um segundo episódio magmático. Ocorrido durante a fase *drift*, este processo apresenta poucas estruturas, porém parece se adaptar às zonas de fraqueza pré-cambrianas, adquirindo formas alongadas NE ou ENE (Almeida, 1991). Este episódio magmático ocorreu na transição do mesozóico para o cenozóico e é representado no sudeste do Brasil pelo Enxame de Diques do Rio de Janeiro e maciços (*stocks e plugs*) de rochas alcalinas principalmente félsicas (Trotta, 2004). Esta ampla distribuição alcalina possui sua maior área de ocorrência na Ilha de Cabo Frio, e constitui o corpo alvo deste trabalho, visto que se encontra dentro dos limites do levantamento aeromagnético da presente pesquisa.

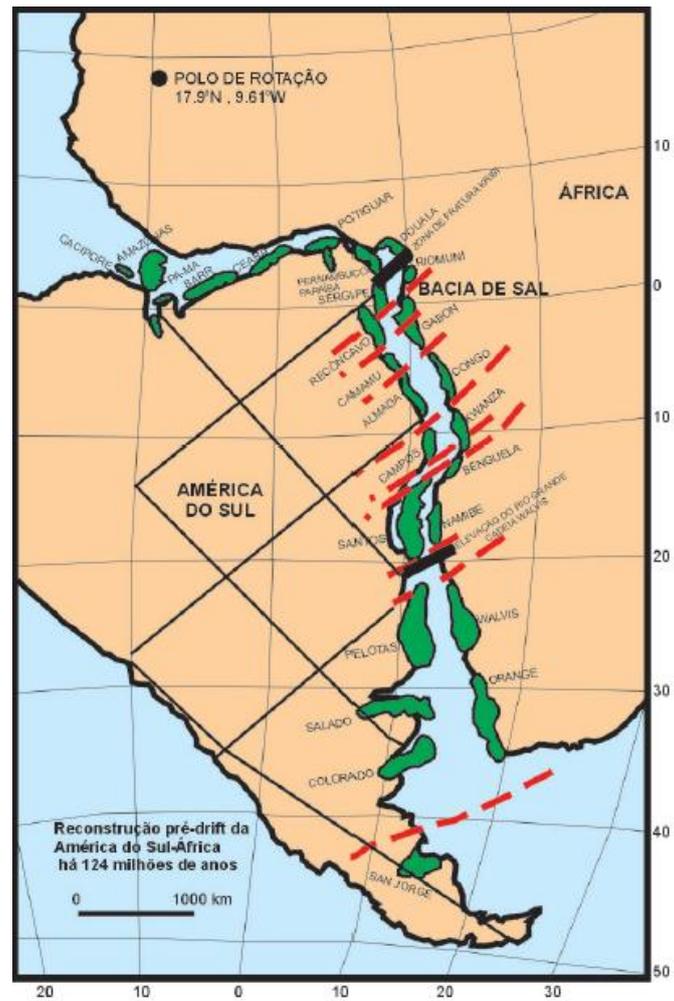


Figura 2: Reconstrução tectônica dos blocos continentais da América do Sul e África no Atlântico Sul evidenciando as bacias marginais continentais do Brasil. Fonte: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves, 2003.

5. METODOLOGIA

5.1 Dados aeromagnéticos

Os dados magnéticos aerolevantados foram cedidos pela FUGRO/LASA. Foram utilizados por Ferraz (2010) em sua tese de doutorado para uma abordagem quantitativa da área e agora terão aplicabilidade no presente trabalho.

O conjunto de dados foi extraído de parte de dois levantamentos de alta resolução referente ao ano de 2002. Estes levantamentos correspondem a uma área marinha do Estado do Rio de Janeiro e são referenciadas como subárea 4 da Bacia de Santos, 4322 e ao bloco da Bacia de Campos, 4318. A seguir, as figuras 4 e 5 cedidas pela FUGRO para melhor exemplificação da área de pesquisa.



Figura 4: Localização do bloco 4322 utilizado na pesquisa referente à bacia de Santos (Ferraz, 2010).

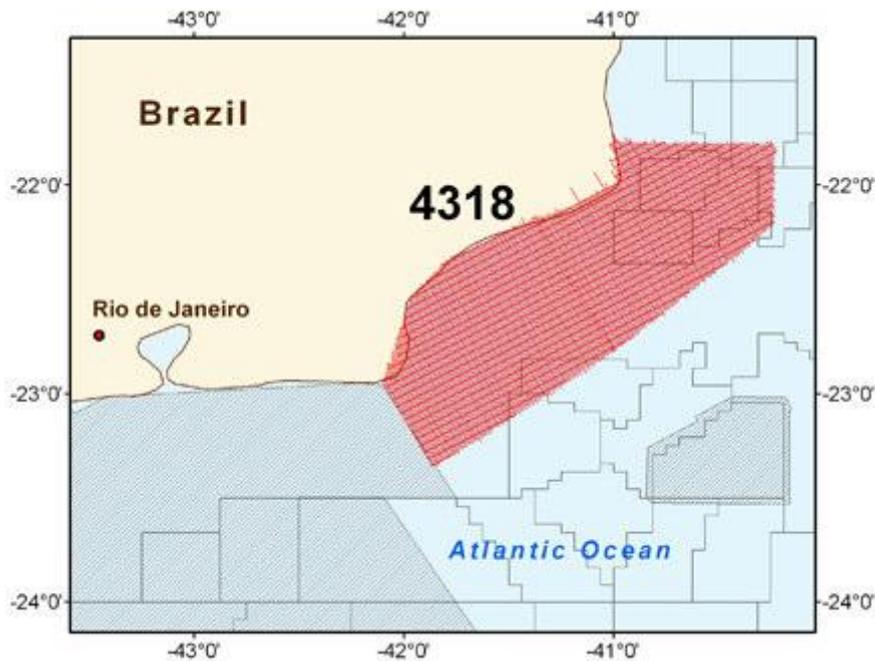


Figura 5: Localização do bloco 4318 utilizado na pesquisa referente à bacia de Campos (Ferraz, 2010).

5.1.1 Anomalia de Campo Total

Em levantamentos magnéticos, usualmente, utilizam-se magnetômetros os quais registram a magnitude do campo magnético total desconsiderando suas direções vetoriais. Como estas medidas são afetadas por influências mais internas à Terra, ou seja, comprimentos de ondas mais longos, oriundas do núcleo, há a necessidade de corrigi-las afim de estudar apenas a crosta terrestre.

Para isso, é necessário utilizar o modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Field*) apropriado, ou seja, o modelo referente ao período do levantamento, que utiliza específicos valores de inclinação, declinação e intensidade do campo. Este constitui uma formulação matemática internacional de referência, e deve subtraí-lo do campo total medido com o intuito de se obter a Anomalia de Campo Total, futuramente aplicada nas metodologias do tópico 5.2.

Tal correção foi aplicada anteriormente a este trabalho na etapa de processamento de dados magnéticos e se faz necessária para melhor compreensão sobre a parcialidade do campo total, utilizada nas metodologias posteriores, expressa em forma de anomalia como supracitado. O mapa de campo magnético total da área de estudo está representado na Figura 6 abaixo.

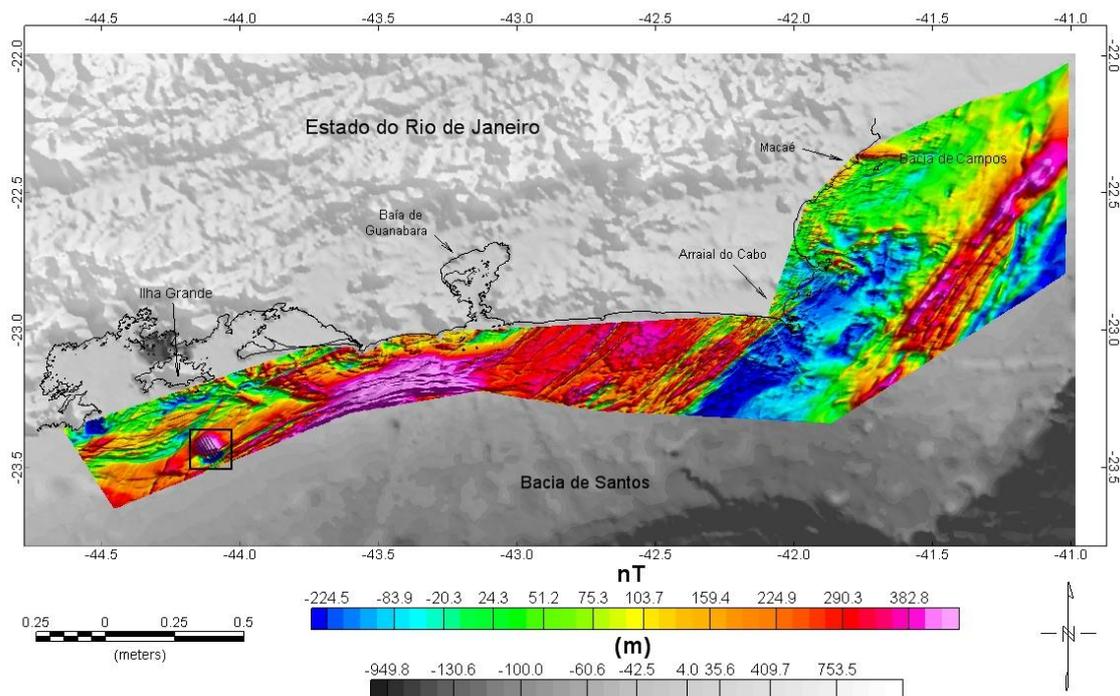


Figura 6: Mapa do campo magnético total evidenciando o polígono da área de estudo e a anomalia de interesse, posicionada mais ao sul do *grid* e à porção proximal NE da Baía de Santos.

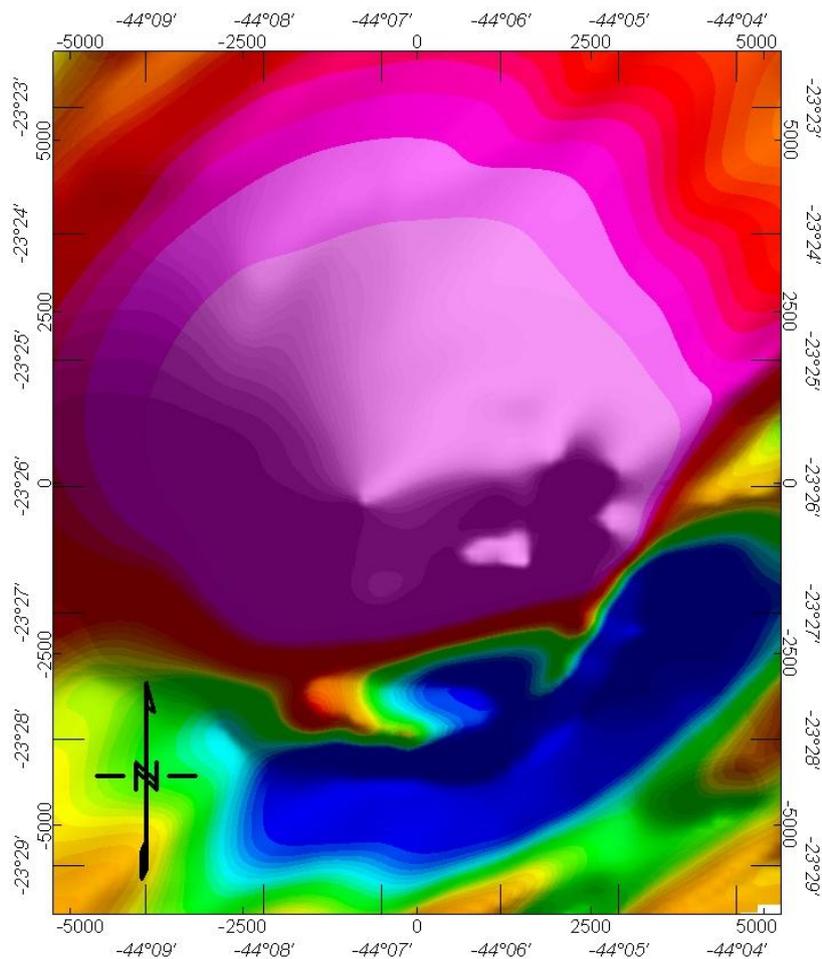


Figura 7: Mapa de campo total da anomalia magnética produzida pelo corpo alcalino.

5.2 Métodos aplicados

A metodologia aplicada, de maneira geral, consiste num fluxo convencional e uma estratégia, também convencional, de inversão de dados. Esta foi desenvolvida por Ferraz (2010) que inicialmente utiliza a teoria do Sinal Analítico aplicada a campos potenciais (Nabighian, 1972) e posteriormente a Deconvolução de Euler (Thompson, 1982). Esta última foi introduzida por Thompson (1982) e lida muito bem com a complexidade de respostas magnéticas em virtude de fontes próximas.

A fim de se obter resultados mais consistentes na inversão, considerou-se sua aplicação de maneira localizada através da individualização de picos semelhantes, observados em mapas de amplitude do sinal analítico, gerando

soluções confiáveis. Isto se dá pelo fato de a deconvolução obter conjuntos de soluções válidos para anomalias provenientes de fontes únicas, ou seja, que estão associadas individualmente às diferentes geometrias das fontes.

A associação destes métodos é satisfatória, pois estão matematicamente bem relacionados no que diz respeito à utilização de derivadas direcionais e campo magnético total. Dessa maneira, almeja-se inferir rapidamente estimativas de profundidades e localização de corpos alvos em sub-superfície a partir do modelo físico. Estes parâmetros de saída, devido à complexidade da área de interesse e escassez de informações geológicas, geofísicas ou de outra natureza, são utilizados como informações *a priori* na resolução do problema inverso através de outra metodologia de interpretação, a Inversão Magnética Compacta Generalizada (Silva e Barbosa, 2006; Barbosa e Silva, 1994) descrita no item 5.2.2.2.

5.2.1 Sinal Analítico

O Sinal Analítico consiste na associação dos gradientes horizontais e vertical de uma anomalia magnética. Tal metodologia representa uma eficiente e abrangente ferramenta de auxílio à interpretação de dados potenciais, cuja forma sobre corpos causadores depende de suas localizações e não de suas direções de magnetização (Blakely, 1995). A partir do estudo de gradientes é possível o mapeamento dos limites de fontes de interesse, bem como estimativas de profundidades das mesmas (Roest *et. al.*, 1992).

Inicialmente, foi aplicada a campos potenciais por Nabighian (1972, 1974) para fontes 2D e é quantitativamente definida através de uma função complexa, medida ao longo do seu eixo x , horizontal, à níveis de observação constante z . A componente imaginária da função é definida como a Transformada de Hilbert da parte real, e representam respectivamente os gradientes, horizontal e vertical, da anomalia magnética de campo total (ϕ):

Equação 1: Função Complexa do Sinal Analítico.

$$\alpha(x) = \frac{d\phi}{dx} + i \frac{d\phi}{dz}$$

Onde, dx : Derivada Horizontal
 dz : Derivada Vertical.

5.2.1.1 Amplitude do Sinal Analítico

A amplitude do Sinal Analítico para fontes 2D na coordenada x , para níveis de observação z constantes, independe da direção de magnetização e somente pode ser extrapolado para três dimensões em casos particulares (Xiong Li, 2006). Dessa forma, apresenta resultados satisfatórios em casos onde há remanência e baixas latitudes magnéticas. Segundo Nabighian (1972, 1974), a amplitude 2D é dada pelo absoluto da quantidade complexa da equação (1), como observado na :equação (2).

Equação 2: Amplitude do Sinal Analítico 2D.

$$|A(x)| = \left[\left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 + \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde, dx : Derivada Horizontal
 dz : Derivada Vertical.

Considerando fontes 3D, a amplitude do sinal analítico nas coordenadas x e y , para z constante, é dada através da Equação (3) e definida segundo Roest *et. al.* (1992) como um vetor contendo suas derivadas horizontais e Transformada de Hilbert.

Equação 3: Amplitude do Sinal Analítico 3D

$$|A(x, y)| = \left[\left(\frac{d\phi}{dx} \right)^2 + \left(\frac{d\phi}{dy} \right)^2 + \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde, dy : Derivada Horizontal.

A amplitude do Sinal Analítico em três dimensões é aplicada por diversos autores na estimativa de fontes magnéticas em profundidade e na identificação de magnetização remanescente (Roest e Pilkington, 1993).

Nestes estudos, os autores utilizaram apenas modelos de contato magnético vertical 2D, desconsiderando para a amplitude do sinal analítico, qualquer dependência com a direção de magnetização da fonte.

Dessa maneira, deve-se atentar à sua aplicação em modelos distintos, uma vez que a amplitude do sinal analítico, em geral, e principalmente em modelos 3D, faz uso de todos os fatores dos quais depende a intensidade do campo total: a direção do campo de indução, a direção de magnetização remanescente, o ângulo de mergulho da fonte e as profundidades para o topo e base da fonte (Xiong Li, 2006).

Na prática, uma vez que φ representa o campo magnético total observado, utilizando o *grid* deste, podem ser facilmente calculadas as derivadas x e y . A derivada vertical z é obtida utilizando propriedades no domínio Fourier através da FFT (*Fast Fourier Transform*), e por fim, é alcançada a amplitude do sinal analítico para os casos 2-D e 3-D, evidenciadas, respectivamente, nas equações (2) e (3).

A representação do sinal é dada por uma função simétrica em forma de sino, a qual o máximo da função coincide com o contato do corpo magnetizado. Este coincide com o seu centro para casos cujos corpos são minimamente espessos, se comparados à sua profundidade (Ferraz, 2010). A aplicabilidade do Sinal Analítico apresenta forte relação entre profundidade e largura do corpo, e é descrita a seguir pela tabela 1.

Tabela 1: Segundo MacLeod *et. al.* (1993), as larguras da anomalia dadas pelo Sinal Analítico são proporcionais à profundidade do corpo. D é a distância entre os pontos de inflexão, Lma é a largura referente à meia amplitude e p a profundidade da fonte magnética.

Fonte	D	Lma
Contato	1,414p	3,460p
Dique/Sill	1,155p	2,000p
Cilindro	1,000p	1,533p

De modo geral, a metodologia de amplitude do Sinal Analítico é suficiente para casos 2D considerando investigação em superfícies irregulares, e mais de uma fonte interferente, sugere-se a utilização da Deconvolução de Euler (Xiong Li, 2006).

Positivamente, o Sinal Analítico enfatiza fontes de alta frequência, referentes a anomalias rasas e, à medida que se utiliza ordens maiores nas derivações, é mais eficiente em separar estas fontes. Por outro lado, na mesma proporção, há também a amplificação de ruídos.

Por fim, o Sinal Analítico aplicado a campos potenciais é implementado de maneira simples através da equação (3), reproduzida na plataforma Oasis Montaj da Geosoft®. Ela é bem aceita e muito utilizada na comunidade geocientífica pois fornece estimativas iniciais rápidas e confiáveis.

5.2.2 Teoria da Inversão

Nas ciências físicas, e em específico na geofísica, é importante fazer inferências sobre os parâmetros físicos dos dados. Com isso, através das leis da física, é possível obter meios de computar modelos a serem verificados a um conjunto de dados observados, constituindo assim a resolução do problema direto.

Adotando uma estratégia diferente para o caso inverso, o objetivo é reconstruir o modelo a partir do conjunto de medidas, diretamente (Sneider, 1999). Para isso, deve se considerar sempre dois elementos fundamentais do problema: os dados, conjuntos de medidas magnéticas observadas, e uma pergunta, inferência sobre os parâmetros da anomalia magnética. É necessário satisfazer a relação entre estes elementos através de um raciocínio lógico, o qual responderá à pergunta.

O sucesso desta associação, ou seja, da correspondência entre o modelo matematicamente estimado e o verdadeiro, depende da disponibilidade de informações geológicas, geofísicas e outras. Segundo Blakely (1995), de

maneira geral, o problema direto é resolvido estimando-se os parâmetros de fonte indiretamente através de cálculos de tentativa e erro, partindo de um modelo inicial e tentando ajustá-lo ao real. No caso inverso, utilizado na metodologia proposta, estes parâmetros são estimados diretamente das medidas magnetométricas.

Na inversão, as propriedades físicas podem ser diferentemente descritas por parâmetros discretos e contínuos, onde os primeiros são abordados neste trabalho e utilizam a teoria de equações matriciais como representação matemática. O primeiro método de inversão utilizado é a Deconvolução de Euler (Thompson, 1982), o qual faz uso da equação homogênea de Euler como modelo físico com o intuito de obter como resposta à pergunta, a posição de uma fonte anômala a partir de dados potenciais.

5.2.2.1 Deconvolução de Euler

A Deconvolução de Euler foi introduzida inicialmente por Thompson (1982) e constitui um método de interpretação que fornece estimativas rápidas de posição e profundidade de fontes magnéticas. Contrariamente a muitos outros métodos, a equação homogênea de Euler considera anomalias magnéticas causadas por múltiplas fontes simples, sendo adequada para perfis e levantamentos em maior escala, os quais possuem muitas anomalias (Blakely, 1995).

A relação de homogeneidade de Euler pode ser descrita para dados magnéticos levantados em (x, z) através da equação (4) para y infinitamente longo:

Equação 4: Deconvolução de Euler 2D

$$(x - x_0) \frac{d\Delta T}{dx} + (z - z_0) \frac{d\Delta T}{dz} = -n\Delta T$$

Onde, n : Índice Estrutural

dx : Derivada Horizontal

x : Posição da aquisição

x_0 : Posição da fonte
 z : Posição da aquisição
 z_0 : Posição da fonte
 dz : Derivada Vertical.

Na equação (4), (x_0, z_0) constituem as coordenadas do centro do corpo alvo, ΔT a anomalia de campo magnético total e n o índice estrutural. Este último parâmetro refere-se à natureza da fonte e é selecionado de acordo com a tabela 2 abaixo, proposta por Thompson (1982).

Tabela 2: Relação Fonte-Índice de Thompson (1982).

Fonte	Índice Estrutural
Esfera	3
Cilindro Horizontal ou Vertical	2
Dique	1
Contato	0

Considerando a anomalia observada h correspondente à anomalia ΔT adicionada a um nível de base desconhecido b , temos a equação (5):

Equação 5: Anomalia h ; adição do nível de base.

$$h(x, z) = \Delta T(x, z) + b$$

Onde, $\Delta T(x, z)$: Anomalia de Campo Total

b : Nível de base.

Introduzindo a equação (5) na equação (4), temos a equação:

$$x_0 \frac{dh}{dx} + z_0 \frac{dh}{dz} + nb = x \frac{dh}{dx} + z \frac{dh}{dz} + nh$$

A partir da equação acima para um índice estrutural mais adequado e conhecido n , é possível observar que (x_0, z_0) e b são os únicos parâmetros desconhecidos. Sendo assim, a aplicação do método de mínimos quadrados em janelas móveis consecutivamente criadas para as diferentes medidas em (x, z) , fornece uma estimativa única de localização de fonte.

Estas localizações, por fim, são plotadas em um *cross section* apresentando conjuntos de soluções na forma de *clusters* em torno das magnetizações de interesse.

Thompson (1982) sugere como aceitáveis apenas as estimativas que satisfazem à inequação (6), onde $\sigma_{\hat{z}_0}$ é o desvio padrão de \hat{z}_0 e ε é o ε escalar positivo escolhido pelo intérprete. Sendo assim, espera-se obter a maior razão sinal/ruído possível.

Equação 6: Análise do conjunto de soluções.

$$\frac{\hat{z}_0}{n\sigma_{\hat{z}_0}} > \varepsilon$$

5.2.2.1.1 Índice Estrutural

O índice estrutural é uma medida da taxa de decaimento da anomalia magnética com a distância entre a fonte e o ponto de medida, ou seja, um indicador da forma geométrica do corpo alvo e está de acordo com a tabela 1.

O seu valor mais adequado é dado segundo Thompson (1982), o qual recomenda, através de testes práticos, o índice estrutural que apresenta uma nuvem de soluções com o menor desvio padrão possível, ou seja, mais denso. Barbosa *et. al.* (1999) diz que este método é empírico e ao ser aplicado a dados ruidosos pode apresentar incertezas na estimativa do índice.

Além disso, sugere que há relação entre os parâmetros estimados (x_0, z_0) , b e n , sendo o índice estrutural mais adequado aquele utilizado no conjunto de soluções o qual apresenta menor coeficiente de correlação cruzada.

Na presente metodologia de Ferraz (2010), os dois métodos são aplicados e comparados a fim de conferir maior confiabilidade aos conjuntos de soluções.

5.2.2.1.2 *Janela da Fonte*

Como foi dito anteriormente, o método de Deconvolução de Euler fornece uma estimativa única de localização de fonte para cada janela móvel de tamanho fixo.

Há diversos critérios de escolha para a localização e o tamanho da janela, as quais fazem referência direta ao tamanho da anomalia e possível fonte magnética. Neste trabalho, utilizaremos como indicativo a amplitude do Sinal Analítico a qual fornecerá o intervalo dos máximos gradientes da anomalia a ser observado pelo intérprete no próprio mapa de amplitude. Sendo assim, a janela será centralizada no máximo valor da função amplitude calculada para a anomalia e, a partir de sua localização será aplicada a Deconvolução de Euler. O comprimento da janela apropriado é escolhido a partir de dois critérios: o espaçamento referente à meia amplitude da função do Sinal Analítico ou tentativamente a fim de obter o conjunto de soluções mais denso, com menor desvio padrão. Por fim, é aplicado o método clássico nas soluções a partir da localização e do tamanho das janelas para determinado índice estrutural.

5.2.2.2 *Inversão Compacta Generalizada*

A metodologia de Inversão Gravimétrica Compacta Generalizada (Barbosa e Silva, 1994) foi inicialmente desenvolvida para inverter dados gravimétricos e pôde ser aprimorada, com o mesmo propósito, para anomalias de origem magnética por Ferraz (2010).

A teoria inicial aborda interativamente diferentes testes de hipóteses acerca de uma distribuição de densidades do substrato geológico, sendo bem aplicada a casos de múltiplas fontes ou fontes englobadas em outras. Ao utilizar a mesma metodologia, Ferraz (2010) também representa o substrato por um *grid* de múltiplos prismas bidimensionais de seção quadrada ou retangular fixa e, posteriormente atribui valor de susceptibilidade magnética limite aceitável a estes poliedros superpostos.

O estimador de inversão fornece, matematicamente, informações de compacidade da fonte magnética, reunindo em cada geometria o menor volume possível. As susceptibilidades magnéticas estimadas são utilizadas na simulação de um ambiente geológico e, à medida que se diminui as dimensões da seção de cada prisma, implicando em um maior número destes, há um maior detalhamento da imagem.

5.2.2.2.1 Informação "a priori"

A introdução de informações *a priori* permite vinculações importantes entre os dados e as estimativas da inversão. Com isso, é possível restringir o número de hipóteses interpretativas criadas acerca do ambiente geológico, o que confere maior confiabilidade ao produto final, sejam as informações obtidas de maneira direta ou indireta. Na prática foram utilizados três tipos de vetores com informações *a priori*.

As susceptibilidades magnéticas, já citadas no item anterior, são determinadas por um vetor contendo valores considerados aceitáveis para o tipo litológico, e são aplicadas durante o processo de inversão compacta.

As inclinações magnéticas são informações também de evidente importância aplicadas de modo tentativo, e possibilitam trabalhar com fontes onde há remanência magnética.

Por último, a metodologia de Deconvolução de Euler 2D abordada no tópico 5.2.3.2 é bastante consistente como informação *a priori* do presente método de inversão, pois não depende das direções de magnetização.

A localização das fontes e os índices estruturais são concedidos pela correta abordagem de fontes pontuais da equação homogênea de Euler. Esta é considerada adequada ao método de inversão aqui proposto pelo fato de apontar também para a compacidade das fontes, reunindo em um único ponto a propriedade física de interesse e, por conseguinte a coordenada central da forma geométrica do método de Ferraz (2010). A utilização da metodologia de Euler como informação *a priori* auxilia, através da escolha da melhor fonte geométrica, a definição dos elementos geométricos a serem utilizados como constituintes do “esqueleto” das fontes em subsuperfície. Isto ocorre, no estimador de inversão compacta, por intermédio de uma série de pontos e retas orientados. Outra maneira de obter esse tipo de informação é a partir de considerações geológicas do substrato geológico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi aplicada a amplitude do Sinal Analítico 3D no *grid* de campo total utilizando a equação (3) na plataforma Oasis Montaj da Geosoft® a fim de avaliar os limites da fonte. O método se torna uma alternativa bastante interessante em baixas latitudes magnéticas. Isto ocorre em virtude do insucesso da aplicação do operador no domínio de Fourier da Redução ao Pólo, devido a problemas de singularidades numéricas ao tentar sugerir um ambiente verticalmente magnetizado, nos pólos. O mapa da amplitude está representado na figura 8 e realça a orientação das estruturas predominantemente NE-SW, e outras ENE.

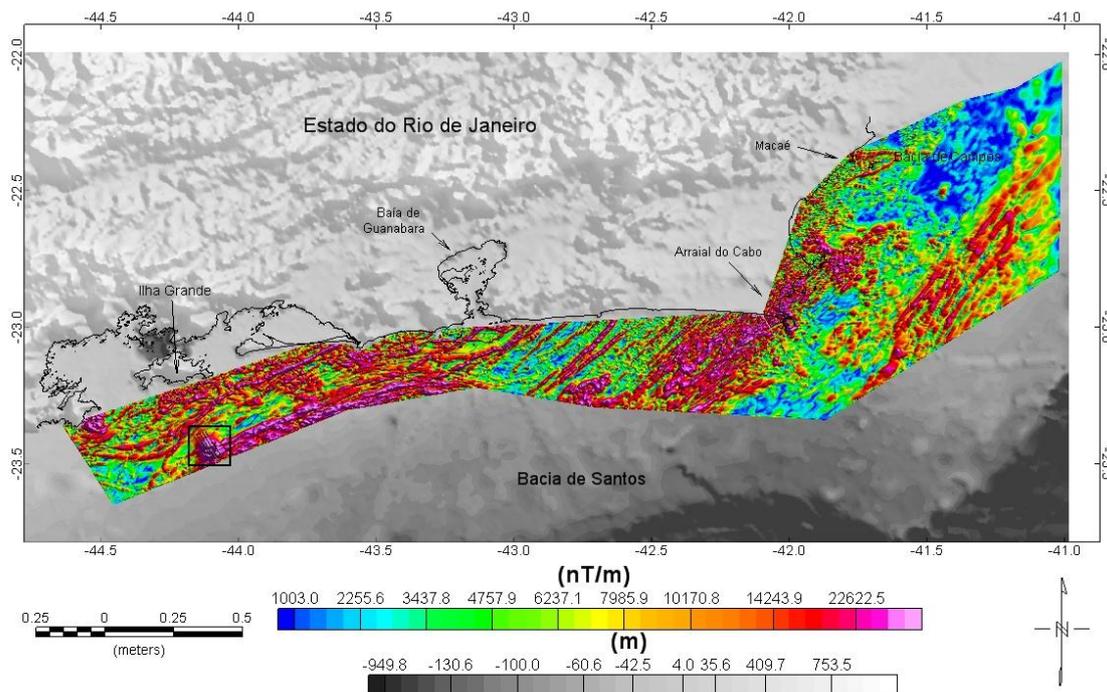


Figura 8: Mapa da amplitude do Sinal Analítico evidenciando o polígono da área de estudo e anomalia de interesse mais posicionada ao sul do *grid* e à porção proximal NE da Baía de Santos.

A amplitude do Sinal Analítico ao ser aplicada nos dados de interesse teve o resultado esperado nas fontes magnéticas, enfatizando as anomalias mais rasas e atenuando as mais profundas. Estes menores comprimentos de onda, no mapa de amplitude do Sinal Analítico na figura 8, apontaram estruturas picos, sendo uma delas facilmente observada na anomalia magnética a qual representa o corpo alvo (Figura 9). Por conseguinte são bem delimitadas as bordas da anomalia e o caráter bastante extenso confere maior interesse a feição a ser modelada posteriormente.

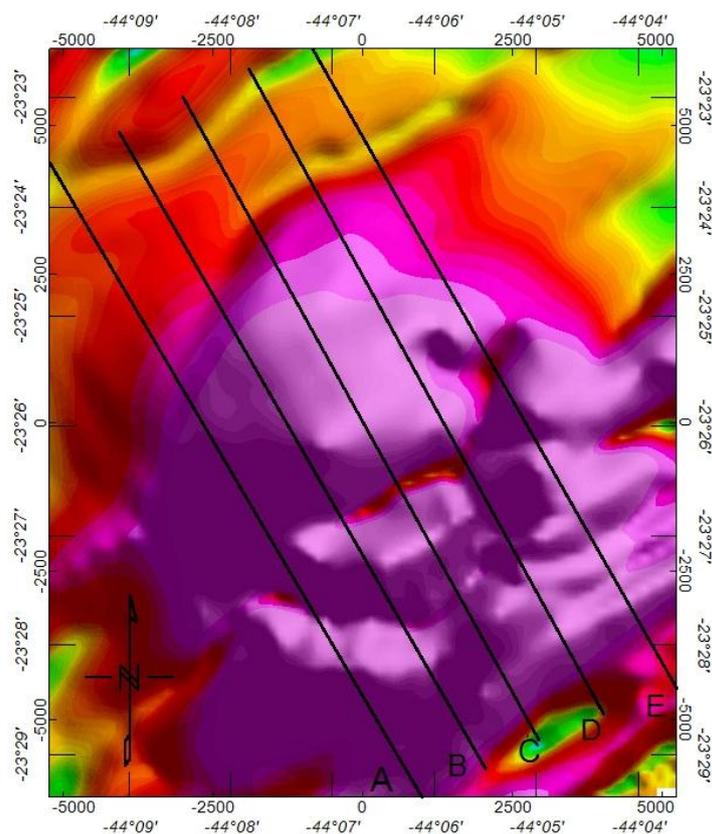


Figura 9: Mapa de amplitude do Sinal Analítico da anomalia magnética produzida pelo corpo alcalino.

A amplitude do Sinal Analítico é bem relacionada matematicamente à Deconvolução de Euler devido à utilização de gradientes horizontais e vertical. Desta maneira, torna-se útil também para posicionar a janela de dados, necessária para o cálculo de soluções na Deconvolução de Euler, centralizada no ponto de máximo gradiente da anomalia. Isto ocorre por intermédio da tabela 1 de MacLeod *et. al.* (1993) e ainda, constitui um dos métodos avaliados na estimativa do comprimento da mesma janela de soluções no algoritmo desenvolvido por Ferraz (2010).

Ao longo do estudo foram obtidos perfis magnéticos da anomalia (Ferraz 2012, comunicação escrita) já sujeitos à metodologia de inversão aqui proposta, através dos algoritmos propriamente desenvolvidos para a Deconvolução de Euler e estimativa de susceptibilidades pelo método de compacidade por Ferraz. Na figura 9 é possível observar o corpo alvo, bem como a distribuição paralela entre si e perpendicular às estruturas identificadas como NE-SW.

Neste processo, inicialmente foi estimada a localização e profundidade das fontes magnéticas da anomalia identificada pelo mapa de amplitude do Sinal Analítico após serem observadas estruturas picos expressivas. A aplicação da Deconvolução de Euler 2D é descrita no tópico 5.2.3.2. Estes dados de saída foram utilizados para posicionar as coordenadas centrais dos prismas da inversão compacta. Outro fator importante, ignorado por diversos autores de maneira equivocada, é a consideração das inclinações magnéticas durante a inversão como uma soma das magnetizações induzidas e remanescente.

Ao todo foram utilizados 3200 prismas superpostos para um maior detalhamento da imagem facilitando a interpretação 3D. Foi atribuída susceptibilidade limite de 0.025 cgs, a qual representa os maiores valores encontrados no modelo 3D. Por se tratar de um estimador matemático de inversão, há a presença de ruídos matemáticos em forma de valores de susceptibilidades magnéticas negativas. Outra explicação para estes últimos pode ser devido ao pacote sedimentar, imediatamente localizado acima do corpo alvo na região de interesse.

Deste modo, foram recebidos cinco bancos de dados referentes a cada perfil A, B, C, D e E. Nestes, estavam contidas coordenadas planimétricas na projeção UTM, no *datum* WGS 84 zona 23S, além da profundidade e susceptibilidade magnética estimadas dos 3200 prismas superpostos. Inicialmente, considerando a problemática de não existirem valores negativos de susceptibilidade magnética, foram desconsiderados os valores menores que zero. Posteriormente, foi utilizado o método interpolador de Krigagem nas susceptibilidades magnéticas estimadas e criado um modelo 3D adequado da sub-superfície, também conhecido como 2,5D devido à interpolação não utilizar profundidades z reais, e sim estimadas. O modelo está na figura 10, orientado de acordo com o mapa plano da figura 11. A interpolação foi executada na plataforma Oasis Montaj da Geosoft® e o tamanho da célula do tipo padrão, ou seja, $\frac{1}{4}$ do espaçamento das distâncias medidas entre as observações. A utilização do “suavizador” de krigagem permitiu um ajuste mais real do modelo aos dados, tornando possível uma simulação geológica mais fiel possível em contraste aos demais interpoladores.

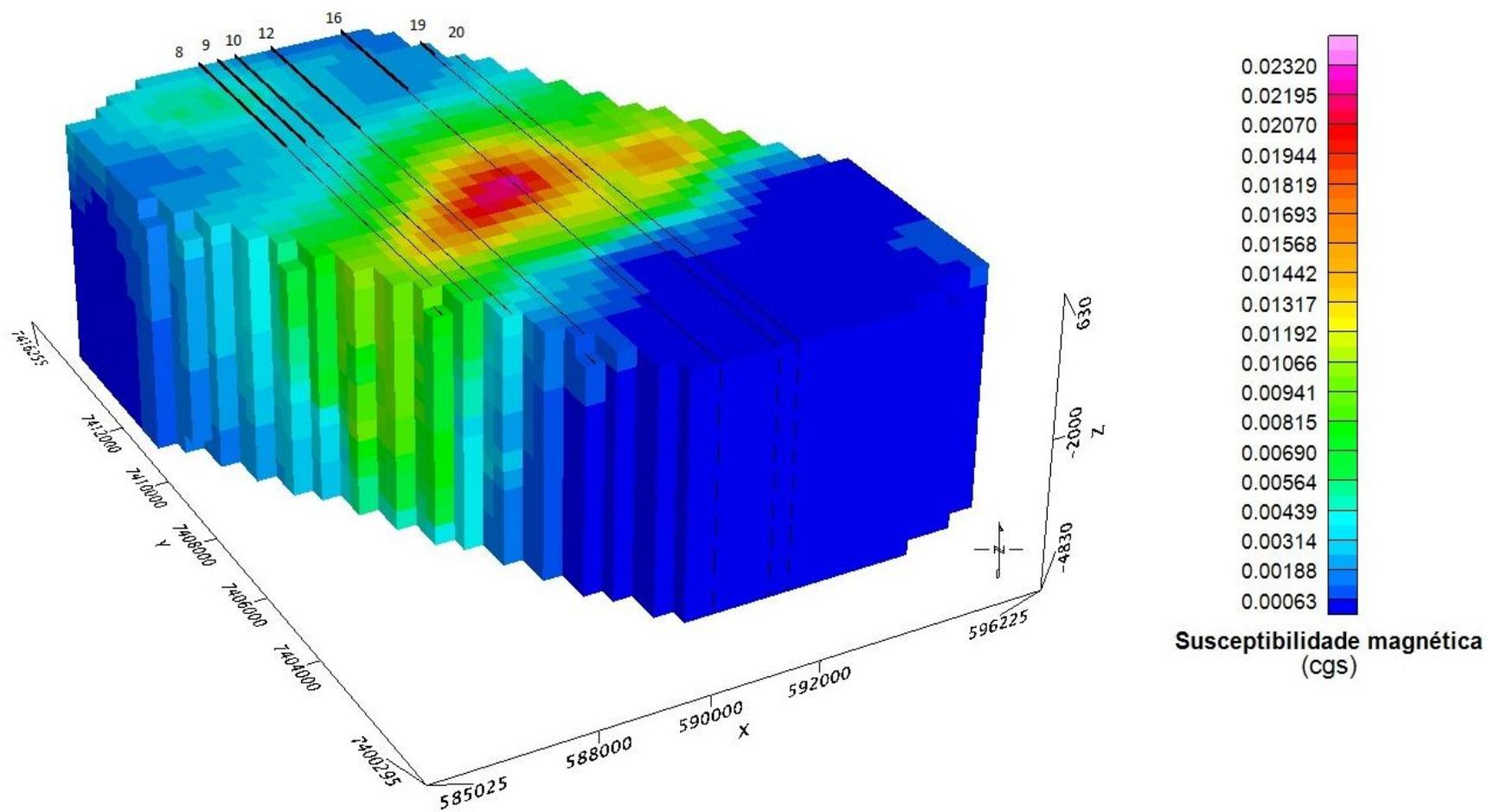


Figura 10: Modelo 3D do corpo alvo e as seções 2D 8, 9, 10, 12, 16, 19 e 20 extraídas deste.

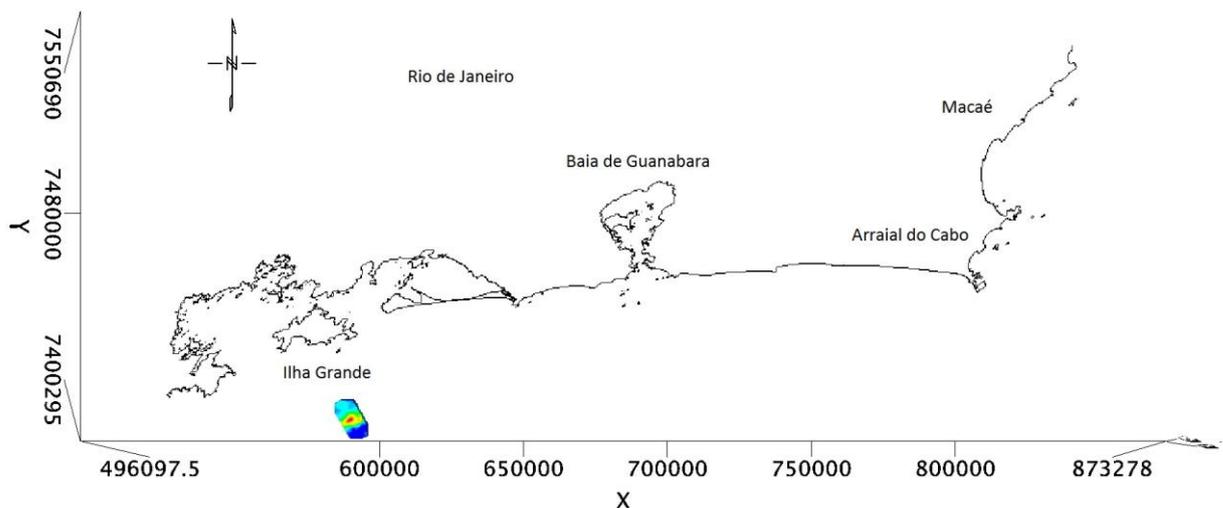


Figura 11: Localização do modelo 3D em relação à linha de costa do estado do RJ.

Um histograma avaliando a distribuição em zonas dos valores de susceptibilidades magnéticas permitiu desconsiderar os valores menores do que 0.003 cgs e distribuí-los linearmente nas zonas representadas em cores no modelo 3D. Com isso, almejou-se a melhor delimitação das bordas do corpo intrusivo alcalino. Devido ao comportamento praticamente esférico do corpo alvo 3D, há indesejáveis efeitos de borda, o que não ocorreria nos casos onde os alvos apresentam feições lineares como forma geométrica. Estes efeitos causam perda na resolução da imagem.

Por fim, foram extraídas 32 seções ao longo do eixo x, a partir do modelo interpolado 3D, a fim de compreender melhor sua distribuição lateral e identificar o corpo alvo central e suas estruturas associadas.

Em todas as seções e principalmente na figura 15, 16 e 17, seções 16, 19 e 20 respectivamente, extraídas da porção central do modelo, observa-se o

corpo anômalo e sua extensão em profundidade. É possível identificar também estruturas anelares evidenciadas por valores gradativamente menores de susceptibilidade magnética, referentes a diques associados à intrusão magmática. Nas figuras 12, 13, 14 e 15 as seções 8, 9, 10 e 12 respectivamente, há uma apófise bem individualizada lateralmente posicionada e originada pela mesma câmara magmática, a qual se distribuiu por fraturas da rocha encaixante, secundárias ao magmatismo principal. Ainda neste contexto, o corpo alvo apresentou também um afinamento à medida que a sua profundidade aumenta.

Ao posicionar a feição 3D devidamente modelada (Figura 10) em um mapa plano, esta apresenta orientação NE-SW e parece ajustar-se às linhas batimétricas locais. Desta maneira, ao reavaliar o mapa de amplitude do Sinal Analítico da figura 8, é possível constatar que a intrusão magmática se deu por meio de zonas de fraquezas pré-cambrianas, as quais ao longo de toda área de estudo, estão orientadas no mesmo eixo. É ainda possível observar dois altos valores de susceptibilidade magnética no corpo-alvo visto mais claramente numa vista superior do modelo 3D, sendo um mais extenso do que outro.

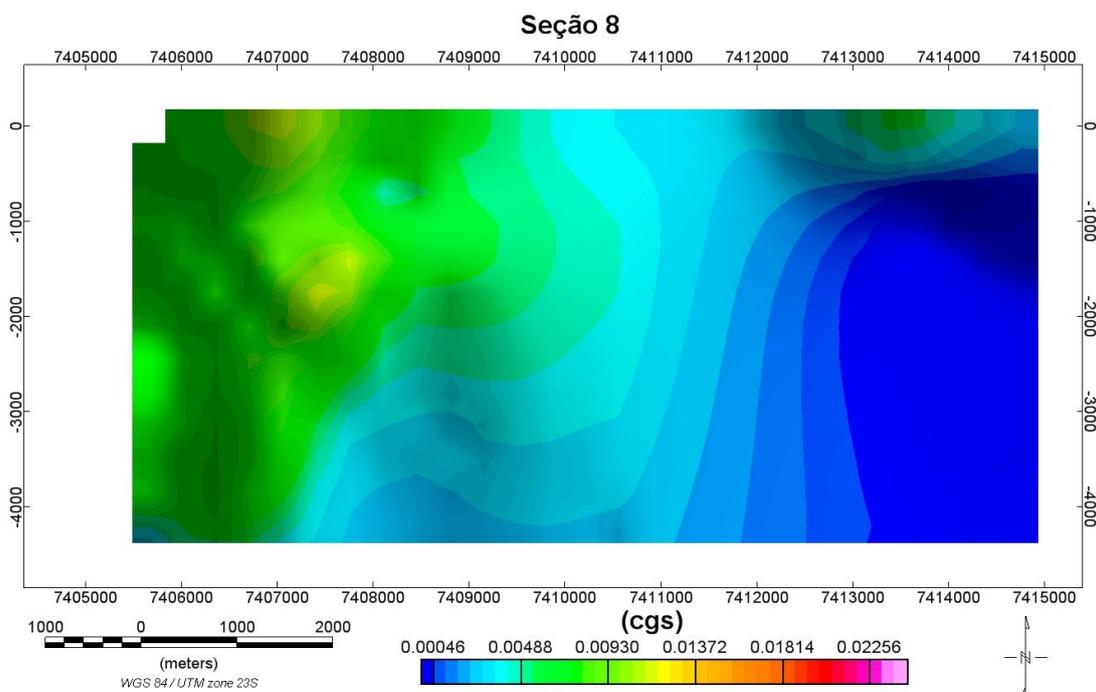


Figura 12: Seção 8. Apófise lateralmente posicionada à direita e corpo alcalino mais à esquerda.

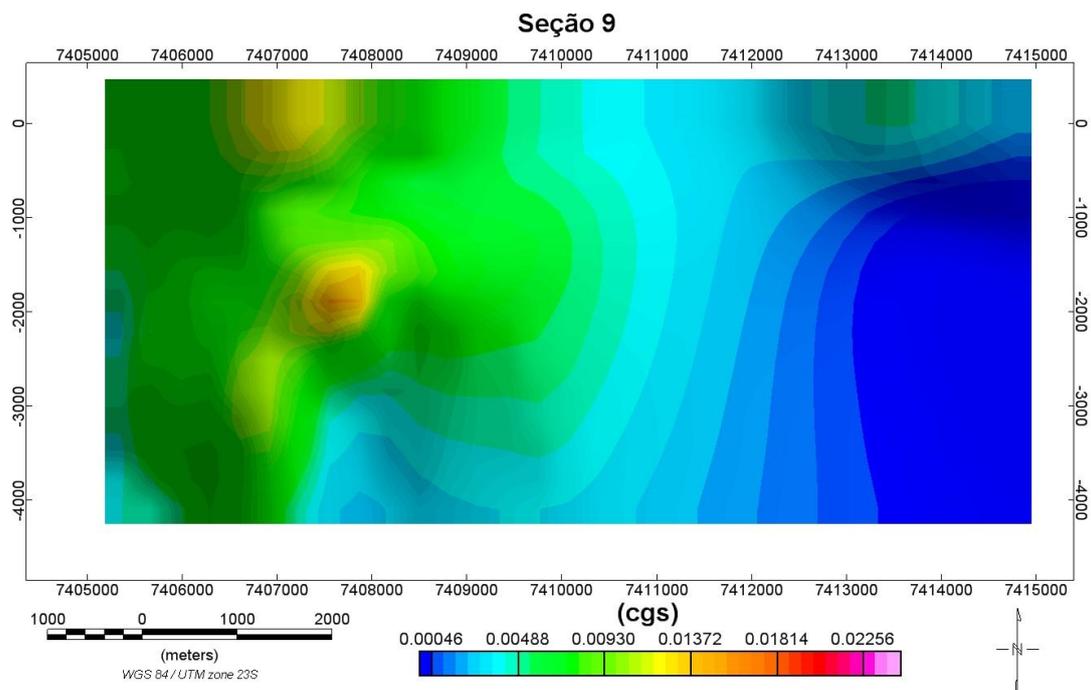


Figura 13: Seção 9. Apófise lateralmente posicionada à direita e corpo alcalino mais à esquerda.

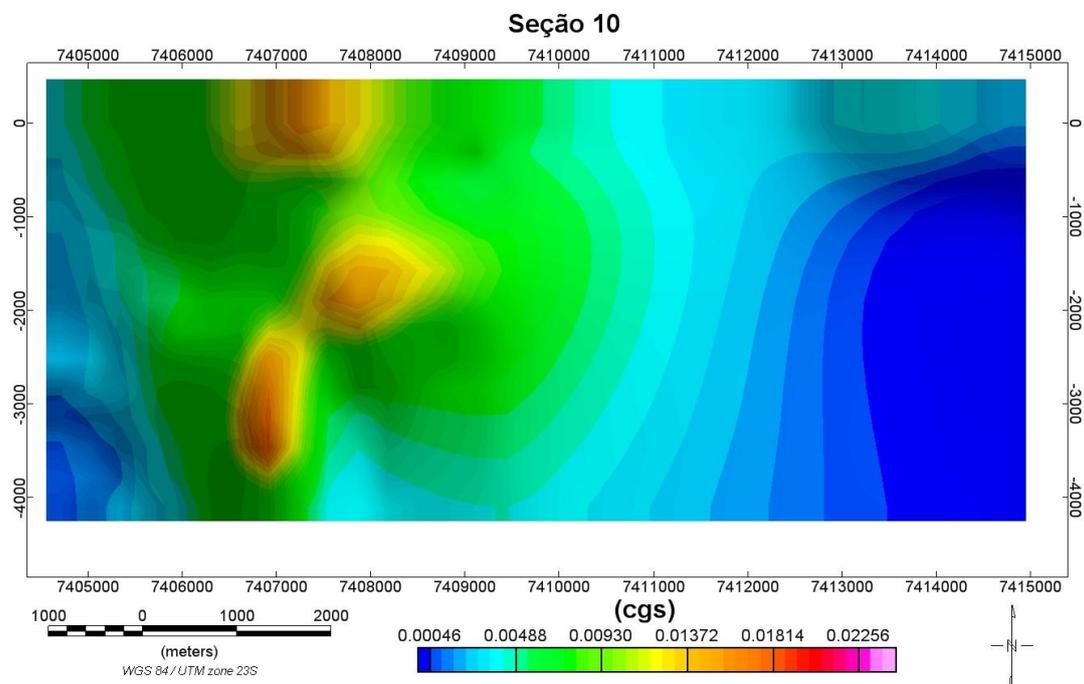


Figura 14: Seção 10. Aumento dos valores de susceptibilidade magnética à medida que se aproxima da porção mais interna do corpo alcalino, evidenciando estruturas anelares associadas.

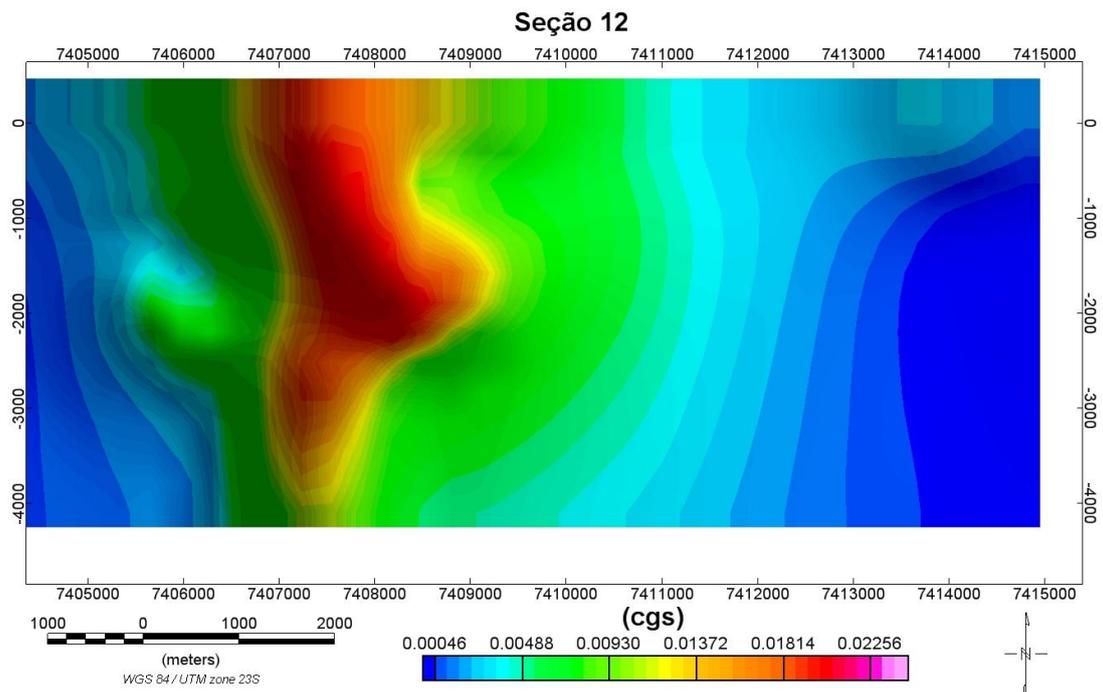


Figura 15: Seção 12. Limites do corpo alcalino intrusivo com uma forte assinatura magnética em sua porção mais central.

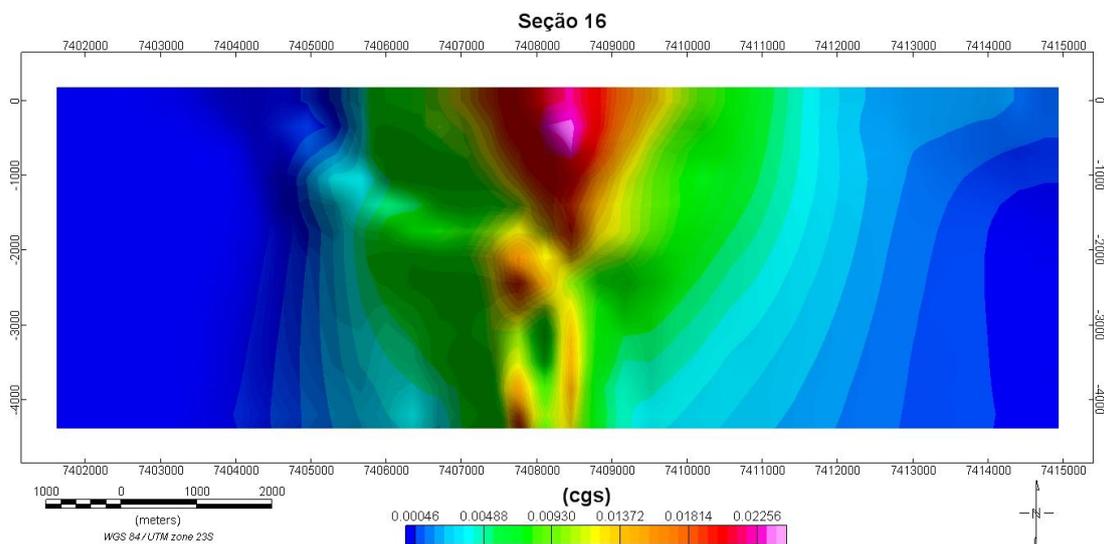


Figura 16: Seção 16. Valor de susceptibilidade limite na porção mais central do corpo alcalino e seus limites laterais bem expressivos.

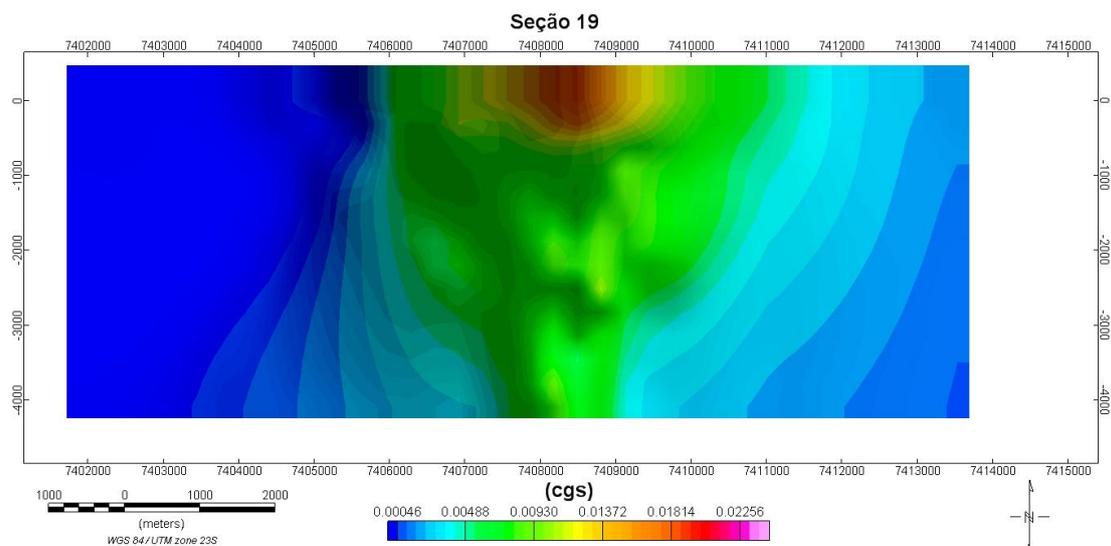


Figura 17: Seção 19. Afinamento do corpo alcalino à medida que aumenta a profundidade.

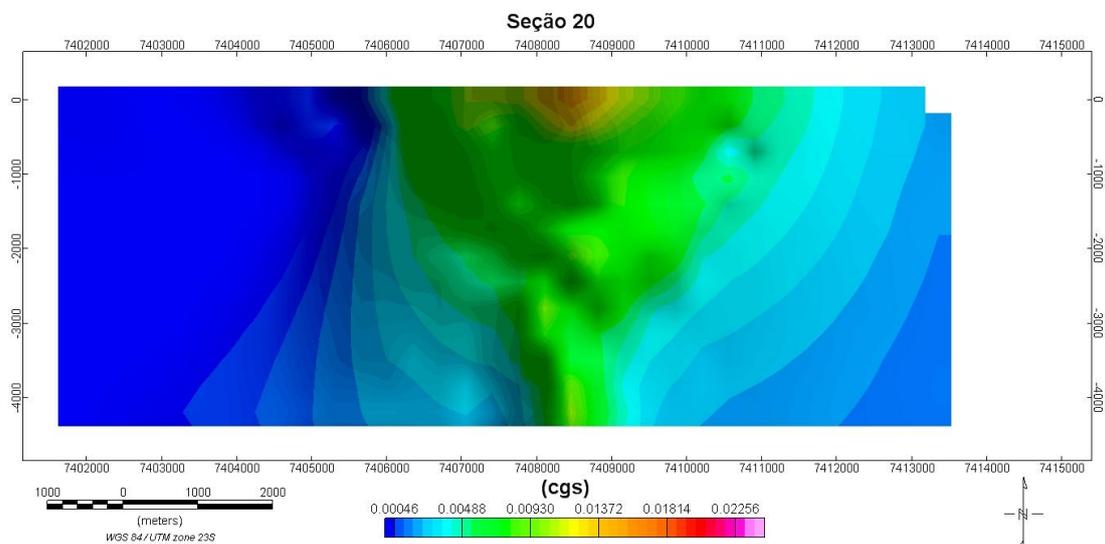


Figura 18: Seção 20.

7. CONCLUSÃO

A associação entre as metodologias abordadas no projeto demonstrou ser uma ótima alternativa para ambientes geológicos onde há escassez de informação *a priori*. Os parâmetros de entrada utilizados nos métodos de inversão possuem alta confiabilidade. Isto ocorre devido ao caráter matemático bem relacionado das vinculações, as quais permitem simular proximamente ao real, o substrato geológico em três dimensões, em específico o corpo alvo alcalino.

A modelagem 3D, originada a partir de métodos de inversão 2D, ofereceu uma alternativa aos já conhecidos e costumeiros problemas de processamento e interpretação de dados. O grande tempo empregado, bem como as limitações computacionais, da modelagem de grandes áreas de estudo é contornado pela metodologia proposta.

Historicamente, o emprego da magnetometria em estudos de investigação de fontes em profundidade tem sido bem-sucedido. A distribuição de diferentes litotipos na crosta terrestre com assinaturas magnéticas expressivas torna possível a caracterização do substrato geológico e principalmente o entendimento acerca de eventos tectono-magmáticos. A aplicação do método potencial e a compreensão das susceptibilidades magnéticas como propriedade física relevante, permitiu a identificação de estruturas e ainda discriminação de domínios e interpretação geológica local.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. 1991. O alinhamento magmático de Cabo Frio. *In: II SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE*, SBG, São Paulo. Anais, p. 423-428.

BARBOSA, V. C. F., SILVA, J. B. C. & MEDEIROS, W. E. 1999. Stability analysis and improvement of structural index estimation in Euler deconvolution. *Geophysics*, v. 64, n. 1, p. 48-60.

BARBOSA, V. C. F. & SILVA, J. B. C. 1994. Generalized compact gravity inversion. *Geophysics*, v. 59, p. 57-68.

BLAKELY, R. J. 1995. "Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications". Cambridge University Press – USA.

CORREIA, M. G.; LEITE, E. P. & SOUZA FILHO, C. R., 2010 "Comparação de métodos de estimativa de profundidades de fontes magnéticas utilizando dados aeromagnéticos da província mineral de Carajás, Pará." *Revista Brasileira de Geofísica* Vol. 28(3) pag. 411-426

FERRARI, A. L. 1990. A geologia do "Rift" da Guanabara na sua porção centro-ocidental e sua relação com o embasamento Pré-Cambriano. *In: 36º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, SBG, Natal, Anais, 6: 2858-2872.

FERRARI, A. L. 2001. "Evolução tectônica do Gráben da Guanabara". Tese de doutorado, IAG-USP.

FERRAZ, A. E. P. P. D. 2010. "Interpretação Aeromagnética Sobre Áreas Proximais das Bacias de Campos e Santos Utilizando Inversão Compacta". Tese de doutorado, LAGEMAR-UFF.

KEAREY, P., BROOKS, M. & HILL, I. 2002. "An Introduction to Geophysical Exploration" Oxford – USA, p 273-313.

L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI & J. H. GONÇALVES, 2003. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. (eds) CPRM, Brasília. p. 227-258

MACLEOD, I. N. ; JONES, K. & DAI, T. F. 1993. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. *Exploration Geophysics*, 24, 679-687.

MOHRIAK, W. U. & BARROS, A. Z. N. 1990. Novas evidências de tectonismo Cenozóico na região sudeste do Brasil: O *Gráben* de Barra de São João, na plataforma de Cabo Frio, RJ. *Rev. Bras. Geoc.*, São Paulo, 20 (1-4): 187- 196.

NABIGHIAN, M. N. 1972. The analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 37, p.507-517.

NABIGHIAN, M. N., 1974. Additional comments on the analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, v. 39, p.85-92.

ROEST, W. R. & PILKINGTON, 1993. Identifying remanent magnetization effects in magnetic data. *Geophysics*, 58, 653-659.

ROEST, W. R., VERHOEF, J. & PILKINGTON, 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. *Geophysics*, 57, 116-125.

SILVA, J. B. C. & BARBOSA, V. C. F. 2006. Interactive gravity inversion. *Geophysics*, v. 71, n. 1, p. J1-J9.

SNIEDER, R., & J. TRAMPERT,1999. Inverse problems in geophysics, in *Wavefield inversion*, edited by A. Wirgin, pp. 119-190, Springer Verlag, New York. . p. 119-190.

THOMPSON, D. T. 1982. EULDPH : A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, v. 47, n. 1, p. 31-37.

TROTTA, M. C. 2004. “Análise Estrutural dos Diques e Brechas Tectônicas da Região Leste do Gráben da Guanabara, Estado do Rio de Janeiro” Tese de mestrado, LAGEMAR-UFF, p 23-25.

XIONG LI, 2006. Understanding 3D analytic signal amplitude. *Geophysics*, 71, no.2, L13-L16.

ZALÁN, P. V., OLIVEIRA, J. A. B. 2005. “Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil”. *Bol. Geoc. Petrobras*, Rio de Janeiro, v.12, n.2, p 269-300.