

Universidade Federal Fluminense

Curso de Geofísica

Adriana Menezes Bello

Avaliações comparativas de filtros espaciais para mapeamento de contatos geológicos com contrastes de densidades e suscetibilidades magnéticas

Niterói

Adriana Menezes Bello

Avaliações comparativas de filtros espaciais para mapeamento de contatos geológicos com contrastes de densidades e suscetibilidades magnéticas

Projeto Final apresentado ao curso de Graduação em Geofísica, na Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

ORIENTADOR: Prof. Marco Polo Pereira Buonora

COORIENTADORA: Telma Aisengart Santos

Niterói

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

clusão de curso apresentado e aprovado como requio de Bacharel em Geofísica, em 14 de Janeiro de 2014, e	
Prof. Marco Polo Pereira Buonora	
Petrobras / UFF	
Telma Aisengart Santos	
Geosoft Latinoamérica	
Julio Lyrio	
Petrobras	
Prof. Bruno Goutorbe	

UFF

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer imensamente à minha mãe e minha irmã por todo amor, carinho, dedicação em minha criação e por todo apoio que me deram nestes anos de faculdade, pois sem elas a realização deste sonho não seria possível.

Aos meus avós por toda a dedicação em meu desenvolvimento e sucesso como pessoa.

Ao meu namorado pelo amor, companheirismo e paciência, principalmente neste período de elaboração do trabalho.

Aos meus amigos de faculdade, que sempre fizeram as minhas aulas mais divertidas e me ajudaram nestes cinco anos do curso.

Agradeço ao meu Professor Orientador Marco Polo por todo apoio, por sua imensa sabedoria e por todo o tempo dedicado a mim neste período.

À minha coorientadora Telma, cuja ajuda foi indispensável. Gostaria de agradecer também por seu apoio não só nesta monografia, como também neste longo período de estágio na Geosoft.

Ao Geofísico Júlio Lyrio pelo apoio durante a elaboração da monografia.

Aos meus colegas da Geosoft Latinoamérica, em especial meus amigos da área técnica, que sempre estiveram à disposição em me ajudar e que me divertem todos os dias.

Aos Professores Francisco Ferreira e Jeferson de Souza da Universidade Federal do Paraná que, mesmo sem me conhecer, dispuseram-se a me ajudar neste trabalho de conclusão de curso e que disponibilizaram o programa GRAV_MAG_PRISMA, o qual utilizei neste trabalho.

RESUMO

Os métodos potenciais, gravimétricos e magnetométricos, na Geofísica, são utilizados para detectar contrastes de densidade e susceptibilidade magnética entre rochas, bem como para estimar a forma e localização em subsuperfície dos corpos causadores de tais contrastes. Esta aplicação é útil na representação geológica dos dados, pois realça contatos litológicos, ajudando em sua interpretação. Os dados precisam ser aprimorados e, para isso, é realizado seu processamento através de filtros espaciais, que são utilizados para dar destaque a certas feições. Neste trabalho, será feito um estudo aprofundado sobre tais filtros, dando destaque aos de detecção de bordas de corpos anômalos, que realçam os limites destes para melhor mapeá-los. Seus resultados serão analisados e comparados para caracterizar seus desempenhos. Para a realização de todo o estudo de tais filtros, estes serão aplicados a dados gravimétricos e magnetométricos de modelos gerados sinteticamente e a dados magnetométricos reais.

Palavras-chave: Métodos Potenciais, gravimetria, magnetometria, processamento, filtros.

ABSTRACT

The use of the potential methods, gravity and magnetics, in geophysics, are employed to detect density and magnetic susceptibility contrasts between rocks, as well as to estimate the shape and location of subsurface bodies causing such contrasts. This application is useful in geological representation of the data, because it highlights geologic features, helping in their interpretation. The data needs to be enhanced through the usage of the so-called enhancement filters. Many filters are used to enhance certain features and are called spatial resolution filters. In this work, it will be performed a detailed study on such filters, emphasizing the edge detection filters of anomalous bodies that enhance the edges of these to better map them, and their results will be analyzed and compared to characterize their performances. For the completion of the study, it will be applied such filters in gravimetics and magnetics data of synthetic models and in magnetic real data.

Keywords: Potential Methods, gravimetic, magnetics, processing, filters.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Amostragem no domínio do tempo. (a) sinal de entrada; (b) trem de impulsos unitários com período T ;(c) produto de (a) e (b); Fonte: Modificado de http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele
- Figura 2: Modelo sintético de dois cubos com profundidades de topos de 100 metros (C1) e 200 metros (C2).
- Figura 3: (a) Anomalia magnética do modelo 1; (b) Anomalia magnética do modelo 2; (c) Anomalia magnética do modelo 2 reduzida ao polo
- Figura 4: Mapa DZ do modelo 1
- Figura 5: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 4, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde a derivada vertical do dado
- Figura 6: Mapa da derivada vertical do modelo 2 reduzido ao polo
- Figura 7: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 6, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde a derivada vertical do dado reduzido ao polo
- Figura 8: Mapa TDR do modelo 1
- Figura 9: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 8, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDR do dado
- Figura 10: Mapa TDR do modelo 2 reduzido ao polo
- Figura 11: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 10, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDR do dado reduzido ao polo
- Figura 12: Mapa ASA do modelo 1
- Figura 13: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 12, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o ASA do dado
- Figura 14: Mapa ASA do modelo 2 reduzido ao polo
- Figura 15: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 14, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em azul o ASA do dado reduzido ao polo
- Figura 16: Mapa THDR do modelo 1
- Figura 17: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 16, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o THDR do dado
- Figura 18: Mapa THDR do modelo 2 reduzido ao polo

- Figura 19: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 18, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em azul o THDR do dado reduzido ao polo
- Figura 20: Mapa Theta do modelo 1
- Figura 21: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 20, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o Theta Map do dado
- Figura 22: Mapa Theta do modelo 2 reduzida ao polo
- Figura 23: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 22, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em azul o Theta Map do dado
- Figura 24: Mapa TDR THDR do modelo 1
- Figura 25: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 24, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDR THDR do dado
- Figura 26: Mapa TDR THDR do modelo 2 reduzida ao polo
- Figura 27: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 26, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDR THDR do dado reduzido ao polo
- Figura 28: Mapa TDX do modelo 1
- Figura 29: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 28, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDX do dado
- Figura 30: Mapa TDX do modelo 2 reduzido ao polo
- Figura 31: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 30, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDX do dado
- Figura 32: Mapa TAHG do modelo 1
- Figura 33: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 32, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TAHG do dado
- Figura 34: Mapa TAHG do modelo 2 reduzido ao polo
- Figura 35: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 34, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TAHG do dado
- Figura 36: Mapa TAHG do modelo 2 não reduzido ao polo
- Figura 37: Mapa TAHG do modelo 2 com magnetização remanescente adicionada (de intensidade 0.2 A/m, declinação de $+10^{\circ}$ e inclinação de $+20^{\circ}$)
- Figura 38: Perfis traçados através do mapa (y=3000m) do modelo 1, onde em azul representa a curva de TDX e em verde, a do Theta Map.

Figura 39: Mapa 3D dos dados do modelo 1 no polo filtrado com o TAHG e o TDR_THDR, como indicados na figura. O cubo C1 possui profundidade do topo de 100 metros e C2, 200 metros.

Figura 40: Mapa 3D dos dados do modelo 1 no polo filtrado com o TAHG e o TDX, como indicados na figura. O cubo C1 possui profundidade do topo de 100 metros e C2, 200 metros.

Figura 41: Modelo sintético de dois cubos com profundidades de topos de 100 metros (C1) e 200 metros (C2), com distância entre os centros de 1500 metros.

Figura 42: Aplicação do TAHG ao (a) modelo sintético 1 (no polo) e ao (b) modelo 2 reduzido ao polo

Figura 43: Mapas do modelo 2 contaminado com ruído de amplitude 2 nT (0,0083% do campo total). (a)TAHG; (b)TDX; (c) TDR_{THDR} ; (d)THDR

Figura 44: Mapa de anomalia gravimétrica dos modelos 1 e 2

Figura 45: ASA dos modelos 1 e 2

Figura 46: TAHG dos modelos 1 e 2

Figura 47: TDR dos modelos 1 e 2

Figura 48: TDR_THDR dos modelos 1 e 2

Figura 49: TDX dos modelos 1 e 2

Figura 50: THDR dos modelos 1 e 2

Figura 51: Theta Map dos modelos 1 e 2

Figura 52: (a) Anomalia magnética de um cubo; Inclinação e declinação magnética de 45°, campo magnético de 22789 nT e profundidade do corpo de 100m; (b) Resposta do ASA para a anomalia em (a)

Figura 53: Anomalia de dois cubos no polo

Figura 54: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 10° (a) Ia de 80° ; (b) Ia de 20°

Figura 55: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 20° (a) Ia de 70° ; (b) Ia de 20°

Figura 56: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 30° (a) Ia de 60° ; (b) Ia de 20°

Figura 57: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 45° (a) Ia de 45° ; (b) Ia de 20°

- Figura 58: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 60° (a) Ia de 30°; (b) Ia de 20°
- Figura 59: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 80° (a) Ia de 10° ; (b) Ia de 20°
- Figura 60: Mapa representando, na área hachurada em preto, a faixa de latitude e inclinações onde a aplicação do filtro de redução ao polo é instável. (fonte: http://www.ngdc.noaa.gov)
- Figura 61: Localização da área de Santa Terezinha (fonte: Barbosa, 2013)
- Figura 62: Mapa Geológico da região de Goiás e em destaque a área de Santa Terezinha abaixo (fonte: Barbosa, 2013)
- Figura 63: Mapa de Anomalia Magnética de uma área na região de Goiás e em destaque a região de estudo de Santa Terezinha.
- Figura 64: Mapa de anomalia magnética na região de Santa Terezinha
- Figura 65: Mapa de anomalia Magnética Reduzida ao Polo
- Figura 66: Inclinação do sinal analítico da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 67: Derivada Vertical da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 68: Amplitude do sinal analítico da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 69: Gradiente Horizontal Total da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 70: Theta Map da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 71: TDR THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 72: TDR THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 73: TAHG da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 74: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o Dz da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 75: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 76: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o ASA da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 77: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

- Figura 78: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o Theta Map da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 79: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDR_THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 80: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDX da anomalia magnética da região de Santa Terezinha
- Figura 81: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TAHG da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Parâmetros geométricos para a criação dos modelos sintéticos

Tabela 2:Parâmetros magnéticos e gravimétricos destes corpos e da região onde estão inseridos

Tabela 3: Parâmetros para a criação do modelo sintético

Tabela 4: Parâmetros geométricos para a criação do modelo

Tabela 5: Parâmetros magnéticos do modelo

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Teoria dos Filtros	2
3. Processamento de dados	4
4. Metodologia	10
5. Geração do modelo sintético	11
6. Resultados dos modelos sintéticos	12
7. Dependência da Amplitude do Sinal Analítico	36
8. Instabilidade do filtro de Redução ao Polo	40
9. Resultados em dados Reais	43
10. Conclusões	49
11. Bibliografia	50

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de gravimetria e magnetometria são ferramentas importantes para o auxílio da interpretação geológica, pois destacam, entre outras feições, contatos geológicos com contrastes de densidade e susceptibilidade magnética. O método gravimétrico faz o mapeamento de anomalias no campo de gravidade. Tais anomalias são geradas por contato entre rochas que possuem diferentes contrastes de densidades. Já o método magnetométrico destaca anomalias magnéticas geradas por rochas com diferentes susceptibilidades magnéticas.

Os dados adquiridos por levantamentos geofísicos de métodos potenciais necessitam ser tratados a partir de um processamento que tem como objetivo retirar ruídos, melhorando a qualidade do dado para a interpretação e destacando certas características. Este processamento é, muitas vezes, feito através de filtros espaciais, que são ferramentas matemáticas aplicadas aos dados.

Cada filtro, quando aplicado a um conjunto de dados, produz diferentes resultados. Um grupo de filtros que são de grande interesse são os filtros de resolução espacial, que destacam os contatos geológicos, mapeando seus limites. Estes são muito importantes para a localização exata de corpos e produzem bons resultados quando aplicados corretamente.

1.1. OBJETIVO

Este presente trabalho tem como objetivo principal a comparação entre filtros de resolução espacial com o intuito de melhorar a visualização de anomalias gravimétricas e magnetométricas. Estas comparações estão relacionadas também ao mapeamento de bordas e limites de corpos anômalos, ajudando, assim, em suas interpretações.

Serão abordados alguns outros assuntos relacionados com o objetivo principal, tais como demonstração da instabilidade da Redução ao Polo em baixas latitudes. Outro assunto a ser abordado visa provar a teoria prevista por Li (2006), que cita a verdadeira dependência dos resultados obtidos com a aplicação da Amplitude do Sinal Analítico em relação à direção de magnetização, à inclinação, à declinação e à intensidade do campo magnético da Terra.

2. TEORIA DOS FILTROS

Filtros são sistemas utilizados para modificar sinais de entrada, transformando-os

em sinais de saídas. Estas transformações podem ocorrer, através dos filtros naturais, como

exemplo o interior da Terra que atenua o sinal, e filtros artificiais, que são construídos com

objetivo de separar o ruído do sinal.

Em relação aos filtros artificiais, estes podem ser divididos em dois tipos: Filtros

analógicos e digitais, onde o primeiro é representado por um sistema elétrico e o segundo,

por um algoritmo.

Os filtros analógicos são utilizados embutidos em instrumentos geofísicos para a

prévia eliminação de ruídos. Mesmo após esse primeiro processo de retirada de ruídos, é

possível que ainda seja necessário a retirada de frequências indesejadas ou pode ser

desejado enfatizar frequências relacionadas a estruturas ou feições geológicas em

subsuperfície. Para este segundo processo, serão utilizados os filtros digitais, estes serão

melhor explicados a seguir.

Para a transformação de qualquer informação contínua registrada em forma

analógica, é realizado o processo de digitalização que possui duas etapas: amostragem, que

determina a posição espacial ou em tempo, onde a informação contínua é observada, e a

quantificação, em que é feita a conversão das amplitudes da informação contínua em

números.

O sinal amostrado é obtido multiplicando-se, no domínio do tempo ou do espaço, o

sinal de entrada com uma distribuição de trem de impulsos unitários com período T.

Trem de impulsos unitários: Equação 1: $\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t-kT)$

Sinal amostrado: Equação 2: $x_s(t) = x(t).\delta_T(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT).\delta(t-kT)$

2

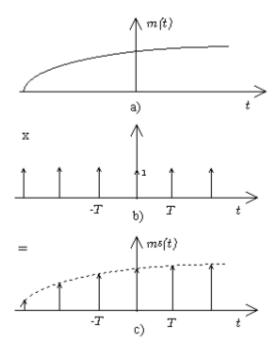


Figura 1: Amostragem no domínio do tempo. (a) sinal de entrada; (b) trem de impulsos unitários com período T;(c) produto de (a) e (b); Fonte: Modificado de http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele

Quando combinamos um sinal amostrado com um filtro ou um sistema invariante no tempo, no caso de estar no domínio do tempo, ou em deslocamento, no caso do domínio do espaço, encontramos um registro digital transformado linearmente, onde $x_s(t)$ é transformado em $y_s(t)$ por um sistema, logo, $x(t-t_0)$ é transformado em $y(t-t_0)$.

Equação 3:
$$y(t-t_0) = L[x(t-t_0)]$$

Substituindo algumas equações:

Equação 4:
$$y_s(t) = L \left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT) \delta(t-kT) \right]$$

Equação 5:
$$y_s(t) = x(kT)L[\delta(t-kT)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(kT).h(t-kT)$$

Onde h(kT) é a resposta do filtro ao impulso unitário. Assim, quando filtramos um sinal, estamos convolvendo-o com a resposta ao impulso unitário do filtro.

Segundo a teoria da convolução, a transformada de Fourier de duas funções convolvidas no domínio do espaço é igual ao produto das transformadas das duas funções

no domínio de Fourier. A teoria de Fourier (Oppenheim, 1999) nos fornece uma maneira de expressar os sinais no domínio da frequência.

Equação 6:
$$Y(f) = X(f)$$
. $H(f)$

Sendo Y(f), X(f) e H(f) as transformadas de Fourier de y(k/T), x(k/T) e h(k/T) respectivamente.

Basicamente, os filtros de processamento no domínio da frequência funcionam primeiramente com a aplicação da transformada de Fourier, transformando o sinal no domínio do espaço ou do tempo para o domínio da frequência. O filtro (sistema) será aplicado e após isso o sinal retorna para o domínio do espaço ou do tempo através da transformada inversa de Fourier.

3. PROCESSAMENTO DE DADOS

O processamento de dados tem como objetivo promover a melhoria da qualidade e representação de dados geofísicos para serem interpretados. Este processamento pode ser feito, por exemplo, em dados magnéticos e gravimétricos com a aplicação de filtros. Estes filtros são operações matemáticas que permitem aos geofísicos aprimorar seus dados de acordo com cada necessidade e objetivo na interpretação.

Os filtros abordados neste presente trabalho são: Redução ao polo (RTP- Baranov, 1957), Derivada Vertical (Dz- Blakely, 1996), Inclinação do Sinal Analítico (TDR- Miller & Singh, 1994), Amplitude do Sinal Analítico (ASA- Nabighian, 1972,1974; Roest et al., 1992), Gradiente Horizontal Total (THDR- Cordell & Grauch, 1985), Theta Map (Wijins et al., 2005), Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR_THDR-Verduzco et al., 2004), Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TDX- Cooper & Cowan, 2006) e Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (TAHG- Ferreira et al, 2013). Estes são filtros de resolução espacial, que melhoram as respostas dos dados magnéticos e gravimétricos, fazendo com que anomalias mais sutis fiquem mais visíveis. Alguns destes filtros possuem o intuito de delinear as bordas de corpos anômalos para melhor detectá-los, produzindo picos da anomalia sobre as bordas dos corpos. O uso

combinado destes filtros nos dados faz com que sejam mapeadas as bordas das anomalias de uma maneira mais aprimorada.

3.1. FILTROS DE RESOLUÇÃO ESPACIAL

3.1.1. Redução ao Polo (RTP)

O método de redução ao polo (*Baranov*, 1957) é utilizado em áreas de altas e médias latitudes, recalculando a intensidade dos dados como se os dados estivessem localizados no polo, onde a magnetização induzida é vertical, com o objetivo de tornar independente da direção da indução do campo geomagnético (Telford et al., 1976). A redução ao polo geralmente ajuda na interpretação, pois transforma uma anomalia de caráter dipolar em uma anomalia monopolar. Este filtro desloca o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador.

Este filtro, quando aplicado aos dados, não produz bons resultados onde a magnetização não é induzida pelo campo magnético atual, a não ser que se conheça a atitude da magnetização remanescente.

A equação para a aplicação deste filtro no domínio da frequência está apresentada abaixo, esta é a equação utilizada pelo Oasis montaj (Geosoft, 2001) para reduzir anomalias ao polo magnético, onde I é a inclinação geomagnética, Ia é a inclinação para a correção de amplitude, D é a declinação do campo geomagnético da região na época do levantamento e θ é a latitude polar, que, em coordenadas polares, o ângulo θ é dado por atan(u/v), onde u e v são os números de onda no domínio da transformada de Fourier. A inclinação para a correção de amplitude na redução ao polo é, geralmente, calculada empiricamente como sendo o complemento da inclinação magnética (Ia = 90 - I).

Equação 7:
$$RTP = \frac{\left[\sin(I) - i\cos(I)\cos\left(D - \theta\right)\right]^2}{\left[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia)\cos^2(D - \theta)\right].\left[\sin^2(I) + \cos^2(I)\cos^2(D - \theta)\right]}$$

O *RTP* torna-se instável quando, na equação, todo o denominador é igual ou próximo a zero, causando uma singularidade na equação. Por isso, este filtro torna-se instável quando é aplicado em dados de latitudes muito baixas.

3.1.2. Derivada Vertical (Dz)

O filtro de derivada vertical é aplicado nos dados de campos potenciais para realçar as fontes geológicas rasas. O filtro consiste da derivada da anomalia em relação à direção vertical ,onde A é a amplitude da anomalia.

Equação 8:
$$Dz = \frac{\partial A}{\partial z}$$

3.1.3. Amplitude do Sinal Analítico (ASA)

O filtro de Amplitude do Sinal Analítico é um filtro de mapeamento de bordas de corpos. Particularmente em locais onde a fonte é rasa, onde a latitude magnética é baixa e onde a magnetização remanescente é significativa, os resultados são satisfatórios (Li, 2006).

Este método foi introduzido por Nabighian (1972), no caso 2D, como uma ferramenta de estimativa de profundidade e de localização de fontes anômalas.

O ASA possui a característica de ter as amplitudes máximas em cima das bordas principalmente quando os corpos são rasos. Segundo Li (2006), com o aumento da profundidade, os valores máximos são deslocados.

Segundo Blakely (1996), o ASA consiste na combinação dos gradientes horizontal e vertical da anomalia. Seus resultados são dependentes da profundidade, extensão e ângulo de mergulho do corpo, além da direção do campo magnético da Terra.

A Amplitude do Sinal Analítico é dada pela equação abaixo, onde *A* são os valores do campo magnético anômalo.

Equação 9:
$$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}$$

3.1.4. Gradiente Horizontal Total (THDR)

O filtro de gradiente horizontal total é usado para o aprimoramento na detecção de bordas de corpos anômalos em dados de campo potencial (Cooper and Cowan, 2008). Quando o gradiente horizontal de uma anomalia é medido, avaliam-se as mudanças abruptas das propriedades físicas que variam lateralmente.

Este filtro realça as altas frequências e posiciona os picos das anomalias bem próximas das bordas dos corpos, com valores mínimos na parte central, diminuindo a força do sinal com o aumento da profundidade (Ferreira et. al, 2013).

Quando aplicado a dados magnetométricos e gravimétricos, este filtro destaca mudanças abruptas entre contatos geológicos que variam lateralmente tanto de susceptibilidades magnética, quanto de diferentes densidades, onde os gradientes mais íngremes indicam tais mudanças.

O Gradiente Horizontal Total (Blakely, 1996) é calculado a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das derivadas das anomalias (A) em cada direção (x e y).

Equação 10:
$$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2}$$

3.1.5. Inclinação do Sinal Analítico ou *Tilt Derivative* (TDR)

O método de Inclinação do Sinal Analítico (TDR), também chamado de *Tilt Derivative*, foi introduzido por Miller & Singh (1994) e baseia-se na razão entre a derivada vertical (VDR) e a derivada horizontal total (THDR); ele normaliza a primeira em relação à segunda, e sua expressão analítica é:

Equação 11:
$$TDR = \tan^{-1}\left(\frac{VDR}{THDR}\right)$$

Por extrair o ângulo que tangencia a razão entre derivadas, o TDR destaca anomalias tanto de grandes ou pequenas amplitudes, ou seja, ele é eficaz no balanceamento de amplitudes de diferentes anomalias. Os valores das amplitudes do TDR estão restritos entre $-\pi/2$ e $+\pi/2$.

Segundo Verduzco et al. (2004), as vantagens deste método são a capacidade de normalizar imagens provenientes de dados de campo magnético e o fato de ter bons resultados na presença de ruído.

As respostas deste filtro em dados magnetométricos reduzidos ao polo possuem seus picos exatamente sobre o centro do corpo, caindo para zero sobre as proximidades dos limites do corpo anômalo. Por este motivo, o filtro de inclinação do sinal analítico não pode ser considerado um método de detecção de bordas (Cooper & Cowan, 2008), porém é considerado um método de destaque de anomalias.

3.1.6. Theta Map

Segundo Wijns et al., 2005, a técnica do *Theta Map* é derivada do sinal analítico. É considerada uma ferramenta simples e eficaz para delinear contatos. A técnica foi desenvolvida (Wijins et al, 2005) para dados adquiridos em baixa latitude magnética.

O *Theta Map* pode ser definido abaixo, onde a derivada horizontal total (THDR) é normalizada pelo sinal analítico (ASA).

Equação 12:
$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{THDR}{ASA}\right)$$

3.1.7. Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR_{THDR})

O método do Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR_{THDR}) é baseado na aplicação do gradiente horizontal total (THDR) em dados já filtrados com a inclinação do sinal analítico (TDR). É reconhecido como um método eficaz para a definição de limites de corpos anômalos.

Este método foi introduzido por Verduzco et al. (2004) com o objetivo de mapear estruturas rasas do embasamento, realçando e posicionando os picos de amplitudes nas bordas dos corpos causadores. O método é muito empregado para localização de corpos rasos, pois as amplitudes atenuam-se com o aumento da profundidade.

O *TDR*_{THDR} é independente da direção de magnetização e da intensidade das anomalias (Neto et al., 2007). Segundo Verduzco et al. (2004), este método é independente da inclinação magnética e gera respostas muito boas na presença de magnetização induzida ou remanescente, ou em corpos que apresentam as duas características.

O filtro é definido através da aplicação do THDR aos dados de TDR nas direções x e y:

Equação 13:
$$TDR_{THDR} = \left[\left(\frac{\partial TDR}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

3.1.8. Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TDX ou IGHT)

O método de Inclinação do gradiente horizontal total foi introduzido por Cooper & Cowan, 2006, como uma versão modificada da inclinação do sinal analítico (TDR). Ele é baseado na normalização da amplitude do gradiente horizontal total (THDR) pelo módulo da derivada vertical (VDR).

Equação 14:
$$TDX = \tan^{-1}\left(\frac{THDR}{|VDR|}\right)$$

A resposta deste método tem como resultado valores de máxima amplitude localizados nos limites dos corpos e valores mínimos em seus centros. Para fontes mais profundas, os picos da anomalia são alargados, fazendo com que o corpo pareça maior do que realmente é (Ferreira et. al, 2013).

3.1.9. Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (TAHG)

É um método eficaz usado para a detecção de bordas de corpos anômalos. Tem como objetivo realçar o gradiente horizontal total de anomalias utilizando a inclinação do sinal analítico. Produz máxima amplitude da anomalia situada nas bordas do corpo. Uma de suas principais características é a de equalizar sinais provenientes de fontes rasas e profundas (Ferreira et al., 2013). É considerado um método muito eficaz para interpretação qualitativa de mapas gravimétricos e magnetométricos.

O TAHG não produz bons resultados quando o dado não está reduzido ao polo ou quando o corpo possui magnetização remanescente (Ferreira et. al, 2013).

Segundo Ferreira et al. (2013), as diferenças entre os valores máximos da anomalia filtrada com o TAHG e as bordas reais do corpo anômalo provavelmente estão relacionadas com a forte dependência da inclinação do sinal analítico com a orientação do campo magnético.

O TAHG é menos sensível à diferença de profundidade. Corpos anômalos mais rasos têm suas bordas igualmente realçadas por máximas amplitudes de sinal quando comparados a corpos anômalos mais profundos.

O TAHG é obtido a partir da seguinte equação:

Equação 15:
$$TAHG = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right)$$

RESUMO DOS FILTROS

Filtro	Fórmula	Características
Redução ao Polo (RTP)	$\frac{[\sin(I) - i\cos(I)\cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia)\cos^2(D - \theta)], [\sin^2(I) + \cos^2(I)\cos^2(D - \theta)]}$	Desloca o máximo da anomalia, fazendo com que se localize exatamente em cima do corpo causador.
Derivada Vertical (Dz)	$Dz = \frac{\partial A}{\partial z}$	Vertical é aplicado nos dados de campos potenciais para realçar as fontes geológicas rasas.
Amplitude do Sinal Analítico (ASA)	$ASA = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial z}\right)^2}$	amplitudes máximas em cima das bordas principalmente quando os corpos são rasos.
Gradiente Horizontal Total (THDR)	$THDR = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y}\right)^2}$	Realça as altas frequências e posiciona os picos das anomalias bem próximas das bordas dos corpos, com

		valores mínimos na parte central, diminuindo a força do sinal com o aumento da profundidade
Inclinação do Sinal Analítico ou <i>Tilt</i> <i>Derivative</i> (TDR)	$TDR = \tan^{-1}\left(\frac{VDR}{THDR}\right)$	Posiciona os valores máximos da anomalia exatamente sobre o centro do corpo, caindo para zero sobre as proximidades dos limites do corpo anômalo. Logo, não pode ser considerado um método de detecção de bordas.
Theta Map	$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{THDR}{ASA}\right)$	Realça bordas de corpos anômalos.
Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR _{THDR})	$TDR_{THDR} = \left[\left(\frac{\partial TDR}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$	Utilizado para mapear estruturas rasas do embasamento, realçando e posicionando os picos de amplitudes nas bordas dos corpos causadores. As amplitudes da anomalia atenuam-se com o aumento da profundidade.
Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TDX ou IGHT)	$TDX = \tan^{-1}\left(\frac{THDR}{ VDR }\right)$	Máxima amplitude localizados nos limites dos corpos e valores mínimos em seus centros.
Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (TAHG)	$TAHG = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{\partial THDR}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THDR}{\partial y}\right)^2}} \right)$	Usado para a detecção de bordas de corpos anômalos. Tem como objetivo realçar o gradiente horizontal total de anomalias utilizando a inclinação do sinal analítico.

4. METODOLOGIA

Nesta monografia, foram aplicados os métodos acima descritos e, posteriormente, foi feita a análise dos resultados. O processamento e comparação dos filtros foram aplicados a modelos sintéticos e a dados reais.

Primeiramente, para a aplicação dos filtros abordados neste trabalho, foi gerado um modelo sintético de um prisma a partir do programa *GRAV_MAG_PRISMA*, fornecido pelos professores Francisco Ferreira e Jeferson de Souza da UFPR. Este programa gera anomalias gravimétricas e magnéticas de corpos prismáticos, cujas dimensões, densidades e magnetizações são escolhidas pelo usuário e a contaminação por ruídos é opcional. Os dados são descritos em formato *xyz* (ASCII), para posterior processamento dos dados através do software *Oasis montaj* da empresa *Geosoft Inc.*®.

5. GERAÇÃO DOS MODELOS SINTÉTICOS

Para testar a eficácia dos filtros, é importante avaliar os resultados em anomalias, oriundas de corpos anômalos de formatos conhecidos. Com este propósito, foram criados dois modelos sintéticos para a aplicação de tais métodos. Estes modelos são compostos, cada um, por dois cubos localizados em diferentes profundidades.

Os cubos estão inseridos em uma área de 6km x 6km (Figura 2) e seus parâmetros geométricos, para os dois corpos, encontram-se na tabela abaixo (tabela 1):

	Cubo 1 (C1)	Cubo 2 (C2)
Largura (m)	1000	1000
Comprimento (m)	1000	1000
Espessura (m)	1000	1000
X (m)	1000 - 2000	4000 - 5000
Y (m)	2500 - 3500	2500 - 3500
Z (m)	100 - 1100	200 - 1200
Profundidade do topo (m)	100	200

Tabela 1:Parâmetros geométricos para a criação dos modelos sintéticos

Foram gerados dois modelos sintéticos localizados em diferentes regiões da Terra, com diferentes inclinações e declinações do campo magnético. O primeiro, chamado de modelo 1, foi gerado como se os cubos estivessem no polo Norte magnético e o segundo, modelo 2, localizado na latitude magnética de uma determinada área do estado de Goiás, com as mesmas características do dado real que será utilizado neste trabalho. Os parâmetros magnéticos e gravimétricos destes corpos e da região onde estão inseridos encontram-se na tabela abaixo (tabela 2):

	Cubos no Polo	Cubos em Goiás
Declinação magnética (em graus)	0	-19.5
Inclinação magnética (em graus)	90	-17.9
Intensidade do campo magnético	56973	23864.39
total - TMI (nT)		
Susceptibilidade do corpo (SI)	0.2	0.2
Magnetização Induzida (A/m)	9.0675	3.7891
Magnetização Remanescente (A/m)	0	0
Densidade (kg/m³)	2700	2700

Tabela 2:Parâmetros magnéticos e gravimétricos destes corpos e da região onde estão inseridos

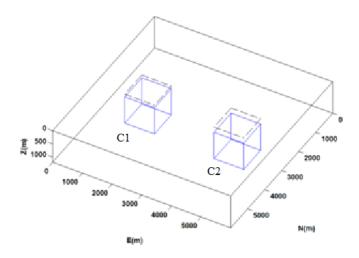
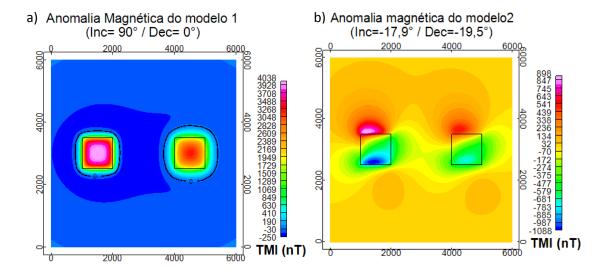


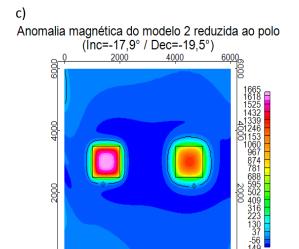
Figura 2: Modelo sintético de dois cubos com profundidades de topos de 100 metros (C1) e 200 metros (C2).

6. RESULTADOS DOS MODELOS SINTÉTICOS

Nesta seção, serão exibidos os resultados após a aplicação dos filtros aos dois modelos sintéticos gerados. Com isso, será possível avaliar as respostas destes em dados magnéticos no ambiente do polo norte magnético, onde a inclinação é 90° e a declinação é 0° (chamado de modelo 1) e simulando a região de Goiás, onde o parâmetro de inclinação é de -17,9° e declinação de -19,5° (chamado de modelo 2). Também serão analisadas as respostas às anomalias gravimétricas em tais regiões. Lembrando que os cubos possuem diferentes profundidades de seus topos (C1=100 metros e C2=200 metros).

Analisando primeiramente os resultados obtidos a partir do processamento dos dados magnetométricos, a figura abaixo representa os mapas de anomalias magnéticas resultante dos dois modelos e delineado, em preto, o contorno dos dois cubos.





4000

2000

Figura 3: (a) Anomalia magnética do modelo 1; (b) Anomalia magnética do modelo 2; (c) Anomalia magnética do modelo 2 reduzida ao polo

Abaixo podemos visualizar os resultados de todos os filtros estudados neste trabalho: Derivada vertical (Dz), Inclinação do Sinal Analítico (TDR), Amplitude do Sinal Analítico (ASA), Gradiente Horizontal Total (THDR), Theta Map, Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR_THDR), Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TDX) e Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (TAHG). Em todas os mapas gerados, podem ser observados os contornos dos cubos em preto.

___TTMI (nT)

Utilizando primeiramente o filtro de derivada vertical (Dz), é possível observar (figuras 4, 5, 6 e 7) que este realça as altas frequências, ou seja, realça a amplitude das anomalias causadas por fontes mais rasas. Comparando seus resultados em fontes rasas e profundas, ele destaca bem as duas anomalias, porém a mais rasa fica mais destacada. Seus

resultados aplicados ao modelo 2 reduzido ao polo delineiam melhor os cubos quando o dado está reduzido ao polo.

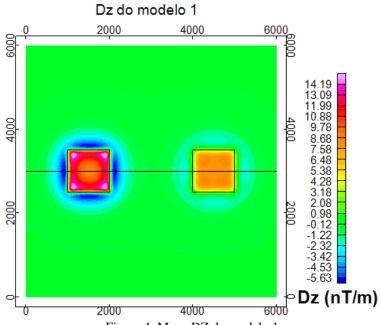


Figura 4: Mapa DZ do modelo 1

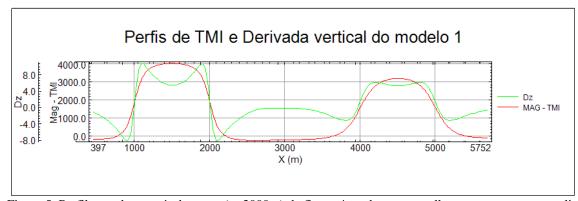


Figura 5: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 4, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde a derivada vertical do dado

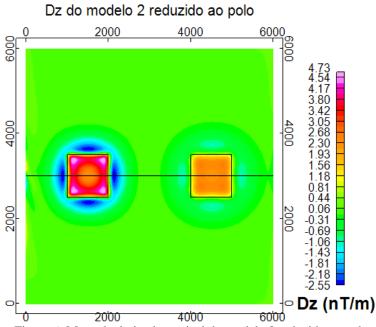


Figura 6: Mapa da derivada vertical do modelo 2 reduzido ao polo

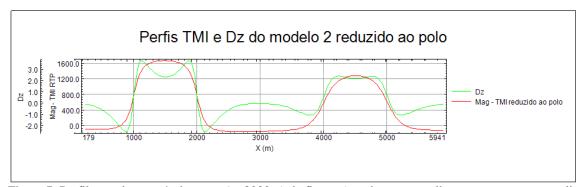


Figura 7: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 6, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde a derivada vertical do dado reduzido ao polo

O filtro de Inclinação do Sinal Analítico (TDR) é eficaz em destacar fontes tanto rasas quanto profundas, porém, este filtro não pode ser considerado um filtro de destaque de bordas, já que seu pico máximo é localizado exatamente sobre o centro do corpo, isto é, não aparecem feições indicativas de bordas (figuras 8, 9, 10 e 11).

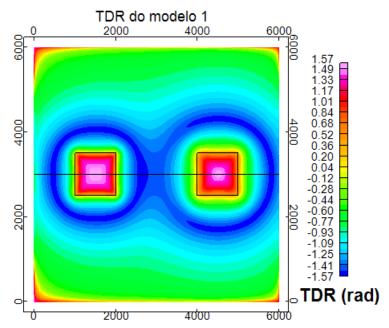


Figura 8: Mapa TDR do modelo 1

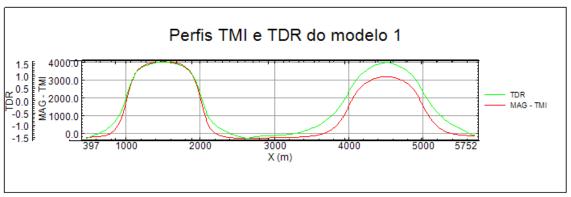


Figura 9: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 8, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDR do dado

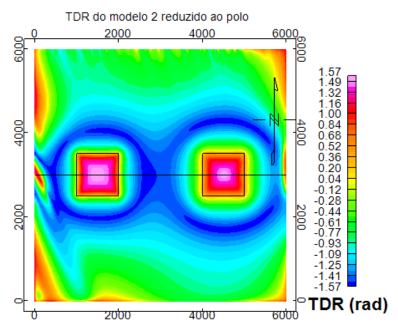


Figura 10: Mapa TDR do modelo 2 reduzido ao polo

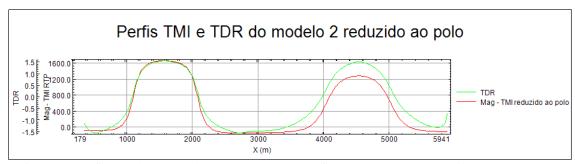


Figura 11: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 10, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDR do dado reduzido ao polo

A Amplitude do Sinal Analítico é um filtro de detecção de bordas, pois localiza os picos de valores máximos da anomalia próximo às bordas dos corpos anômalos. Entretanto, a força do sinal é gradualmente atenuada com a profundidade, o que é visível nas figuras 12, 13, 14 e 15.

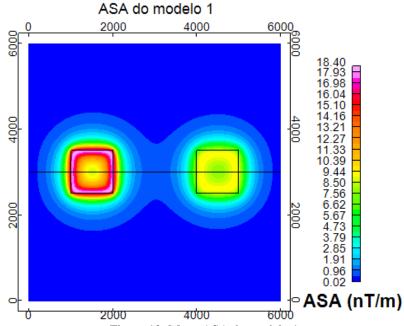


Figura 12: Mapa ASA do modelo 1

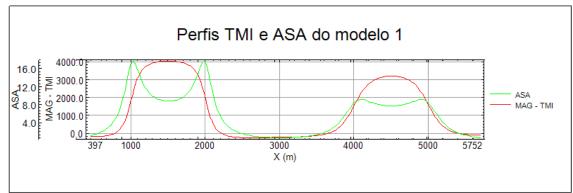


Figura 13: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 12, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o ASA do dado

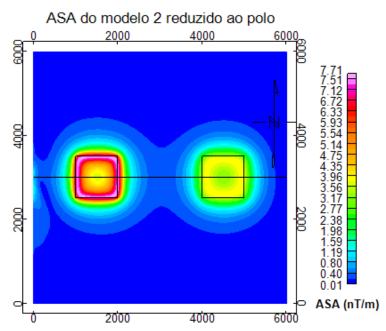


Figura 14: Mapa ASA do modelo 2 reduzido ao polo

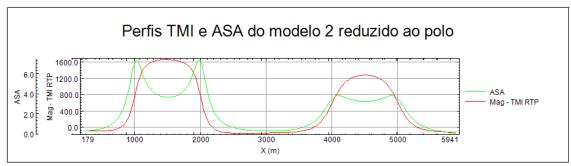


Figura 15: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 14, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o ASA do dado reduzido ao polo

Utilizando o Gradiente Horizontal Total (THDR), pode-se perceber nas figuras a seguir (figuras 16, 17, 18 e 19) que este filtro é também um excelente detector de borda de corpos anômalos, com seus valores máximos de anomalia passando bem próximos aos limites do corpo e com valores mínimos em seu centro. Porém, assim como a Amplitude do Sinal Analítico, a intensidade da anomalia descresce com o aumento da profundidade dos corpos.

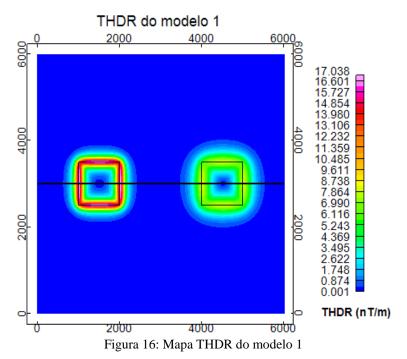


Figura 17: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 16, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o THDR do dado

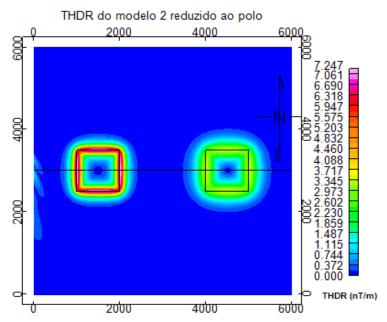


Figura 18: Mapa THDR do modelo 2 reduzido ao polo

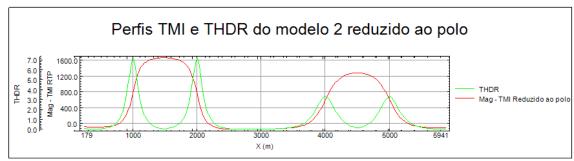


Figura 19: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 18, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o THDR do dado reduzido ao polo

O filtro Theta Map delineia os corpos anômalos com valores mínimos em suas bordas e máximos em seu centro. Como podemos analisar nas figuras abaixo (figuras 20, 21, 22 e 23), em profundidade, as anomalias alargam-se um pouco.

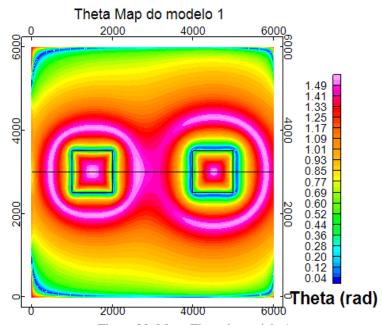


Figura 20: Mapa Theta do modelo 1

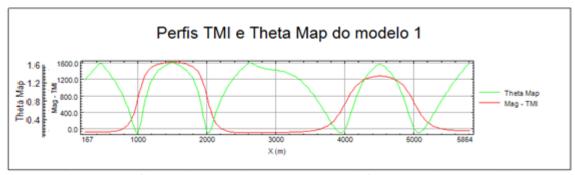


Figura 21: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 20, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o Theta Map do dado

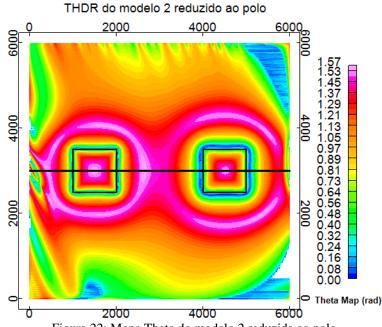


Figura 22: Mapa Theta do modelo 2 reduzida ao polo

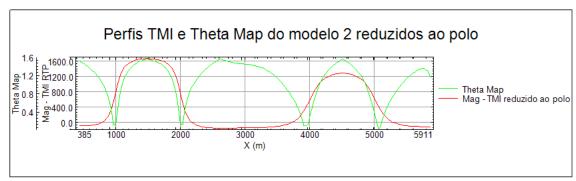


Figura 23: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 22, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o Theta Map do dado

Outro filtro utilizado, o Gradiente Horizontal Total da Inclinação do Sinal Analítico (TDR_{THDR}) , é eficaz em detectar as bordas dos corpos anômalos. Possui a característica de ser independente da inclinação magnética. O método é considerado eficaz, entretanto, deve ser aplicado para localização de corpos mais rasos, pois as amplitudes de suas anomalias atenuam-se com o aumento da profundidade do corpo, como observa-se nas figuras a seguir (figuras 24, 25, 26 e 27).

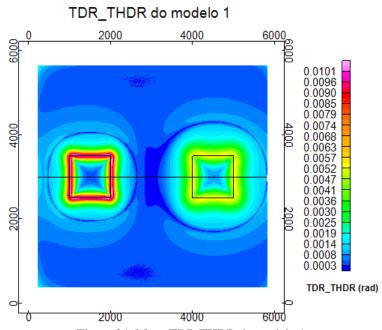


Figura 24: Mapa TDR THDR do modelo 1

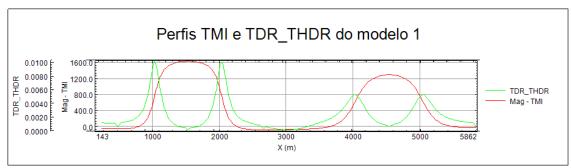


Figura 25: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 24, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDR THDR do dado

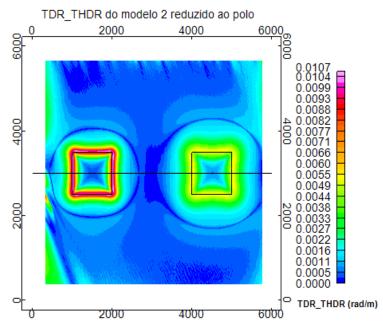


Figura 26: Mapa TDR THDR do modelo 2 reduzida ao polo

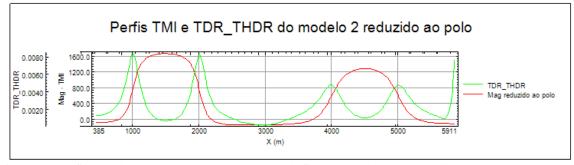


Figura 27: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 26, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDR THDR do dado reduzido ao polo

Com o filtro de Inclinação do Gradiente Horizontal Total (TDX), as fontes são delineadas com valores máximos nas suas bordas e mínimos em seu centro. Para fontes mais profundas, os picos das anomalias podem ser alargados, fazendo com que a anomalia

seja interpretada como sendo maior do que é na realidade. Estas características podem ser observadas a seguir (figuras 28, 29, 30 e 31).

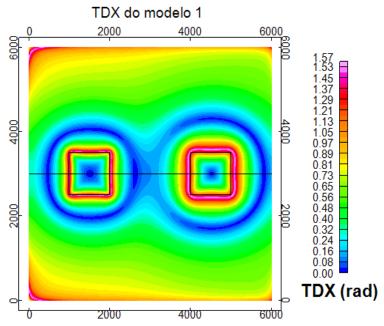


Figura 28: Mapa TDX do modelo 1

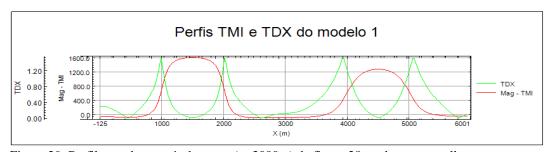


Figura 29: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 28, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TDX do dado

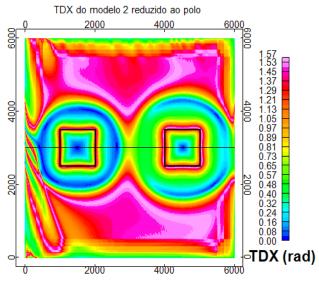


Figura 30: Mapa TDX do modelo 2 reduzido ao polo

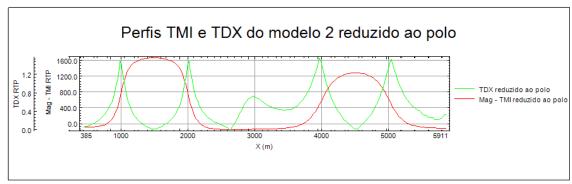
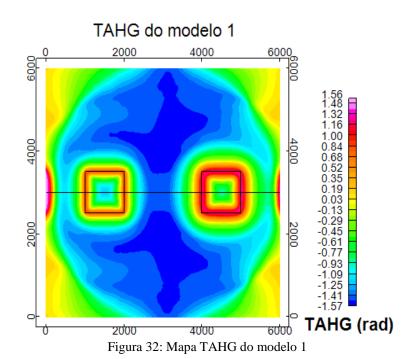


Figura 31: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 30, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TDX do dado

Com a aplicação do filtro de Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total (TAHG), os resultados obtidos mostraram o contorno do corpo bem próximo do real e as anomalias mantiveram as altas amplitudes até mesmo no corpo mais profundo. Podemos analisar estas características nas figuras 32, 33, 34 e 35. Segundo Ferreira et al. (2013), este filtro não delineia de maneira satisfatória os corpos quando o dado não está reduzido ao polo e nem na presença de magnetização remanescente, como pode ser comprovado nas figuras 36 e 37, respectivamente.



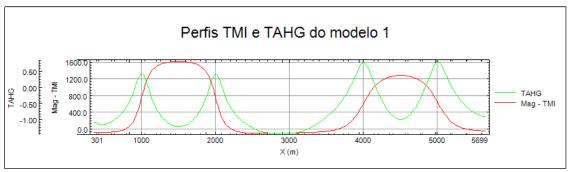


Figura 33: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 32, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética e em verde o TAHG do dado

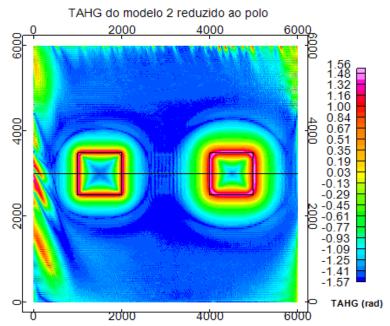


Figura 34: Mapa TAHG do modelo 2 reduzido ao polo

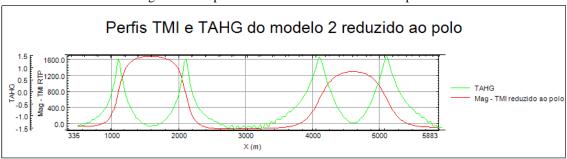


Figura 35: Perfil traçado através do mapa (y=3000m) da figura 34, onde em vermelho encontra-se a anomalia magnética reduzida ao polo e em verde o TAHG do dado

TAHG do modelo 2 não reduzido ao polo 1.56 1.48 1.32 1.16 1.00 0.84 0.68 0.52 0.30 0.04 -0.12 -0.28 -0.44 -0.12 -0.28 -0.44 -0.12 -0.29 -1.57 TAHG (rad)

Figura 36: Mapa TAHG do modelo 2 não reduzido ao polo

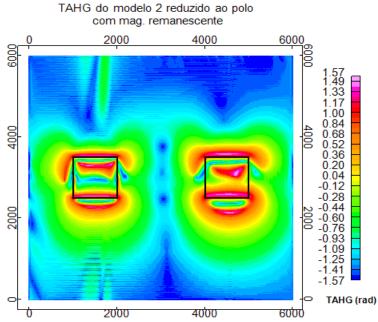


Figura 37: Mapa TAHG do modelo 2 com magnetização remanescente adicionada (de intensidade 0.2~A/m, declinação de $+10^\circ$ e inclinação de $+20^\circ$)

Segundo Ferreira et al. (2010), comparando os filtros Theta map e TDX, é possível deduzir a seguinte equação:

Equação 16: Theta
$$Map = \frac{\pi}{2} - TDX$$

Este fato é comprovado ao analizarmos seus perfis (figura 38). As zonas de picos máximos do TDX, que exibem o limite do corpo, são análogas às zonas de picos mínimos do Theta Map.

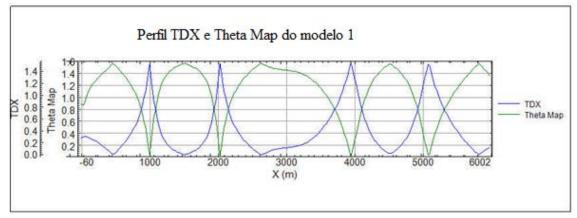


Figura 38: Perfis traçados através do mapa (y=3000m) do modelo 1, onde em azul representa a curva de TDX e em verde, a do Theta Map.

Comparando os métodos TDR_THDR (Verduzco et al., 2004) e TAHG (Ferreira et al., 2013), é possível observar que o primeiro marca as bordas dos corpos por amplitudes acentuadas, entretanto, com o aumento da profundidade, estas são atenuadas. O TAHG possui uma melhor resolução neste quesito, ele mantém altas amplitutes tanto em fontes mais rasas quanto mais profundas. Esta comparação é provada no mapa 3D a seguir (figura 39).

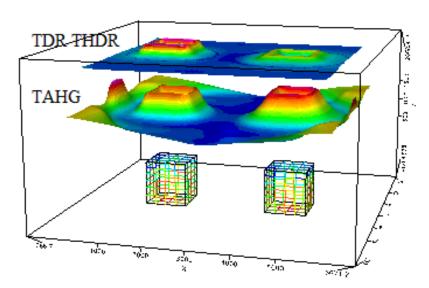


Figura 39: Mapa 3D dos dados do modelo 1 no polo filtrado com o TAHG e o TDR_THDR, como indicados na figura. O cubo C1 possui profundidade do topo de 100 metros e C2, 200 metros.

Pode-se também comparar os filtros TAHG e TDX, uma vez que ambos marcam as bordas das fontes anômalas com picos de amplitude máxima. O TAHG caracteriza o

contorno do corpo mais profundo com amplitudes mais altas. Podemos analisá-los também no mapa 3D abaixo (figura 40).

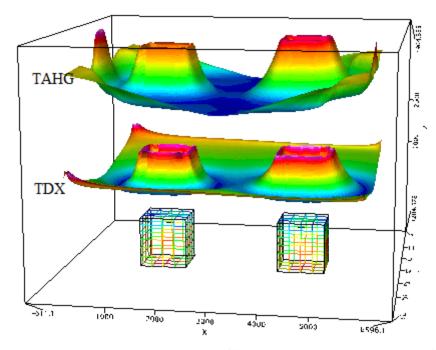


Figura 40: Mapa 3D dos dados do modelo 1 no polo filtrado com o TAHG e o TDX, como indicados na figura. O cubo C1 possui profundidade do topo de 100 metros e C2, 200 metros.

Foi testada também a eficácia do filtro TAHG em modelos com fontes mais próximas. Foram utilizados os modelos 1 e 2, modificados com distância dos centros das fontes de 1500m (figura 41). Os resultados a seguir mostram que o método é eficaz mesmo em fontes mais próximas, ele delineia muito bem as bordas dos corpos (figura 42).

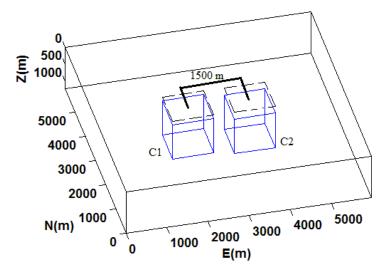


Figura 41: Modelo sintético de dois cubos com profundidades de topos de 100 metros (C1) e 200 metros (C2), com distância entre os centros de 1500 metros.

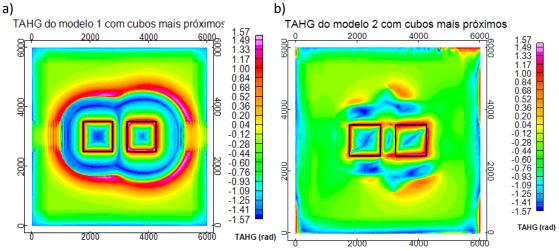


Figura 42: Aplicação do TAHG ao (a) modelo 1 e ao (b) modelo 2 reduzido ao polo

Com o intuito de saber a sensibilidade de alguns filtros em relação à presença de ruído, os dados do modelo 2 reduzidos ao polo foram contaminados com ruído gaussiano de amplitude de 2 nT, 0,0083% do campo total. Os resultados encontram-se abaixo (figura 43).

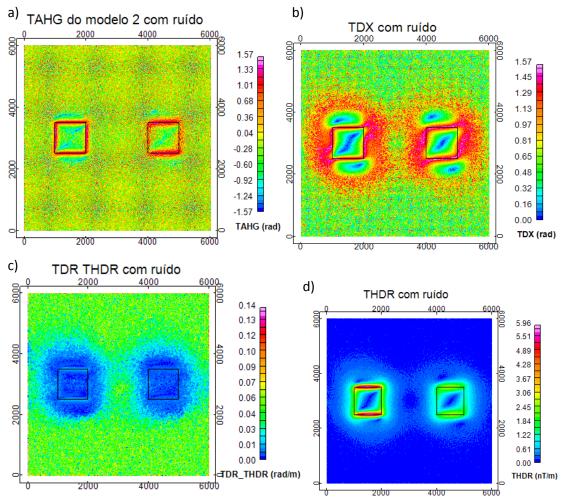


Figura 43: Mapas do modelo 2 contaminado com ruído de amplitude 2 nT (0,0083% do campo total). (a)TAHG; (b)TDX; (c) TDR_{THDR} ; (d)THDR

Comparando os quatro filtros na presença de ruído, pode-se observar que o TDX e o THDR alargam muito seus picos máximos e não delineiam exatamente a borda dos corpos, principalmente o do cubo mais profundo. O filtro que tem melhor desempenho é TAHG, que marca bem as bordas e aproxima muito do contorno do corpo verdadeiro.

Da mesma forma que estes filtros produzem ótimos resultados ao serem aplicados a dados magnetométricos, todos eles também são aplicáveis aos dados gravimétricos, produzindo respostas com características semelhantes. Seus atributos são análogos em ambos os tipos de dados. Abaixo encontramos os resultados do processamento das anomalias gravimétricas no modelos sintéticos 1 e 2. Os resultados de cada filtro em ambos os modelos são idênticos, já que os parâmetros geométricos e a densidade dos corpos nos dois são iguais.

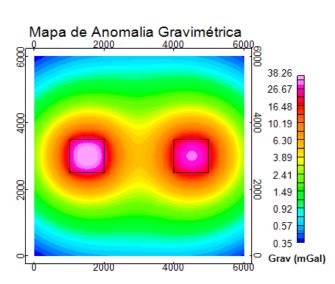
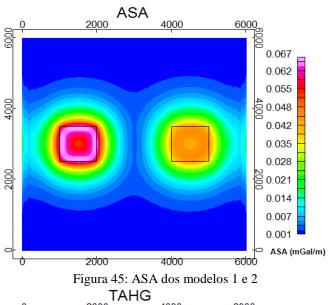


Figura 44: Mapa de anomalia gravimétrica dos modelos 1 e 2



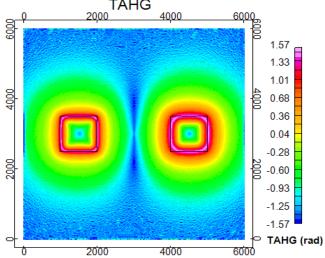


Figura 46: TAHG dos modelos 1 e 2

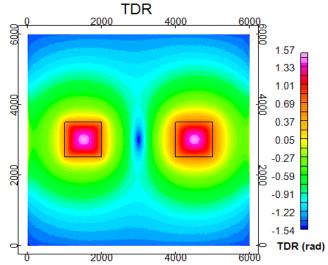


Figura 47: TDR dos modelos 1 e 2

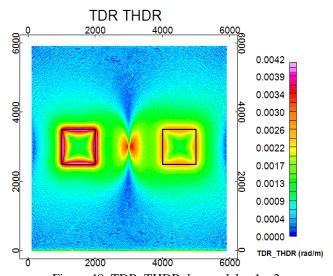


Figura 48: TDR_THDR dos modelos 1 e 2

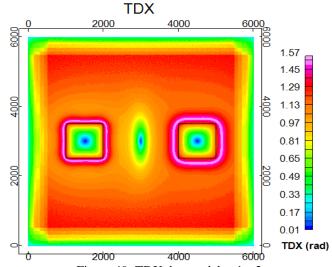


Figura 49: TDX dos modelos 1 e 2

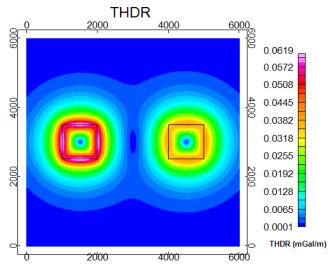
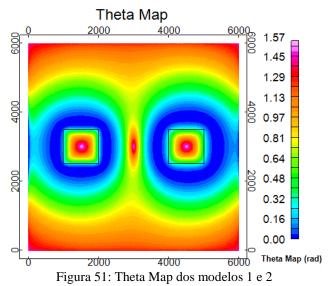


Figura 50: THDR dos modelos 1 e 2



7. DEPENDÊNCIA DA AMPLITUDE DO SINAL ANALÍTICO

Muitos autores tratavam a Amplitude do Sinal Analítico como independente dos parâmetros do campo magnético. Entretanto, Li (2006) comprova através de testes sintéticos que os resultados provenientes do ASA, em geral, são dependentes de alguns parâmetros do campo magnético como, por exemplo, da inclinação e declinação do campo magnético.

Nesta seção, a teoria de Li (2006) será verificada através de comparações entre modelos sintéticos similares que variam suas inclinações e declinações magnéticas, e declinação e inclinação da magnetização remanescente. Os outros parâmetros dos modelos, como a dimensão da área e a geometria do corpo serão iguais em todos os modelos apresentados (Tabela 3).

Susceptibilidade (SI)	0.2
Comprimento (m)	1000
Largura (m)	1000
Espessura (m)	1000
Coordenada X do centro do corpo (m)	3000
Coordenada Y do centro do corpo (m)	3000
Profundidade do corpo (m)	100

Tabela 3: Parâmetros para a criação do modelo sintético

Abaixo são apresentadas as respostas do ASA para estes diferentes modelos:

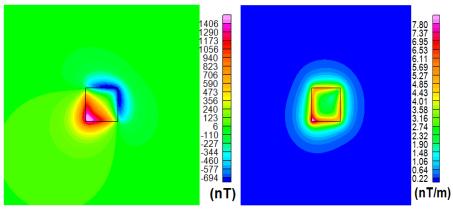
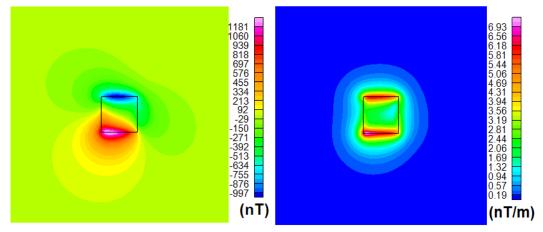
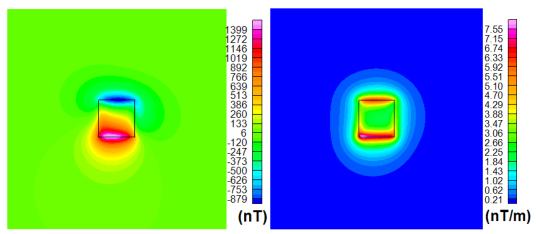


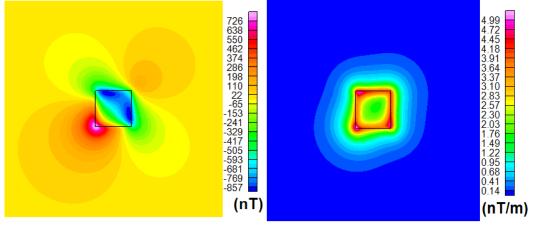
Figura 52: (a) Anomalia magnética de um cubo; Inclinação e declinação magnética de 45°, campo magnético de 22789 nT e profundidade do corpo de 100m; (b) Resposta do ASA para a anomalia em (a)



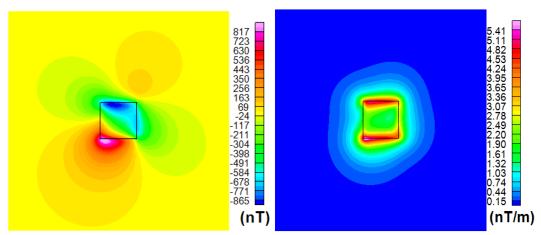
(c) Anomalia magnética do modelo com parâmetros iguais ao da figura (a), adicionado magnetização remanescente de intensidade 0,2(A/m), declinação de 10° e inclinação de 20°;(d) Resposta do ASA para a anomalia em (c)



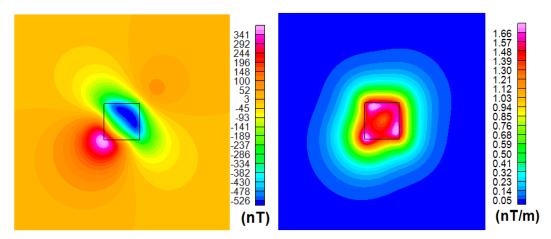
(e) Anomalia magnética de um cubo; Inclinação magnética de 45°e declinação de 15°, campo magnético de 22789 nT e profundidade do corpo de 100m; (f) Resposta do ASA para a anomalia em (e)



(g) Anomalia magnética de um cubo; Inclinação magnética de 15°e declinação de 45°, campo magnético de 22789 nT e profundidade do corpo de 100m; (h) Resposta do ASA para a anomalia em (g)



(i) Anomalia magnética do modelo com parâmetros iguais ao da figura (g), adicionado magnetização remanescente de intensidade 0,2(A/m), declinação de 10° e inclinação de 20°; (j) Resposta do ASA para a anomalia em (i)



(l) Anomalia magnética de um cubo; Inclinação magnética de 15°e declinação de 45°, campo magnético de 22789 nT e profundidade do corpo de 250m; (m) Resposta do ASA para a anomalia em (l)

Já observando (b) e (h), é notória a influência da inclinação magnética perante os resultados. A figura (b) mostra o resultado para um modelo com inclinação maior que o da figura (h), mostrando que em diferentes inclinações, as repostas provenientes do ASA irão mudar. Analisando as figuras (b) e (f), podemos mostrar que o formato da anomalia gerada pelo ASA é dependente da declinação magnética.

Quando adicionamos remanescência aos modelos, seus resultados também nos comprovam a dependência em relação a este parâmetro. É possível analisar esta característica através de duas comparações: entre os resultados (b) e (d), que possuem parâmetros iguais de declinação e inclinação, porém o primeiro (b) não possui magnetização remanescente e o segundo (d), possui, e entre (h) e (j), onde os valores de

declinação e inclinação são diferentes e (h) não possui magnetização remanescente e o (j) possui.

8. INSTABILIDADE DO FILTRO DE REDUÇÃO AO POLO

O filtro de Redução ao Polo é amplamente utilizado para posicionar os valores máximos da anomalia no centro do corpo, facilitando sua interpretação. Entretanto, a utilização deste filtro nas anomalias de regiões de baixa latitude magnética, consideradas por muitos autores como inclinação abaixo de +/-20°, não é viável.

Este filtro é instável em regiões de baixas latitudes, isto pode ser demonstrado a partir da equação 7 (Geosoft, 2001). Nestas condições, a inclinação (I) é baixa, considerada entre 0° e +/-20°, e o parâmetro (D - θ) próximo de +/- 90°, fazendo com que o denominador da fórmula seja muito próximo de zero, causando tal instabilidade. A equação 7, já apresentada no capítulo 3, possui o parâmetro *Ia* que representa a correção da amplitude empregada, onde seu valor padrão é de +/- 20.

Equação 7:
$$RTP = \frac{\left[\sin(I) - i\cos(I)\cos\left(D - \theta\right)\right]^2}{\left[\sin^2(Ia) + \cos^2(Ia)\cos^2(D - \theta)\right].\left[\sin^2(I) + \cos^2(I)\cos^2(D - \theta)\right]'}$$

onde, I=inclinação magnética, D=declinação magnética, Ia= fator de correção de amplitude e θ é a latitude polar.

Esta instabilidade na fórmula do filtro pode ser comprovada a partir da aplicação da redução ao polo em diferentes inclinações e aos poucos modificando o fator de correção, mostrando que, quando instável, com mudanças no *Ia*, o resultado é modificado. Esta experiência é observada abaixo (figuras 54 a 60), onde o RTP é aplicado em modelos sintéticos de dois cubos com diferentes inclinações magnéticas, todos sem declinação, sem magnetização remanescente e parâmetros geométricos idênticos (tabelas 4 e 5).

	C1	C2
Largura (m)	1000	1000
Comprimento (m)	1000	1000
Espessura (m)	1000	1000
Profundidade do topo (m)	100	200

Tabela 4: Parâmetros geométricos para a criação do modelo

Susceptibilidade (SI)	0.2
Declinação magnética (em graus)	0
Intensidade do campo magnético (nT)	23000
Magnetização Induzida (A/m)	3.66
Magnetização Remanescente (A/m)	0

Tabela 5: Parâmetros magnéticos do modelo

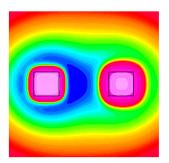


Figura 53: Anomalia de dois cubos no polo

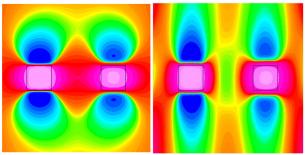


Figura 54: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 10° (a) Ia de 80°; (b) Ia de 20°

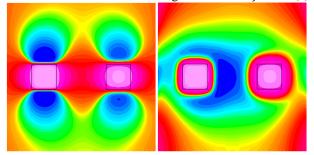


Figura 55: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 20° (a) Ia de 70° ; (b) Ia de 20°

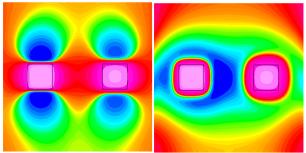


Figura 56: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 30° (a) Ia de 60°; (b) Ia de 20°

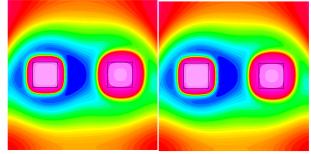


Figura 57: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 45° (a) Ia de 45°; (b) Ia de 20°

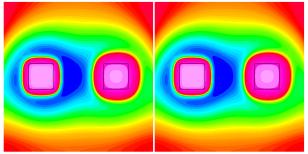


Figura 58: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 60° (a) Ia de 30°; (b) Ia de 20°

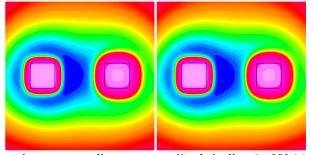


Figura 59: RTP resultante de uma anomalia em uma região de inclinação 80° (a) Ia de 10°; (b) Ia de 20°

Analisando os resultados acima, é possível concluir que o filtro é instável até valores de inclinação próximos a 30°, onde a utilização de fatores de correção (Ia) diferentes, resultam em respostas diferentes. Quando o filtro é aplicado a dados com inclinações médias a altas, é notável sua estabilidade. Mesmo com valores de *Ia* diferentes, seus resultados são muito parecidos, provando que sua utilização é mais precisa em regiões de médias (entre 30° e 60° de inclinação) e altas latitudes (entre 60° a 90° de inclinação).

Para melhor ilustrar esta questão, na figura 61 a seguir, podemos definir a faixa de inclinações de 30° a -30°, hachurada em preto, onde o filtro de redução ao polo se torna instável.

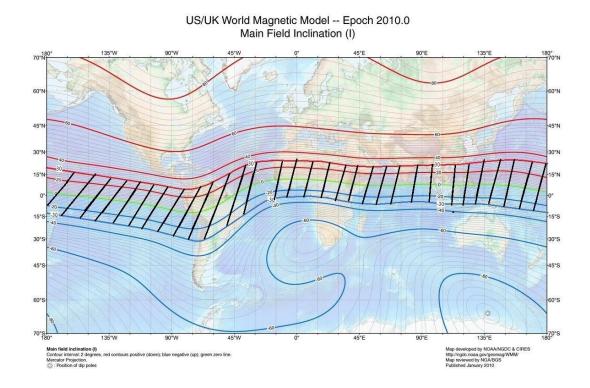


Figura 60: Mapa representando, na área hachurada em preto, a faixa de latitude e inclinações onde a aplicação do filtro de redução ao polo é instável. (fonte: http://www.ngdc.noaa.gov)

9. RESULTADOS EM DADOS REAIS

Depois de estudar todos os filtros aplicados aos dados de modelos sintéticos, aplicaremos agora tais métodos a dados reais. Os dados utilizados são da área de Santa Terezinha, localizados no estado de Goiás, Brasil, na região do Município de Mara Rosa (figura 62).

Nesta região, predominam terrenos ortognáissicos dispostos entre sequências vulcano-sedimentares supracrustais (Fuck et al. 1994). São encontradas nesta região rochas magmáticas e rochas metamorfizadas com altos valores de susceptibilidades magnéticas.

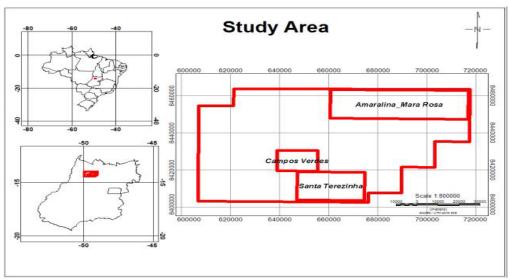


Figura 61: Localização da área de Santa Terezinha (fonte: Barbosa, 2013)

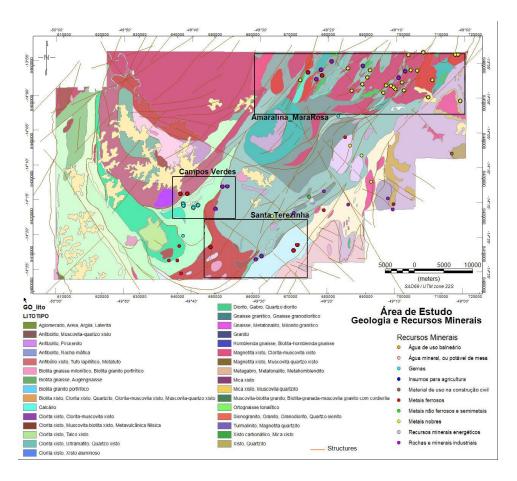


Figura 62: Mapa Geológico da região de Goiás e em destaque a área de Santa Terezinha abaixo (fonte: Barbosa, 2013)

Os parâmetros magnéticos da região são os mesmos utilizados no modelo sintético 2, com a intensidade do campo magnético de 23843 nT, inclinação de -17.9° e declinação de -19,5°. Foram aplicados todos os filtros discutidos até agora neste trabalho. A seguir, poderemos analisar os resultados de cada filtro em tais dados.

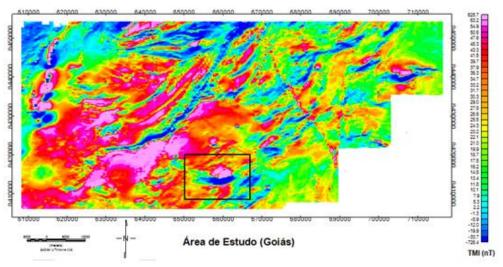


Figura 63: Mapa de Anomalia Magnética de uma área na região de Goiás e em destaque a região de estudo de Santa Terezinha

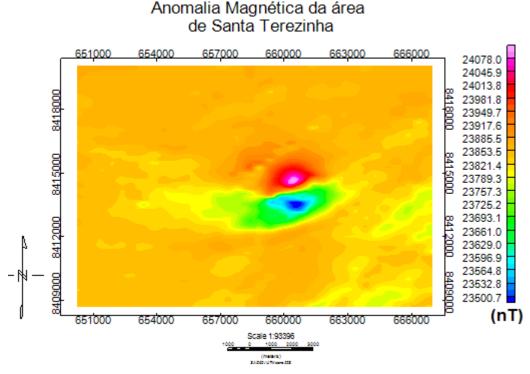


Figura 64: Mapa de anomalia magnética na região de Santa Terezinha

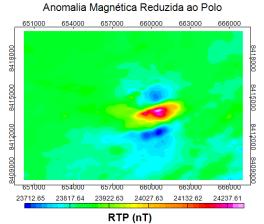


Figura 65: Mapa de anomalia Magnética Reduzida ao Polo

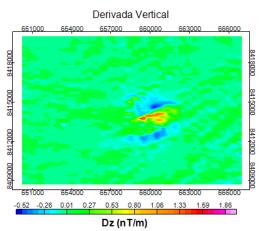


Figura 67: Derivada Vertical da anomalia magnética reduzida ao polo da região de Santa Terezinha

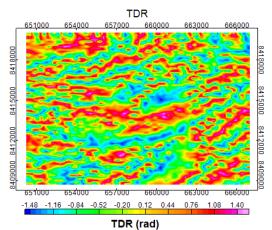


Figura 66: Inclinação do sinal analítico da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

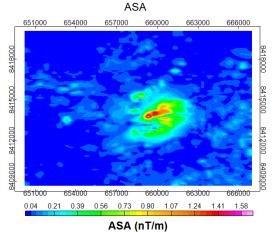


Figura 68: Amplitude do sinal analítico da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

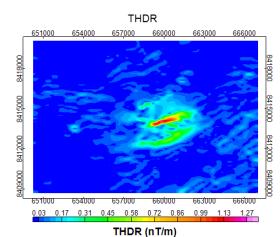


Figura 69: Gradiente Horizontal Total da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

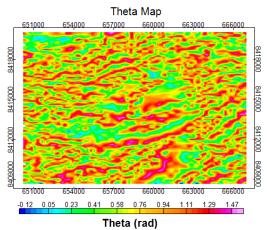


Figura 70: Theta Map da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

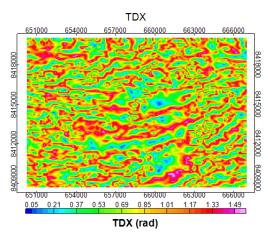


Figura 71: TDR THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

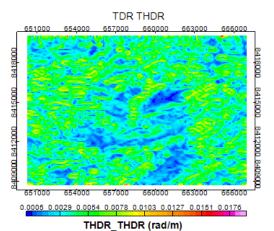


Figura 72: TDR THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

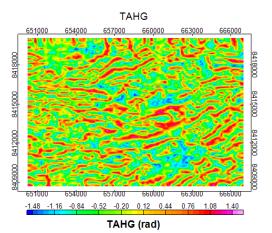


Figura 73: TAHG da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

É notório que cada filtro destaca diferentes tipos de feições. Analisando os resultados dos filtros TDR, Dz, ASA e THDR é possível observar uma maior homogeneidade sobre a anomalia, já os filtros Theta Map, TDX, TDR_THDR e TAHG produzem respostas que destacam feições e estruturas mais detalhadamente, mostrando tendências em relação à direção do contraste de susceptibilidade.

É interessante comparar alguns filtros em um mesmo mapa para entender sua eficácia em destacar as bordas dos corpos existentes nesta região. Foi feita a sobreposição das anomalias filtradas com todos os métodos analisados até aqui, juntamente com os resultados do filtro de redução ao polo.

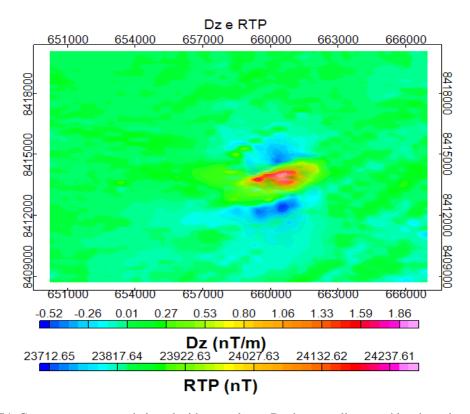


Figura 74: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o Dz da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

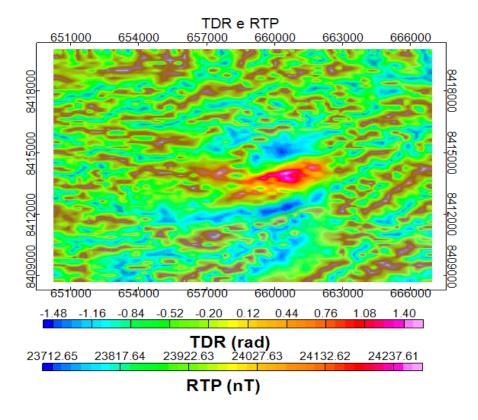


Figura 75: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

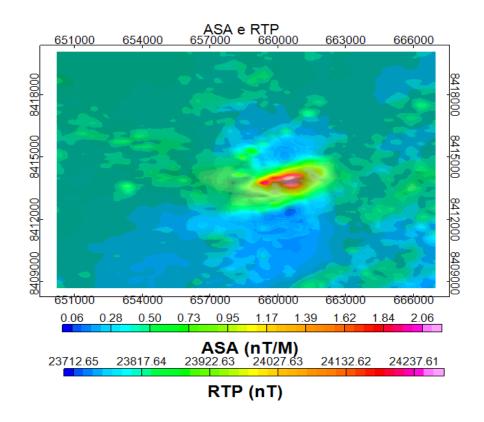


Figura 76: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o ASA da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

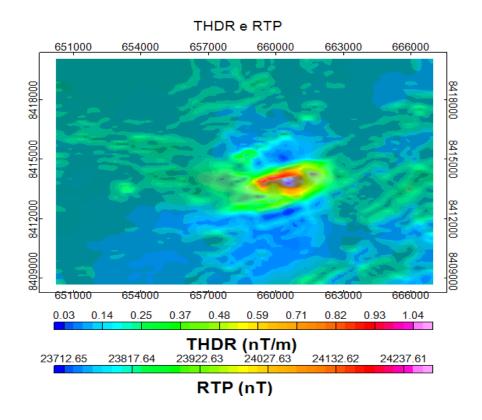


Figura 77: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

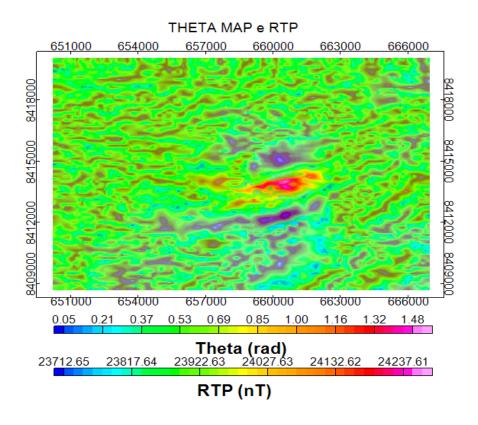


Figura 78: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o Theta Map da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

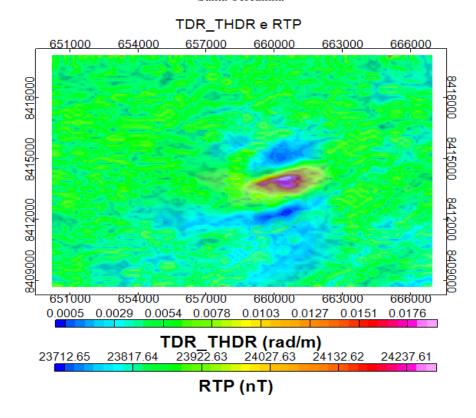


Figura 79: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDR_THDR da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

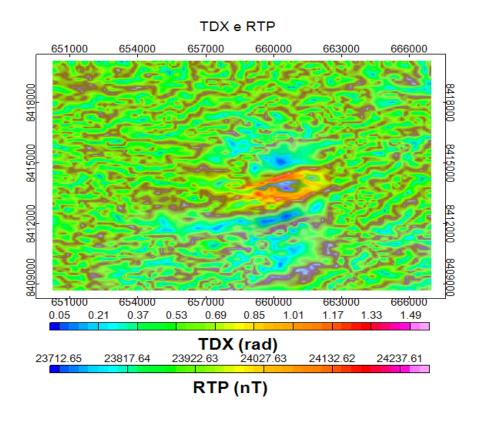


Figura 80: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TDX da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

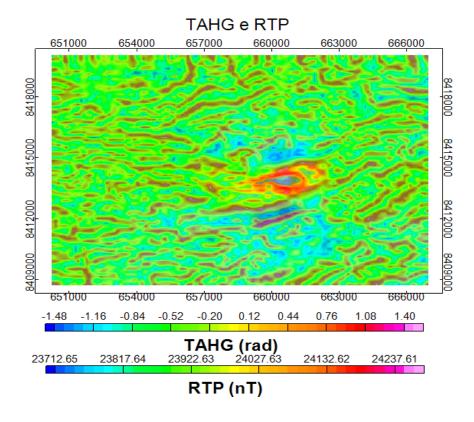


Figura 81: Comparação entre o dado reduzido ao polo e o TAHG da anomalia magnética da região de Santa Terezinha

Com a comparação dos resultados destes quatro filtros, podemos analisar que os filtros TDX e TAHG destacam corpos e estruturas com lineamento. Como visto nos modelos sintéticos, estes filtros destacam as bordas e estas podem ser vistas nos mapas das figuras 81 e 82, respectivamente, como as cores mais fortes destacadas, que, quando comparadas com o mapa reduzido ao polo, consegue-se marcar bem os contornos, estruturas menores sobressaíram dentro da anomalia e foi destacada uma continuidade lateral da susceptibilidade magnética do corpo, mostrando lineamentos que não eram possíveis de serem interpretados analisando os outros filtros.

Analisando as figuras 76 e 77, observa-se que o TDR e o ASA fizeram com que a anomalia ficasse homogênea, dificultando a interpretação de feições mais detalhadas do corpo.

10. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados filtros de resolução espacial, alguns com a finalidade de destaque de bordas de corpos anômalos. O objetivo de comparação dos resultados destes filtros foi alcançado, chegando à conclusão de que alguns resultados possuem limitações, como por exemplo a atenuação da amplitude do sinal com a profundidade. O filtro TAHG (Inclinação do Sinal Analítico do Gradiente Horizontal Total), desenvolvido por Ferreira et al. (2013) destacou, com picos de anomalia máxima, regiões bem próximas do corpo anômalo e não atenuou a amplitude do sinal para corpos mais profundos. Logo, os resultados para fontes mais profundas possuem amplitude do sinal tão alta quanto as fontes mais rasas. O TAHG foi também menos susceptível a ruídos quando comparados a outros filtros. Este método foi aplicado a dados sintéticos de magnetometria e gravimetria e a dados magnetométricos reais, e em ambos foram obtidos bons resultados. Analisando todo este conjunto, o filtro que obteve melhores resultados foi o TAHG, entretanto, pelo fato de destacar melhor as bordas quando o dado está reduzido ao polo, o TAHG possui limitações em baixas latitudes.

Assim como Li (2006) havia comprovado, também foi confirmado que os resultados da aplicação do filtro de Amplitude do Sinal Analítico são dependentes da inclinação e declinação da magnetização remanescente e do campo magnético total, inclusive da intensidade deste último.

Em relação ao filtro de Redução ao Polo, este é realmente instável em regiões de baixa latitude, onde a inclinação é baixa, geralmente entre o intervalo de -30° a +30°. Esta instabilidade é comprovada através de sua fórmula já que, em baixas latitudes, seu denominador se aproxima de zero, causando uma singularidade na expressão, logo, causando tal instabilidade.

Com esta monografia, foi possível ter melhor entendimento acerca do tema de filtros de resolução espacial e de detecção de borda, bem como um melhor aprendizado prático em relação ao processamento de dados potenciais.

11. BIBLIOGRAFIA

BARANOV, V., 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. Geophysics, 22, 359383.

BARBOSA, R.D., PEREIRA, J.G, 2013. Inversão 3D de dados Magnéticos na Região de Mara Rosa – Goiás, Brasil, utilizando Geosoft VOXI. 13° Congresso Internacional da SBGf.

BLAKELY, R. J., 1996. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. Cambridge University Press. 464 p.

COOPER GRJ & COWAN DR. 2006. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. Computers & Geosciences, 32(10):1585-1591.

COOPER, G. R. J.; COWAN, D. R., 2008. **Edge enhancement of potential field data using normalized statistics.** Geophysics. vol. 73, no. 3, H1–H4

CORDELL L & GRAUNCH VJS. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico. Hinze WJ (ed). The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomalies Maps. Society of Exploration Geophysicists, p.181-197.

FERREIRA, F.J.F.; SOUZA, J. DE; BONGIOLO, A.B.S.; CASTRO, L.G. DE; ROMEIRO, M.A.T., 2010. Realce do gradiente horizontal total de anomalias magnéticas usando a inclinação do sinal analítico. Parte I – Aplicação a dados sintéticos. IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. Brasília-DF.

FERREIRA, F.J.F.; SOUZA, J. DE; BONGIOLO, A.B.S.; CASTRO, L.G., 2013. Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using tilt angle. GEOPHYSICS. vol. 78, issue 3, pp. J33-J41

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M.M.; SILVA. J.H.D. 1994. Compartimentação Tectônica na Porção Oriental da Província Tocantins. Anais 38° Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú, SBG, 1 p.215-216

GEOSOFT. 2001. **Magmap – 2D Frequency Domain Processing**. Geosoft Technical Note, 34 p.

LI, X., 2006. **Understanding 3D analytic signal amplitude**. Geophysics, vol. 71, no. 2, B13–B16.

MILLER, H.G.; SINGH, V., 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. Journal of Applied Geophysics. 32(2-3): 213–217.

NABIGHIAN, M. N., 1972. The analytical signal of 2D magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. Geophysics. vol. 37, 507–517

NABIGHIAN MN. 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. Geophysics, 39(1): 85-92.

NETO, J. A.S.; FERREIRA, J. F. F.; SILVA, A. B., 2007. **Mapa magnético parcial do Fanerozóico do estado do Paraná**. X Congresso Internacional da SBGF.

OPPENHEIM, A.V., SCHAFER, R.W., 1999. **Discrete-Time Signal Processing. 2nd Edition.** Prentice Hall Signal Processing Series.

ROEST, W. R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M., 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. Geophysics. vol. 57, 116–125

VERDUZCO, B.; FAIRHEAD, C.; GREEN, C.; MACKENZIE, C., 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The Leading Edge. 23:116-119

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E.; KEYS, D.A., 1976. **Applied Geophysics**. Cambridge. Cambridge University Press. 860 p.

WIJNS, C.; PEREZ, C.; KOWALCZYK, P., 2005. **Theta map: Edge detection in magnetic data.** Geophysics. vol. 70, no. 4, L39–L43