



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ALGORITMO PARA O CÁLCULO
DO TENSOR GRADIENTE
GRAVIMÉTRICO COM APLICAÇÃO
À PROSPECÇÃO MINERAL NO
DEPÓSITO ANGICO, BAHIA

DANIEL CONCEIÇÃO DOS SANTOS

SALVADOR – BAHIA

Abril – 2016

**Algoritmo para o cálculo do tensor gradiente gravimétrico com aplicação à
prospecção mineral no depósito Angico, Bahia**

por

DANIEL CONCEIÇÃO DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos

Co-orientador: Geólogo MSc. Florivaldo Oliveira Sena

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora

Prof^a. Dr^a. Alanna Costa Dutra

Prof. Dr. Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos

Prof. Dr. Edson Emanuel Starteri Sampaio

Data da aprovação: 27/04/2016

À minha mãe, com carinho!

RESUMO

Este trabalho objetiva extrair o maior número de informação do dado geofísico de gravimetria com o menor dispêndio financeiro possível. Sendo assim, foi escrito um algoritmo em linguagem Fortran para o cálculo do tensor gravimétrico a partir de levantamentos convencionais, onde se mede apenas a componente vertical da gravidade. Desta forma, levantamentos anteriores à tecnologia dos gradiômetros podem ser re-processados e re-interpretados, extraindo maiores informações dos dados gravimétricos e explorando todas as componentes tensoriais que ajudam na definição dos limites e formas dos corpos fontes das anomalias, sem custos adicionais. A eficiência do algoritmo foi avaliada ao comparar sua resposta á resposta de um modelo sintético gerado pelo Potensoft (software em linguagem Matlab amplamente difundido). Posteriormente, esse algoritmo foi aplicado aos dados de gravimetria cedidos pela Mineração Caraíba, relativos à área da Fazenda Angico, no norte da Bahia. Como produto, foram gerados seis mapas contendo as componentes U_{xx} , U_{xy} , U_{xz} , U_{yy} , U_{yz} e U_{zz} do tensor, suas interpretações e correlações com a geologia do local. Os resultados mostram que os corpos mineralizados são melhores identificados pelas componentes gradiométricas. Os corpos de Lagoa da Mina e Cercado Velho, identificados pela gradiometria, podem ser parte de um mesmo complexo máfico-ultramáfico em profundidade. As componentes tensoriais ajudam na definição da continuidade dos corpos e na interpretação de falhas e estruturas que cortam as mineralizações.

ABSTRACT

This paper aims to extract more data information geophysicist gravimetric with the lowest possible financial expenditure. Thus, an algorithm was written in Fortran for calculating the gravity tensor from conventional surveys, where only measures the vertical component of gravity. Thus, previous surveys the technology gradiometers can be re-processed and re-interpreted by extracting more information from gravimetric data and exploring all the tensorial components that help in defining the limits and forms of the body sources of anomalies at no extra charge. The algorithm efficiency was evaluated by comparing its response to the response of a synthetic model generated by Potensoft (software in widespread Matlab language). Subsequently, the algorithm was applied to the gravimetric data donated by Minerção Caraíba, for the area of Angico farm in northern Bahia. As a product, were generated six maps containing the components U_{xx} , U_{xy} , U_{xz} , U_{yy} , U_{yz} and U_{zz} of tensor, their interpretations and correlations with the geology of the site. The results show that the mineralized bodies are best identified by gradiométricas components. The Lagoa da Mina and Cercado Velho, bodies identified by gradiometry can be part of the same mafic-ultramafic complex in depth. The tensor components help in defining the continuity of bodies and interpretation of faults and structures that cut the mineralization.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Fundamentos teóricos e matemáticos	2
1.1 Campo e Potencial Gravitacional	2
1.2 Tensor Gradiente Gravimétrico	3
1.3 Transformadas de Fourier	5
1.3.1 Transformadas de Fourier de uma função contínua	5
1.3.2 Transformada discreta de Fourier	6
1.3.3 Derivadas direcionais no espaço das Transformadas de Fourier	7
CAPÍTULO 2 Geologia	9
2.1 Histórico das pesquisas do cobre no Vale do Curaçá (Bahia)	9
2.2 Geologia Regional	11
2.3 Geologia local	14
CAPÍTULO 3 Desenvolvimento e Validação do algoritmo a partir de modelo sintético.	20
3.1 Modelo sintético e cálculo dos tensores em ambiente Matlab	21
3.2 Cálculo dos tensores utilizando o algoritmo Fortran.	23
3.2.1 Fluxograma para o cálculo de U_{zz}	23
3.2.2 Fluxograma para o cálculo das componentes U_{xx} , U_{xy} e U_{yy}	23
3.2.3 Fluxograma para o cálculo das componentes U_{zx} e U_{zy}	24
3.3 Avaliação do algoritmo Fortran.	25
CAPÍTULO 4 Aquisição e processamento dos dados de gravimetria	26
4.1 Obtenção e correção dos dados gravimétrico	26
CAPÍTULO 5 Resultados e Discussões	33

CAPÍTULO 6	Conclusões	51
	Agradecimentos	52
APÊNDICE A	Códigos Fortran	55
	A.1 Códigos para o cálculo das componentes do tensor gradiométrico.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Massas m e m_o separadas por uma distância r . \hat{r} é um vetor unitário apontando de m para m_o	2
1.2	Componentes do campo gravitacional.	4
1.3	Componentes do Tensor gradiente gravimétrico.	4
2.1	Posição relativa dos blocos antes das colisões paleoproterozóicas. Fonte: Modificada de Barbosa e Sabaté, (2002).	11
2.2	Mapa geológico simplificado da Bahia, mostrando as principais unidades geotectônicas. Fonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Sistema de informações geográficas - SIG. Brasília: CPRM, 2004. 41 CD-ROMs. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, IGBA – Informações Geológicas e de Recursos Minerais do Estado da Bahia: CBPM 30 anos; passo a passo como progresso da Bahia. Salvador, 2003 (CD-ROM).	13
2.3	Mapa geológico simplificado do segmento norte do Cinturão Móvel Salvador - Curaçá, mostrando a faixa que corresponde ao Vale do rio Curaçá (Fonte: Teixeira, et al., 2010).	14
2.4	Mapa geológico simplificado do vale do rio Curaçá, mostrando as áreas de ocorrência de corpos máfico-ultramáficos. Modificado de Delgado e Souza (1975).	16
2.5	Mapa do rio Curaçá. Em 1, temos a região da fazenda Angico e os alvos Cercado Velho e Lagoa da Mina. Modificado de Delgado e Souza (1975). . .	17
2.6	Mapa geológico simplificado da Região de Angico. Ao Norte, temos o corpo associado à Lagoa da Mina, e ao sul, os corpos associados a Cercado Velho. Fonte: Mineração Caraíba.	19
3.1	Vista em três dimensões do paralelepípedo.	21
3.2	Vista do corpo (paralelepípedo) no plano xy.	21
3.3	Anomalia Bouguer e suas correspondentes componentes do tensor gravimétrico obtidas no Potensoft.	22
3.4	Anomalia Bouguer e suas correspondentes componentes do tensor gravimétrico obtidas no Fortran.	25
4.1	Linhas do levantamento gravimétrico de Lagoa da Mina.	27
4.2	Linhas do levantamento gravimétrico de Cercado Velho.	27
4.3	União das linhas do levantamento gravimétrico da fazenda Angico.	28

4.4	Malha resultante da correção das malhas de Cercado Velho e Lagoa da Mina, e eliminação dos seu dados espúrios.	30
4.5	Mapa da anomalia Bouguer dos alvos. Em 1, temos a resposta gravimétrica sobre o alvo Lagoa da Mina, e em 2, sobre o alvo Cercado Velho.	32
5.1	Mapa da componente U_{xx} . As regiões de baixo valor gradiométrico, em azul, mostram os limites leste-oeste de corpos em Lagoa da Mina e em Cercado Velho, regiões 1, 2 e 3.	34
5.2	Mapa da componente U_{xy} . Esta componente destaca as estruturas com direção NW-SE e NE-SW.	35
5.3	Mapa da componente U_{zx} . As regiões delimitadas em 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem ao centro de massa, na direção norte-sul, de corpos da região.	36
5.4	Mapa da componente U_{yy} . As regiões limitadas por 1 correspondem ao limite norte-sul do corpo em Lagoa da Mina, e as limitadas por 2 e 3, aos limites de corpos em Cercado Velho.	37
5.5	Mapa da componente U_{zy} . A região em 1 corresponde ao centro de massa do corpo em Lagoa da Mina, e as regiões 2, 3 e 4 correspondem ao centro de massa de corpos em Cercado Velho.	38
5.6	Mapa da componente U_{zz} . As regiões enumerada de 1 até 7 correspondem a possíveis corpos mineralizados, identificados pelo algoritmo.	39
5.7	Mapa geológico simplificado da Região de Angico com as estruturas interpretadas a partir das componentes do tensor.	41
5.8	Mapa geológico simplificado da Região de Angico sobreposto ao mapa de anomalia Bouguer. Ao Norte temos a anomalia Bouguer associada ao corpo Lagoa da Mina. Ao sul, em Cercado Velho, a zona mineralizada está a oeste da anomalia gravimétrica e parece não ser identificada pelo levantamento. As regiões enumeradas de 1 até 7 são possíveis localidades mineralizadas identificadas pela componente U_{zz} do tensor, como na figura 5.6.	42
5.9	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{xx} . Na parte norte, o corpo Lagoa da Mina coincide com a zona mineralizada e mostra o corpo se estendendo para sul da zona conhecida. Na parte sul, no alvo Cercado Velho, os valores baixos da componente U_{xx} coincidem com a zona mineralizada identificada pelos furos FCV-49 e FCV-43.	43
5.10	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{xy} . Tal componente é útil, principalmente, na identificação de estruturas NW-SE e NE-SW.	44
5.11	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{zx} . Na figura, podemos ver a correlação entre o centro de massa calculado e os corpos da região.	45

5.12	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{yy} . O valores baixos de gradiometria, região em azul no mapa, estão associados aos corpos do alvo Angico. Tal componente é útil na identificação de estruturas E-W.	46
5.13	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{zy}	47
5.14	Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{zz} . Observe que as regiões assinaladas em 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 correspondem a corpos discretizados, possivelmente mineralizados, pelo cálculo desta componente.	48

INTRODUÇÃO

Nos levantamentos gravimétricos, a geologia da subsuperfície é investigada com base nas variações do campo gravitacional causadas por diferenças de densidade das rochas. Os gravímetros são instrumentos utilizados nas medidas em campo para determinar o valor da gravidade. Os gravímetros são basicamente balanças de mola carregando uma massa constante. Variações no peso da massa causadas pelas variações na gravidade fazem variar o comprimento da mola e dão uma medida da mudança da gravidade. Os gravímetros, efetivamente, respondem apenas à componente vertical da atração gravitacional de uma massa anômala (Brooks et al., 2009), sendo insensíveis às bordas dos corpos, não contendo nenhuma informação da geometria da fonte (Bell et al., 1997).

Sendo a gravidade um vetor, diversos autores (Bell, 1998; Saad, 2006) observaram e relataram a importância e utilidade das outras componentes da gravidade, alguns deles demonstrando que essas componentes e suas derivadas (gradientes gravimétricos) permitem determinar o campo da gravidade com maior resolução, mostrando as bordas, a forma e o centro de massa dos corpos. Estes dados adicionais, extraídos da gradiometria, encontram ampla aplicação em programas de exploração mineral e em exploração de petróleo e gás, onde é necessário o melhor entendimento das estruturas e das zonas mineralizadas.

Atualmente, empresas como a Bell Geospace e a Falcon junto com a U.S.Navy, têm desenvolvido com muito sucesso, medições dos tensores do campo gravitacional (FTG - Full Tensor Gravity), e empresas de mineração, como a Vale, vêm utilizando esse método para melhorar a interpretação dos seus alvos.

Este trabalho objetiva o emprego da técnica de cálculo dos tensores de gravidade a partir de levantamentos gravimétricos comuns, ou seja, naqueles em que foram medidas apenas a componente vertical da gravidade. Assim, foi escrito um código em linguagem Fortran e aplicado a dados reais de levantamentos feitos pela Mineração Caraíba, na região do município de Jaguarari, sobre os alvos Lagoa da Mina e Cercado Velho, ambos localizados na fazenda Angicos, possibilitando um entendimento maior da geometria e mineralização desses corpos.

CAPÍTULO 1

Fundamentos teóricos e matemáticos

1.1 Campo e Potencial Gravitacional

A intensidade da força de atração gravitacional entre duas partículas é expressa pela lei da gravitação universal formulada por Isaac Newton em 1687. Em coordenadas cartesianas (figura 1), a magnitude da força gravitacional mútua entre uma partícula de massa m centrada no ponto $Q = (x', y', z')$ e uma partícula de massa m_o centrada em $P = (x, y, z)$ é dada por:

$$F = \frac{Gmm_o}{r^2}, \quad (1.1)$$

onde

$$r = [(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

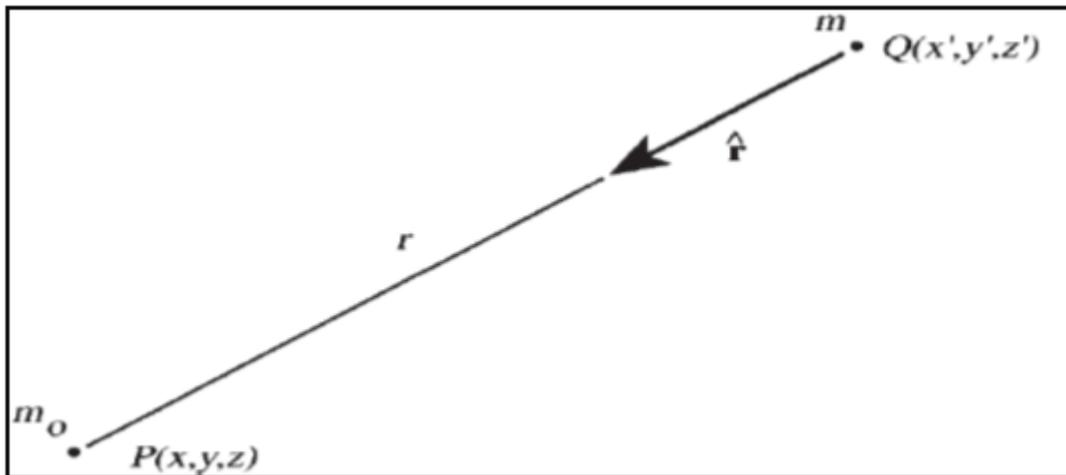


Figura 1.1: Massas m e m_o separadas por uma distância r . \hat{r} é um vetor unitário apontando de m para m_o .

e G é a constante gravitacional universal ($G = 6,6732 \times 10^{-11} m^3 kg^{-1} s^{-2}$).

Se m_o é uma partícula de prova, então dividindo a força gravitacional por m_o , encontraremos o campo gravitacional \vec{g} produzido por m no local da partícula de prova:

$$\vec{g}(P) = -G\frac{m}{r^2}\hat{r}. \quad (1.3)$$

Onde \hat{r} é um vetor unitário apontando da massa m para o ponto de observação P.

O campo gravitacional, como descrito pela equação (1.3), é um campo irrotacional, ou seja,

$$\nabla \times \vec{g} = 0. \quad (1.4)$$

Assim, pelo teorema de Helmholtz e sendo a gravidade um campo conservativo, ela pode ser representada como o gradiente de um potencial escalar,

$$\vec{g}(P) = \nabla U(P), \quad (1.5)$$

onde

$$U(P) = \frac{Gm}{r}. \quad (1.6)$$

A função U é chamada Potencial Gravitacional.

Quando o campo gravitacional é calculado na região externa à fonte, o potencial é uma solução da equação de Laplace, ou seja,

$$\nabla^2 U = 0 \quad (1.7)$$

1.2 Tensor Gradiente Gravimétrico

De acordo com a equação (1.5), o campo gravitacional pode ser expresso em termos das suas três componentes:

$$G_x = \frac{\partial U}{\partial X} \quad (1.8)$$

$$G_y = \frac{\partial U}{\partial Y} \quad (1.9)$$

$$G_z = \frac{\partial U}{\partial Z} \quad (1.10)$$

Essas componentes representam as variações do campo nas direções x, y e z, como representado na figura 1.2

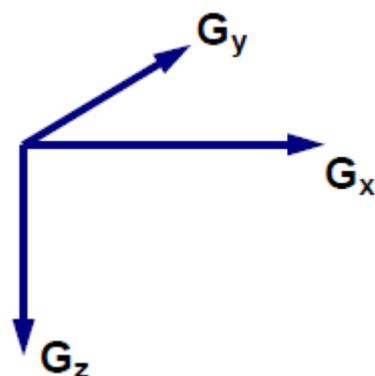


Figura 1.2: Componentes do campo gravitacional.

Cada uma dessas componentes pode apresentar variações em relação aos três eixos. O tensor gradiente gravimétrico é constituído pelas variações das componentes do campo gravitacional em cada direção, como mostra a figura 1.3.

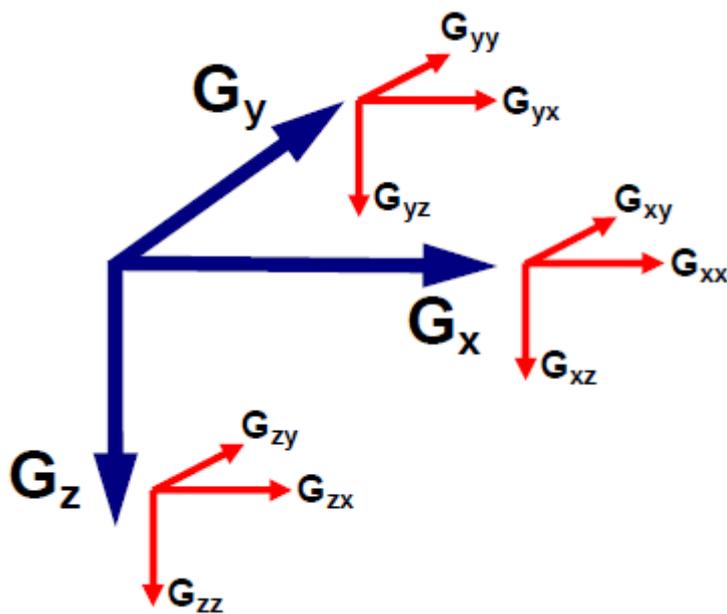


Figura 1.3: Componentes do Tensor gradiente gravimétrico.

As variações das componentes do campo gravitacional, o tensor, são dadas pelas derivadas de cada componente em relação às direções x , y e z , seja,

$$G_{ij} = \begin{bmatrix} G_{xx} = \frac{\partial G_x}{\partial X} & G_{xy} = \frac{\partial G_x}{\partial y} & G_{xz} = \frac{\partial G_x}{\partial z} \\ G_{yx} = \frac{\partial G_y}{\partial X} & G_{yy} = \frac{\partial G_y}{\partial y} & G_{yz} = \frac{\partial G_y}{\partial z} \\ G_{zx} = \frac{\partial G_z}{\partial X} & G_{zy} = \frac{\partial G_z}{\partial y} & G_{zz} = \frac{\partial G_z}{\partial z}, \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

com i e $j = x, y$ e z .

As componentes que formam a diagonal principal do tensor correspondem a:

$$G_{xx} = \frac{\partial G_x}{\partial X} \quad (1.12)$$

$$G_{yy} = \frac{\partial G_y}{\partial y} \quad (1.13)$$

$$G_{zz} = \frac{\partial G_z}{\partial z} \quad (1.14)$$

A soma dessas componentes correspondem ao Laplaciano do potencial, que é nulo no exterior das massas atrativas, ou seja,

$$G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} = \nabla^2 U = 0. \quad (1.15)$$

1.3 Transformadas de Fourier

1.3.1 Transformadas de Fourier de uma função contínua

Seja $f(x)$ uma função contínua de variável real x . De acordo com Amidror (2000), sua Transformada de Fourier, $F(K)$, é dada por:

$$F(K) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i2\pi Kx} dx. \quad (1.16)$$

E sua transformada inversa dada por:

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(K)e^{i2\pi Kx} dK. \quad (1.17)$$

Onde x pode representar uma quantidade tal como distancia, tempo e etc. A variável K representa uma frequência, e é mensurada em termos de ciclos por unidade de x , tal como, ciclo por metro, ciclo por segundo e etc.

Em uma definição alternativa e igualmente válida, tal como em Blakely (1996), o par de transformadas é dado por:

$$F(W) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-iWx} dx \quad (1.18)$$

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(W)e^{ikx} dW \quad (1.19)$$

Onde $W = 2\pi K$.

Para o caso de duas dimensões, a partir das equações 1.16 e 1.17 as transformadas direta e inversa são dadas, respectivamente, por:

$$F(k_x, k_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)e^{-i2\pi(K_x x + K_y y)} dx dy \quad (1.20)$$

e

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(K_x, K_y)e^{i2\pi(k_x x + k_y y)} dK_x dK_y \quad (1.21)$$

onde k_x e k_y são os números de onda nas direções x e y respectivamente.

1.3.2 Transformada discreta de Fourier

As Transformadas de Fourier como descritas no item anterior são válidas para funções contínuas. Entretanto, nos levantamentos geofísicos o que temos são amostras pontuais de determinada propriedade física do meio. Assim, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) é o instrumento matemático adequado ao tratamento desses dados amostrados.

Considere uma sequência de N amostras de $f(x_j)$ tomadas em j pontos separados por uma distância fixa Δx . Assim, a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e sua inversa (ITDF) são dadas, respectivamente, por:

$$F(K_n) = \sum_{j=0}^{N-1} f(x_j)e^{-ix_j K_n} \quad (1.22)$$

com $n = 0, \dots, N - 1$

$$f(x_j) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(K_n) e^{ix_j K_n} \quad (1.23)$$

com $j = 0, \dots, N - 1$.

Onde $x_j = j\Delta x$ e $K_n = \frac{2\pi n}{N\Delta x}$ é a n -ésima amostra de frequência medida em radiano por unidade de x .

Para o caso de duas dimensões as transformadas direta e inversa, respectivamente, são dadas por:

$$F(k_x, k_y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-i2\pi(K_x x + K_y y)/N} \quad (1.24)$$

com $K_x, K_y = 0, \dots, N - 1$

$$f(x, y) = \sum_{K_x=0}^{N-1} \sum_{K_y=0}^{N-1} F(k_x, k_y) e^{i2\pi(K_x x + K_y y)/N} \quad (1.25)$$

com $x, y = 0, \dots, N - 1$

1.3.3 Derivadas direcionais no espaço das Transformadas de Fourier

Seja U_1 o potencial gravitacional observado no ponto $P_1(x, y, z)$, e seja U_2 o potencial observado no ponto $P_2(x, y, z - \Delta z)$. Da equação (1.10), temos que $\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} = g_z$. Sendo assim, usando a definição de derivada, temos,

$$\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{U(x, y, z) - U(x, y, z - \Delta z)}{\Delta z} \quad (1.26)$$

Aplicando a transformada em ambos os membros da equação e aplicando a propriedade da translação no domínio das transformadas, temos,

$$F \left[\frac{\partial U}{\partial z} \right] = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{F[U] - F[U]e^{-|k|\Delta z}}{\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-|k|\Delta z}}{\Delta z} F[U] = |k| F[U] \quad (1.27)$$

Assim,

$$F[U] = \frac{F[U_z]}{|k|}. \quad (1.28)$$

Onde

$$|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (1.29)$$

Assim, podemos encontrar o potencial gravitacional a partir da componente vertical da gravidade medida em campo.

Aplicando a Transformada de Fourier às equações 1.8 e 1.9, e tendo em vistas suas propriedades de diferenciação, temos:

$$F \left[\frac{\partial^n U}{\partial x^n} \right] = (ik_x)^n F[U] \quad (1.30)$$

$$F \left[\frac{\partial^m U}{\partial y^m} \right] = (ik_y)^m F[U] \quad (1.31)$$

Onde m é a ordem das derivadas.

Por consequência, teremos:

$$F \left[\frac{\partial^m}{\partial y^m} \frac{\partial^n U}{\partial x^n} \right] = (ik_x)^n (ik_y)^m F[U] \quad (1.32)$$

Assim, das equações 1.24, 1.25 e 1. 2.6, temos que;

$$U_{xy} = U_{yx}$$

$$U_{xz} = U_{zx}$$

$$U_{yz} = U_{zy}$$

Assim, das 9 componentes dos tensores, descritas em 1.11, devemos calcular apenas 5, $U_{xx}, U_{xy}, U_{xz}, U_{yy}$ e U_{yz} , uma vez que $U_{zz} = -U_{xx} - U_{yy}$.

CAPÍTULO 2

Geologia

2.1 Histórico das pesquisas do cobre no Vale do Curaçá (Bahia)

De acordo com Delgado e Souza (1975), as pesquisas no Vale do Curaçá, atual município de Jaguarari (BA), segue uma ordem histórica, como se segue.

1874 - Descoberta da mineralização do cobre na região de Caraíba pelo Engenheiro A.M. Bulhões.

1944/1946 - Primeiro trabalho executado na jazida de Caraíba, pelo Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM), através dos Engenheiros J.L. de Melo Jr, Nissim Castiel e E.B. Pouchain, que, fundamentados em poços, trincheiras e 480m de sondagem mediram 10.750.000t de minério a 1% de cobre e inferiram uma reserva de 39.380.000t de minério a 1% de cobre.

1952/1953 - A companhia Northfield Mining Inc. executou 18 furos de sonda e 10 trincheiras, ampliando os conhecimentos sobre o minério de Caraíba.

1960 - O Grupo Pignatari, na época concessionário da jazida, contratou a execução de furos de sondagem com a Cia T. Janer.

1959/1963 - Realização pelo DNPM de mais 35 furos, totalizando 3.550m de sondagem, sob supervisão dos Engenheiros O.P. Chaves e A.G. Campos, que baseados nesses elementos, mediram até a profundidade de 50m, 16.000.000t de minério a 1,2% de cobre.

1961/1964 - Compreendendo a importância da área do Vale do Curaçá o DNPM patrocinou trabalhos de prospecção geoquímica orientados por Lewis Jr. e mapeamento geológico básico executado pela PROSPEC com apoio técnico da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE).

1965 - O DNPM cria o Projeto Cobre do Vale do Curaçá que a principio foi executado através da GEOSOL e posteriormente pela CPRM, encerrando as pesquisas em 1973.

1965/1967 - O Grupo Pignatari, através da Mitsubishi Metal Mining Co., elaborou e executou um novo plano de sondagem, compreendendo 31 furos, dos quais 25 constituem

prolongamento daqueles anteriormente já executados, totalizando 4.626m de sondagem. Estes trabalhos permitiram uma ampliação considerável das reservas da jazida da Caraíba e um estudo interpretativo em seções geológicas dos corpos mineralizados.

1975 - A FIBASE assume o controle do jazimento da Caraíba e contrata a DOCEGEO para a condução das pesquisas geológicas na região.

1976 - O DNPM decide patrocinar, através da CPRM, a execução de 7 (sete) furos profundos, da ordem de 800 metros, sendo 2 (dois) destes no jazimento da Caraíba, para averiguar a extensão dos corpos de minério com a profundidade fornecendo elementos para a ampliação das reservas já conhecidas e dos recursos globais do Vale do Curaçá.

Através do "Projeto Cobre", entre outras conclusões, concluiu-se o levantamento geológico de todo o distrito cuprífero na escala 1:25.000 e estudou-se detalhadamente os dois depósitos de cobre abordados neste trabalho (Lagoa da Mina e Cercado Velho) elaborando-se o cálculo das suas reservas.

De acordo com Misi (2012), entre 1979 e 1986 a exploração comercial de cobre pela empresa estatal Caraíba Metais, foi realizada exclusivamente a céu aberto. Com o início da operação da mina subterrânea em 1986, a produção de cobre passou a ser obtida simultaneamente das duas minas, de onde já foram retiradas mais de 263,6 milhões de toneladas de rocha, sendo 83,6 milhões de minério com teor médio de 1,20% de cobre, que produziram cerca de 2,5 milhões de toneladas de concentrado de cobre com 863,9 mil toneladas de cobre contido. A mina subterrânea está localizada logo abaixo da mina a céu aberto, sendo uma continuidade do mesmo corpo geológico.

Em 1988, a então Caraíba Metais S.A. iniciou seu processo de privatização. Este resultou na cisão da companhia: de um lado, a Paranapanema S.A., sucessora legal da Caraíba Metais S.A., e, de outro, a Mineração Caraíba S.A., que continuou como empresa estatal até 27.01.1994, ano em que foi privatizada no âmbito do Programa Nacional de Desestatização, e assim permanece até os dias atuais.

2.2 Geologia Regional

O embasamento de rochas cristalinas do território baiano compõe-se de 4 blocos continentais arqueanos, formados entre 3.500 e 2.500 milhões de anos atrás, em diferentes regiões do planeta.

O Cráton do São Francisco no estado da Bahia é o resultado de colisões desses quatro segmentos crustais (Blocos Gavião, Jequié, Serrinha e Itabuna-Salvador-Curaçá), como ilustra a figura 2.1, ocorridos no final do Paleoproterozóico, justapondo terrenos arqueanos (Bloco Gavião, núcleos TTG, seqüência Contendas Mirante, Complexo Jequié, núcleo Serrinha, etc) e paleoproterozóicos (Grupo Jacobina, Greenstone Belts do Rio Itapicuru e Capim, etc.) através de grandes descontinuidades tectônicas. Essas colisões resultaram na formação de cinturões móveis polideformados, como o Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (Rabelo et al., 2008) onde se situa a área de estudo deste trabalho .

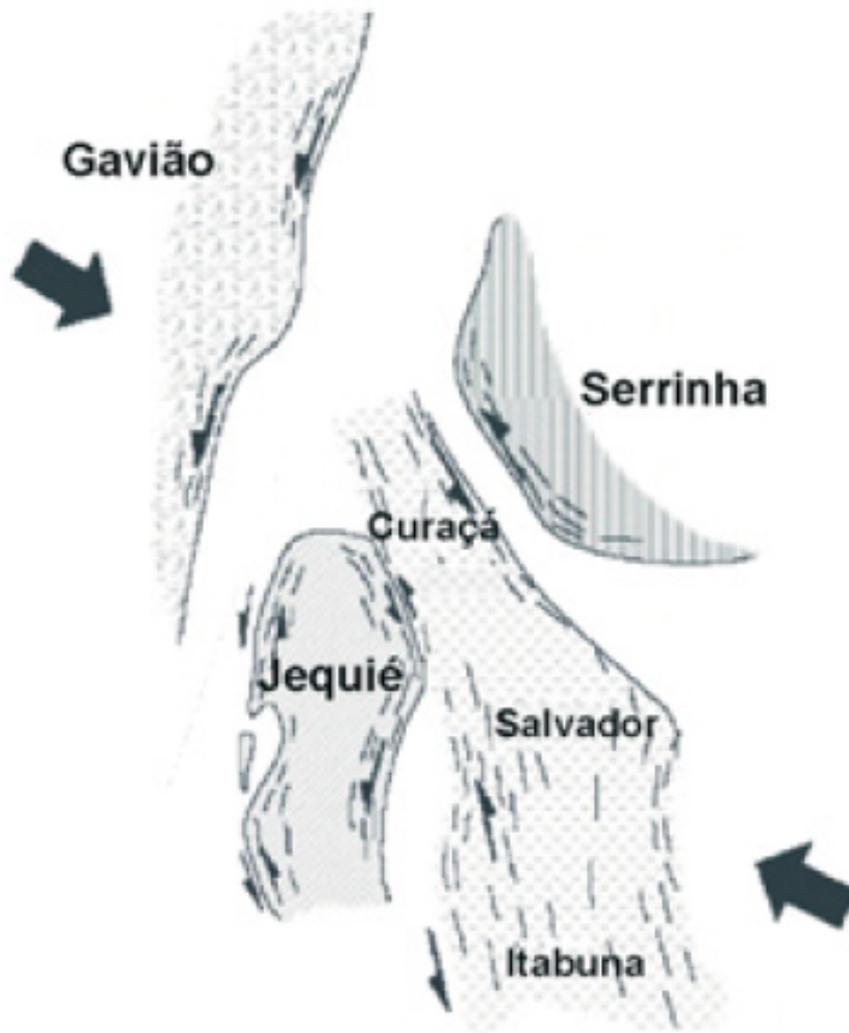


Figura 2.1: Posição relativa dos blocos antes das colisões paleoproterozóicas. Fonte: Modificada de Barbosa e Sabaté, (2002).

No cenário geotectônico da Bahia destaca-se como unidade maior a porção nordeste do Cráton do São Francisco, que ocupa cerca de 80% do substrato do Estado, sendo, em grande parte, circundada por faixas orogênicas que evoluíram principalmente durante o Neoproterozoico.

O embasamento do Cráton do São Francisco engloba vários complexos e associações litológicas metamorfizadas sob condições de baixo até alto graus, formados em diversos ambientes geotectônicos, desde o início do Mesoarqueano (3,2Ga) até o final do Paleoproterozoico (1,8Ga). Sobre esse embasamento instalaram-se bacias intracratônicas que hoje constituem coberturas, cujas idades se estendem desde o Mesoproterozoico até o Fanerozoico. Essas coberturas foram submetidas a processos metamórficos e deformacionais, geralmente de baixa intensidade. A área exposta do embasamento do Cráton do São Francisco representa em torno de 25% da superfície do Estado e hospeda a grande maioria do seu patrimônio mineral, como mostra a figura 2.2.

Dentro do território da Bahia encontra-se uma das maiores exposições contínuas de terrenos de alto grau metamórfico. Ela está distribuída ao longo de uma faixa com cerca de 700km de comprimento e largura variando entre 100-150km, que se estende desde o litoral sul até a região nordeste do Estado. Essa faixa, principalmente formada de rochas granulíticas e anfibolíticas de diversas composições e origens, é referida na literatura como cinturão granulítico, cinturão móvel, faixa móvel ou Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá (Misi, 2012).

Os trabalhos de diversos autores realizados neste importante segmento do embasamento do Cráton do São Francisco admitem que as unidades que compõem este cinturão podem constituir as raízes de um orógeno, que teria resultado da colisão paleoproterozoica de blocos tectônicos arqueanos. O segmento correspondente à parte do Cinturão Itabuna-Salvador foi estruturado na colisão dos blocos Jequié e do Gabão (África Ocidental). Por sua vez, o Cinturão Salvador-Curaçá resultou da compressão dos blocos Gavião e Mairi com o Bloco Serrinha. Admite-se ainda a presença de um segmento menor, com direção NE, denominado de Cinturão Salvador-Esplanada, na maior parte subjacente às coberturas sedimentares do Mesozoico e do Cenozoico (Misi, 2012).

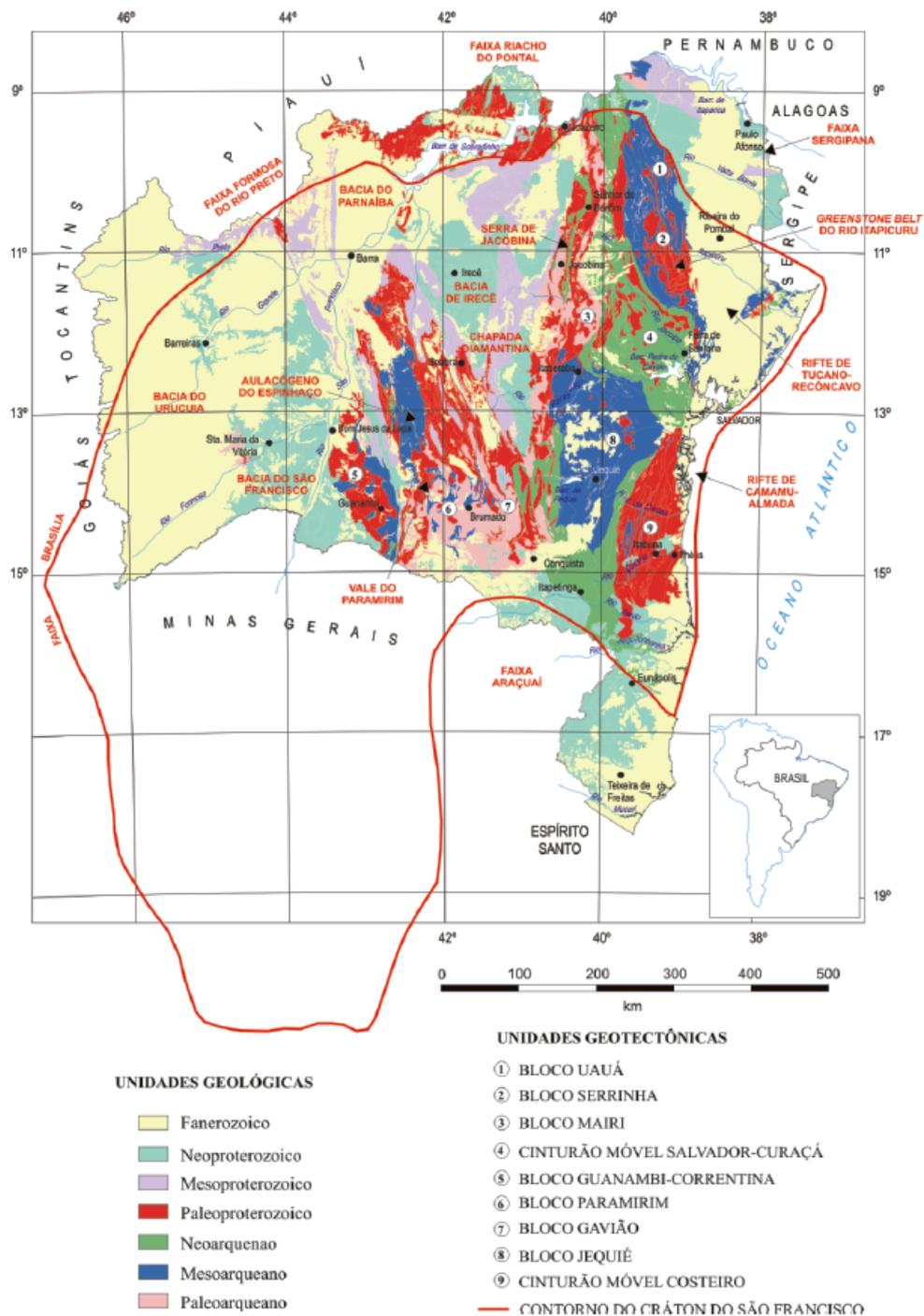


Figura 2.2: Mapa geológico simplificado da Bahia, mostrando as principais unidades geotectônicas. Fonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Sistema de informações geográficas - SIG. Brasília: CPRM, 2004. 41 CD-ROMs. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, IGBA – Informações Geológicas e de Recursos Minerais do Estado da Bahia: CBPM 30 anos; passo a passo como progresso da Bahia. Salvador, 2003 (CD-ROM).

2.3 Geologia local

Os terrenos do vale do rio Curaçá compõem uma estreita faixa de direção N-S situada na porção noroeste do cinturão móvel, como ilustra a figura 2.3. Nestes terrenos foram cartografadas as unidades Complexo Caraíba e Tanque Novo-Ipirá, os corpos máfico-ultramáficos portadores das mineralizações de cobre e diversas gerações de granitoides paleoproterozoicos intrusivos (Seixas et al., 1975; Melo et al., 1995).

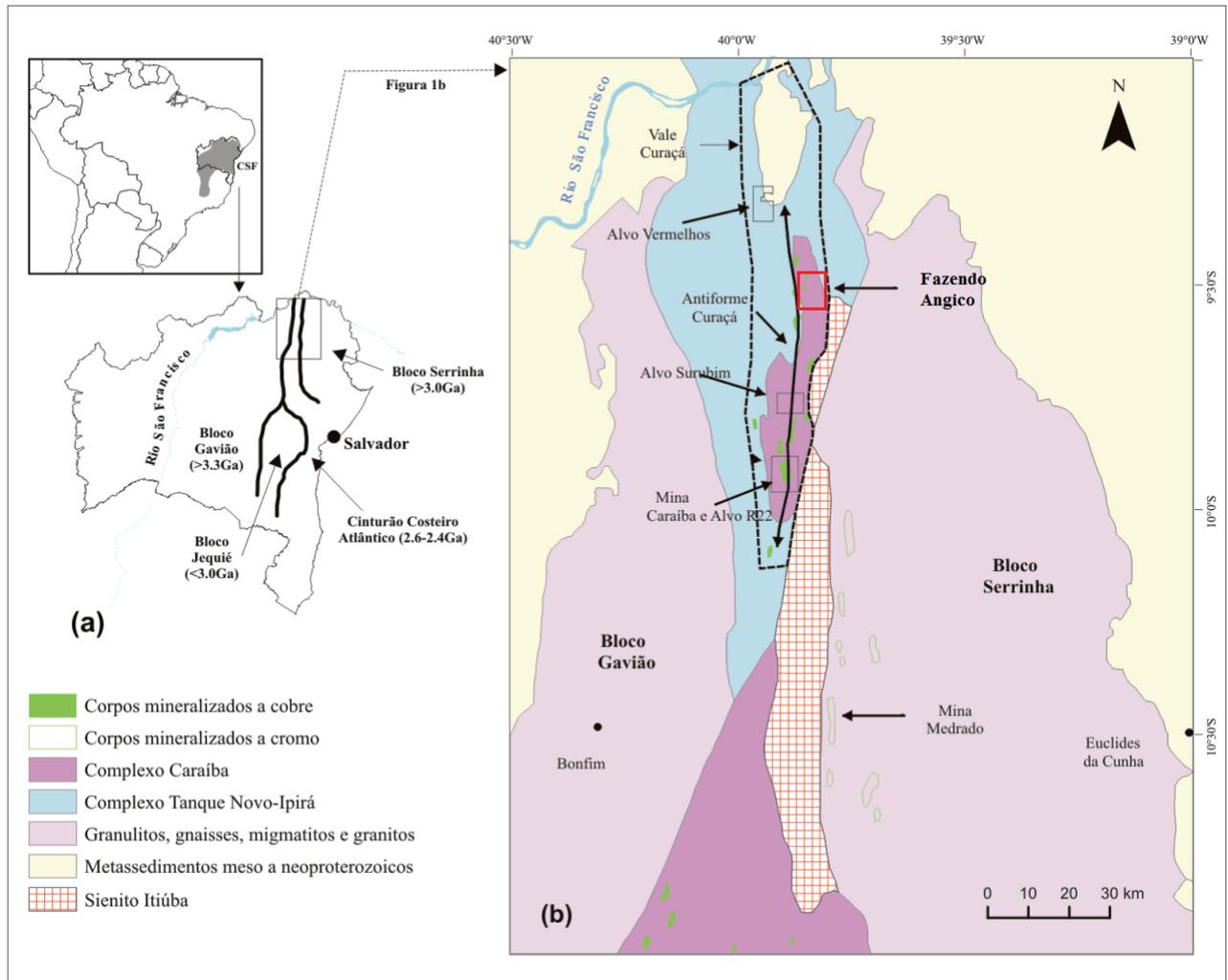


Figura 2.3: Mapa geológico simplificado do segmento norte do Cinturão Móvel Salvador - Curaçá, mostrando a faixa que corresponde ao Vale do rio Curaçá (Fonte: Teixeira, et al., 2010).

A distribuição regional das ocorrências de cobre, entretanto, transcende os limites do vale do rio Curaçá, estendendo-se para sudeste até aproximadamente o paralelo 11°S.

Os complexos Caraíba e Tanque Novo-Ipirá hospedam um grande número de corpos máfico-ultramáficos de dimensões variadas. No vale do rio Curaçá, os corpos máfico-ultramáficos encaixados no Complexo Caraíba contêm mineralizações econômicas de bornita e calcopirita. A província cuprífera do vale do rio Curaçá abrange uma área de cerca de 1700km^2 , englobando parcialmente os municípios de Juazeiro, Jaguarari e Curaçá, como mostra a figura 2.4.

Nesta área encontra-se a fazenda Angico, objeto deste trabalho, na qual foram identificados os alvos Cercado Velho e Lagoa da Mina, cujas as localizações podem ser vistas nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

De acordo com Delgado e Souza (1975), o corpo de Lagoa da Mina é constituído predominantemente por rochas norítica-dioríticas com piroxenitos e anfibolitos subordinados, que em superfície, possui forma de meia-lua, com aproximadamente 30.000m^2 , sendo evidenciado em campo, pelo solo massapê cinza escuro, característico da alteração das rochas máficas-ultramáficas no vale do rio Curaçá. Tal forma, conforme se concluiu dos estudos de sondagem, decorre, principalmente, da acomodação das rochas a uma dobra anticlinal de plano subvertical e, em parte, devido aos falhamentos e à granitização do complexo.

As rochas dioríticas constituem a maior parte do corpo máfico de Lagoa da Mina. São rochas mesocráticas de textura granular ou mais frequentemente foliadas. O mineral dominante é o plagioclásio, normalmente a andesina que grada até oligoclásio e constitui de (40 a 70)% da composição mineral.

As rochas noríticas são normalmente granulares, apresentando-se, às vezes, foliadas. São rochas mesocráticas a melanocráticas de microtextura hipidiomórfica ou xenomórfica. Os anfibolitos são rochas que aparecem aleatoriamente, associados em ambas as litologias, sendo os gnaisses charnoquíticos as rochas encaixantes do corpo máfico-ultramáfico.

O corpo de Cercado Velho é constituído predominantemente por rochas gabro-dioríticas associadas a noritos, piroxenitos, anfibolitos e rochas do fácies do xisto verde, apresentando, em superfície, forma alongada, tabular, aspecto que é mantido em subsuperfície. No campo não é fácil a identificação do corpo máfico de Cercado Velho, devido à estreita faixa de solo cinza, de apenas (20 a 40)m de largura, que não é perfeitamente distinta dos gnaisses migmatizados encaixantes, possuindo entretanto um comprimento de aproximadamente 400 metros (Delgado e Souza, 1975).

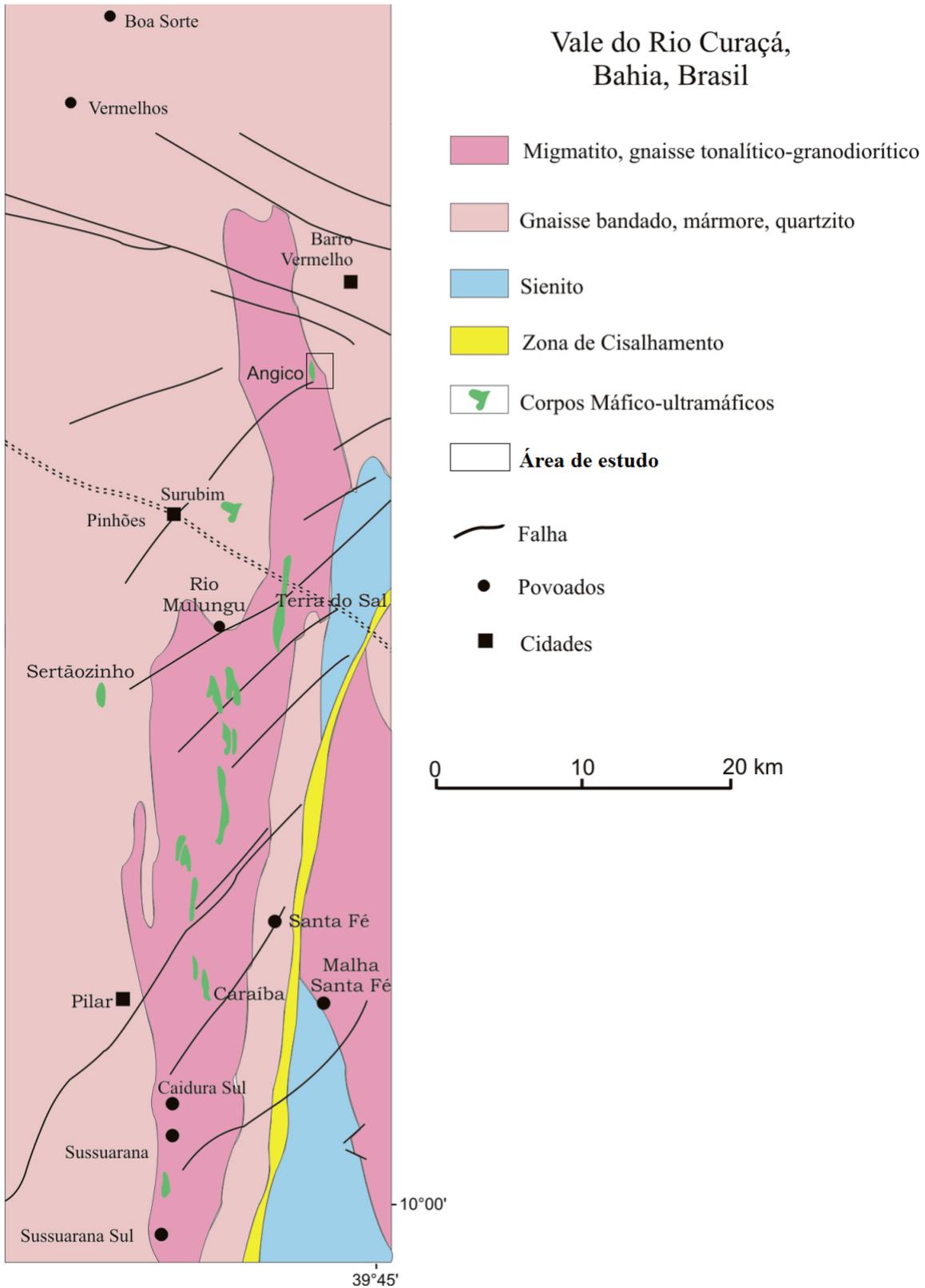


Figura 2.4: Mapa geológico simplificado do vale do rio Curaçá, mostrando as áreas de ocorrência de corpos máfico-ultramáficos. Modificado de Delgado e Souza (1975).

Os dioritos são de microtextura granular hipidiomórfica ou xenomórfica, apresentando, em geral, plagioclásio, clinopiroxênio, hornblenda, biotita, magnetita e pirita que são os mais frequentes, constituindo aproximadamente 3% da composição mineralógica. Já os noritos possuem textura granular xenomórfica, cujo plagioclásio cálcico pode variar até andesina, devido as alterações para sericita e grupo de epídoto. Essas rochas noríticas se acham intimamente associadas com as rochas piroxeníticas. A figura 2.6 mostra a geologia simplificada da região.

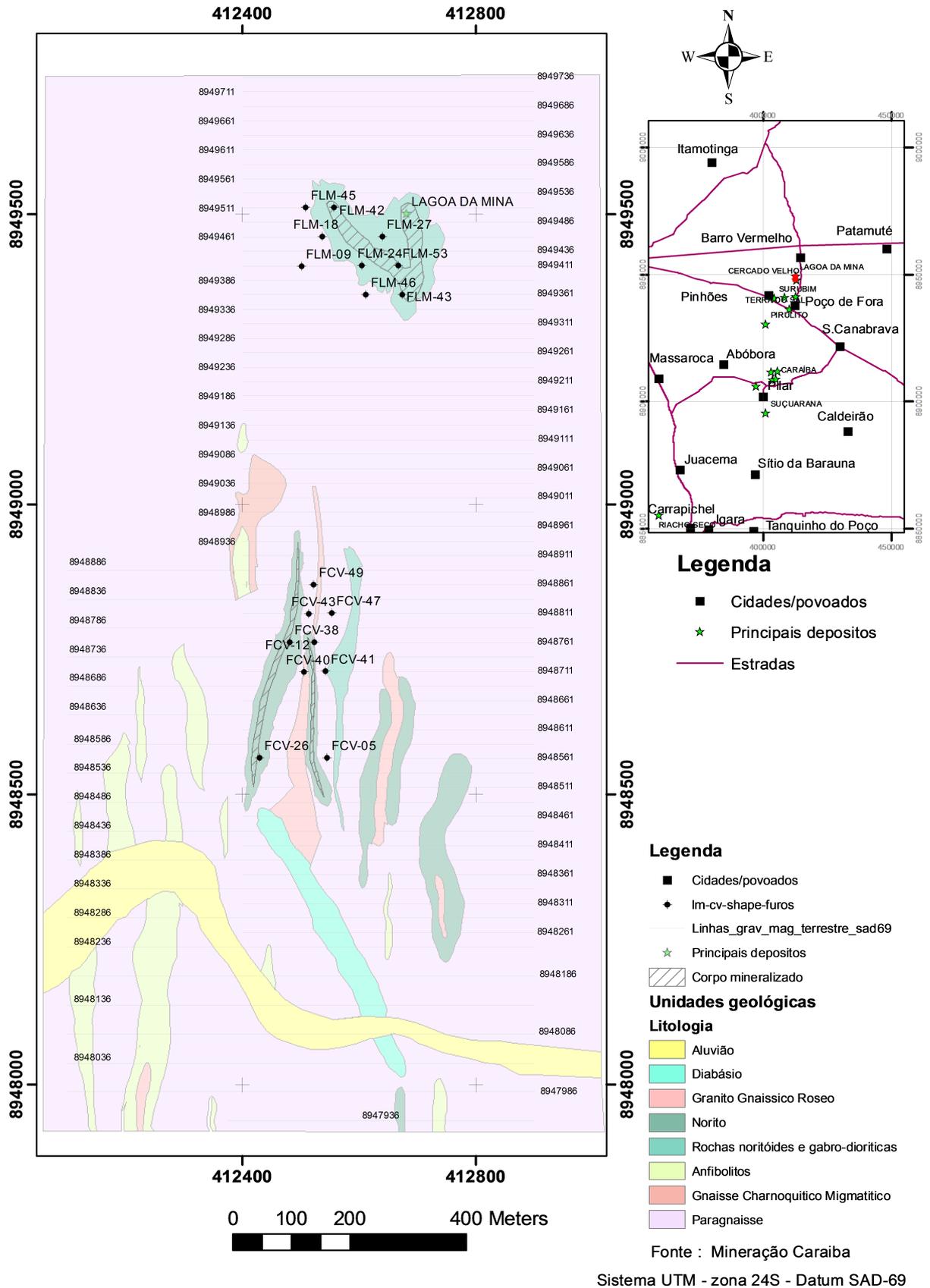


Figura 2.6: Mapa geológico simplificado da Região de Angico. Ao Norte, temos o corpo associado à Lagoa da Mina, e ao sul, os corpos associados a Cercado Velho. Fonte: Mineração Caraíba.

CAPÍTULO 3

Desenvolvimento e Validação do algoritmo a partir de modelo sintético.

A escolha da linguagem Fortran para a escrita do algoritmo deveu-se ao fato de esta possuir uma distribuição livre, ou seja, por permitir seu uso gratuitamente em um ambiente Linux, por exemplo. Não obstante, a forma como o algoritmo encontra-se estruturado, ou seja, todo código está escrito usando comandos básicos para ser o mais didático possível, permite um entendimento mais completo, tornando-se, assim, apropriada ao meio acadêmico.

Primeiramente um modelo sintético foi gerado usando o Potensoft. O Potensoft é um código livre baseado em MATLAB, desenvolvido por Arisoy e Dikmen (2011), voltado para métodos potenciais. Nele, podem-se gerar modelos de copos 3D e a partir desses corpos são geradas as componentes do tensor. Este programa possui vários outros recursos voltados aos métodos potenciais, tais como, cálculo da Amplitude do Sinal Analítico, filtros, redução ao polo, entre outros.

Com o objetivos de validar o algoritmo desenvolvido, a resposta de cada uma das componentes do tensor, calculadas com o algoritmo, foi comparada com sua respectivas componentes gerada pelo Potensoft.

Os resultados encontram-se expostos como seguem.

3.1 Modelo sintético e cálculo dos tensores em ambiente Matlab

O modelo gerado corresponde a um paralelepípedo regular com área da base medindo $2km \times 2km$, estando seu topo a uma profundidade de $1km$ e sua base a uma profundidade de $2km$, com contraste de densidade igual a $1g/cm^3$, como mostram as figuras 3.1 e 3.2. A área do levantamento possui $10km \times 10km$ de dimensão, com estações distribuídas a cada $1km$.

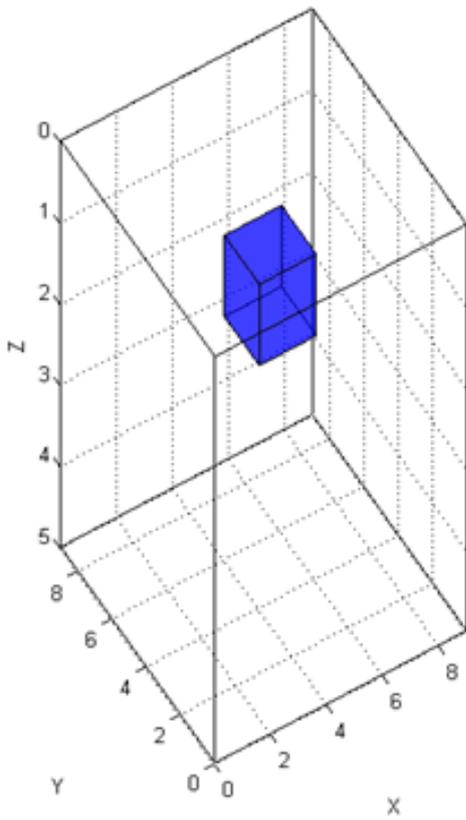


Figura 3.1: Vista em três dimensões do paralelepípedo.

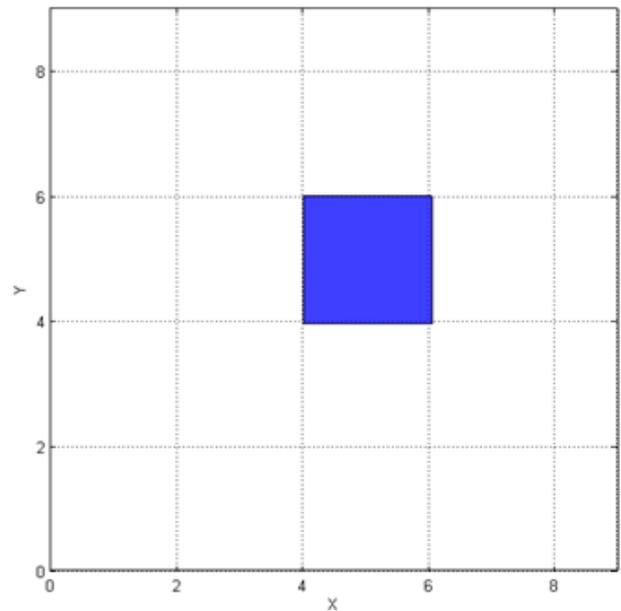


Figura 3.2: Vista do corpo (paralelepípedo) no plano xy.

A partir do modelo sintético, o Potensoft gerou a correspondente anomalia Bouguer e as componentes U_{zx} , U_{zy} e U_{zz} do tensor gravimétrico. As componentes U_{xx} , U_{yy} e U_{xy} foram obtidas integrando-se os valores Bouguer e os derivando, posteriormente, nas direções horizontais do plano xy, usando o próprio Potensoft.

Para este modelo sintético, a anomalia Bouguer e as componentes do tensor estão apresentadas na figura 3.3:

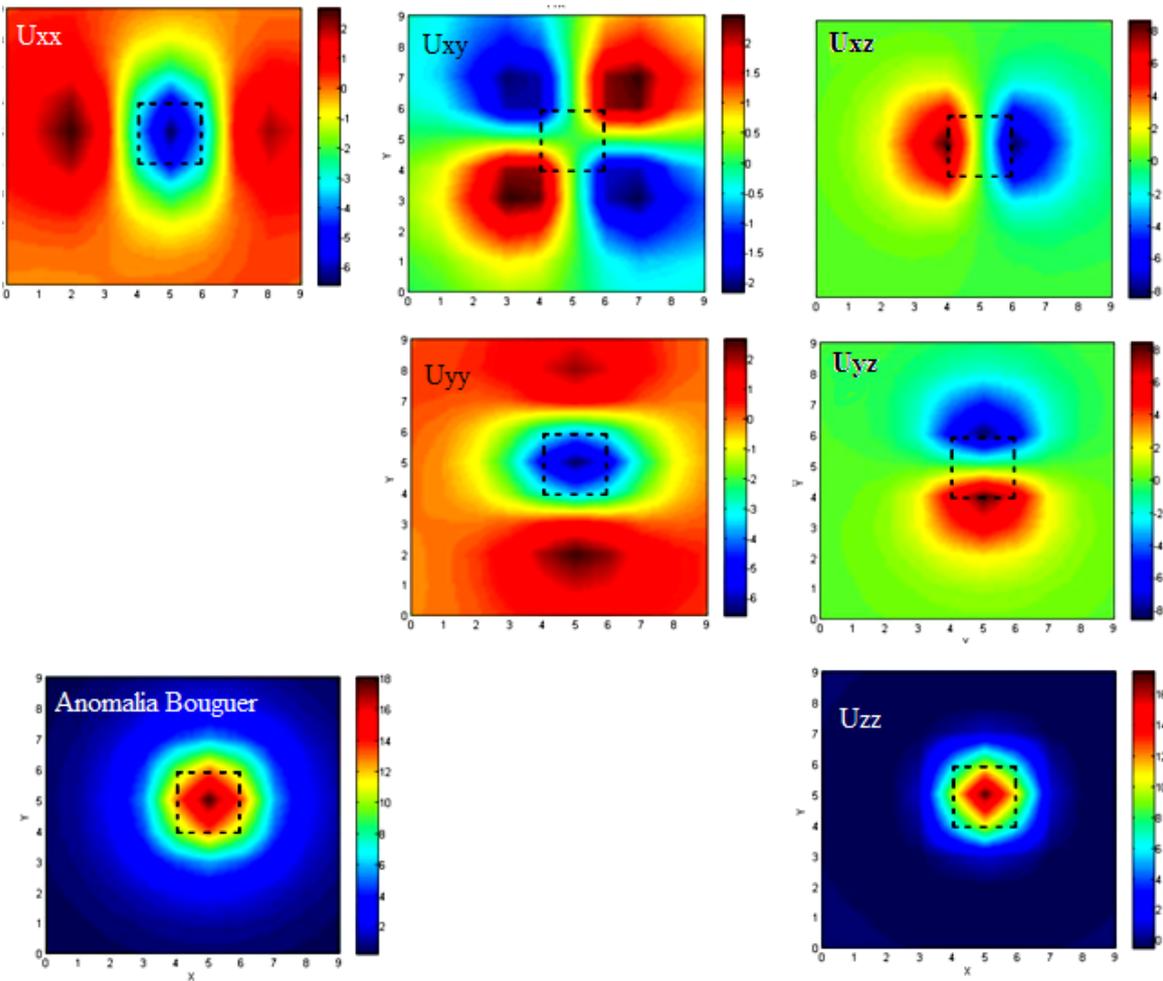


Figura 3.3: Anomalia Bouguer e suas correspondentes componentes do tensor gravimétrico obtidas no Potensoft.

3.2 Cálculo dos tensores utilizando o algoritmo Fortran.

A utilização do código Fortran, disponível no anexo, para o cálculo das componentes do tensor gravimétrico deve seguir os seguintes fluxogramas.

3.2.1 Fluxograma para o cálculo de U_{zz} .

O cálculo dessa componente consiste em derivar os valores Bouguer com respeito à profundidade, tal como demonstrado pela equação 1.28, bastando trocar U por g_z nesta equação. Assim, devemos prosseguir como segue:

1. Entrada dos dados (anomalia Bouguer)
2. Aplicação da TDF aos dados
3. Aplicação da Transformada Shift aos dados no domínio de Fourier
4. Cálculo dos K a partir das dimensões do levantamento
5. Multiplicação dos K pelos valores da Transformada Shift
6. Aplicação da Transformada Shift aos dados obtidos no passo anterior
7. Aplicação da TDF inversa aos dados obtidos anteriormente.
8. Impressão da parte real dos dados.

3.2.2 Fluxograma para o cálculo das componentes U_{xx} , U_{xy} e U_{yy} .

O cálculo destas componentes é feito derivando o potencial gravitacional, ou seja, derivando U nas direções horizontais. Assim, primeiramente devemos calcular o potencial U , tal como demonstrado pela equação 1.28 e depois efetuar a derivação usando o método das diferenças dividida centrada. Assim, devemos prosseguir como segue:

1. Entrada dos dados (anomalia Bouguer)
2. Aplicação da TDF aos dados
3. Aplicação da Transformada Shift aos dados no domínio de Fourier
4. Cálculo dos K a partir das dimensões do levantamento
5. Divisão dos valores da Transformada Shift pelos valores de K

6. Aplicação da Transformada Shift aos dados obtidos no passo anterior
7. Aplicação da TDF inversa aos dados obtidos anteriormente.
8. Impressão da parte real dos dados.
9. Aplicação das derivadas direcionais.

3.2.3 Fluxograma para o cálculo das componentes U_{zx} e U_{zy} .

Essas componentes correspondem às derivadas horizontais, com respeito a x e y , da anomalia Bouguer. Assim, devemos prosseguir como segue:

1. Entrada dos dados (anomalia Bouguer)
2. Aplicação das derivadas direcionais.

A partir do algoritmo desenvolvido foram calculadas as componentes do tensor gravimétrico, obtendo os resultados mostrados na figura 3.4:

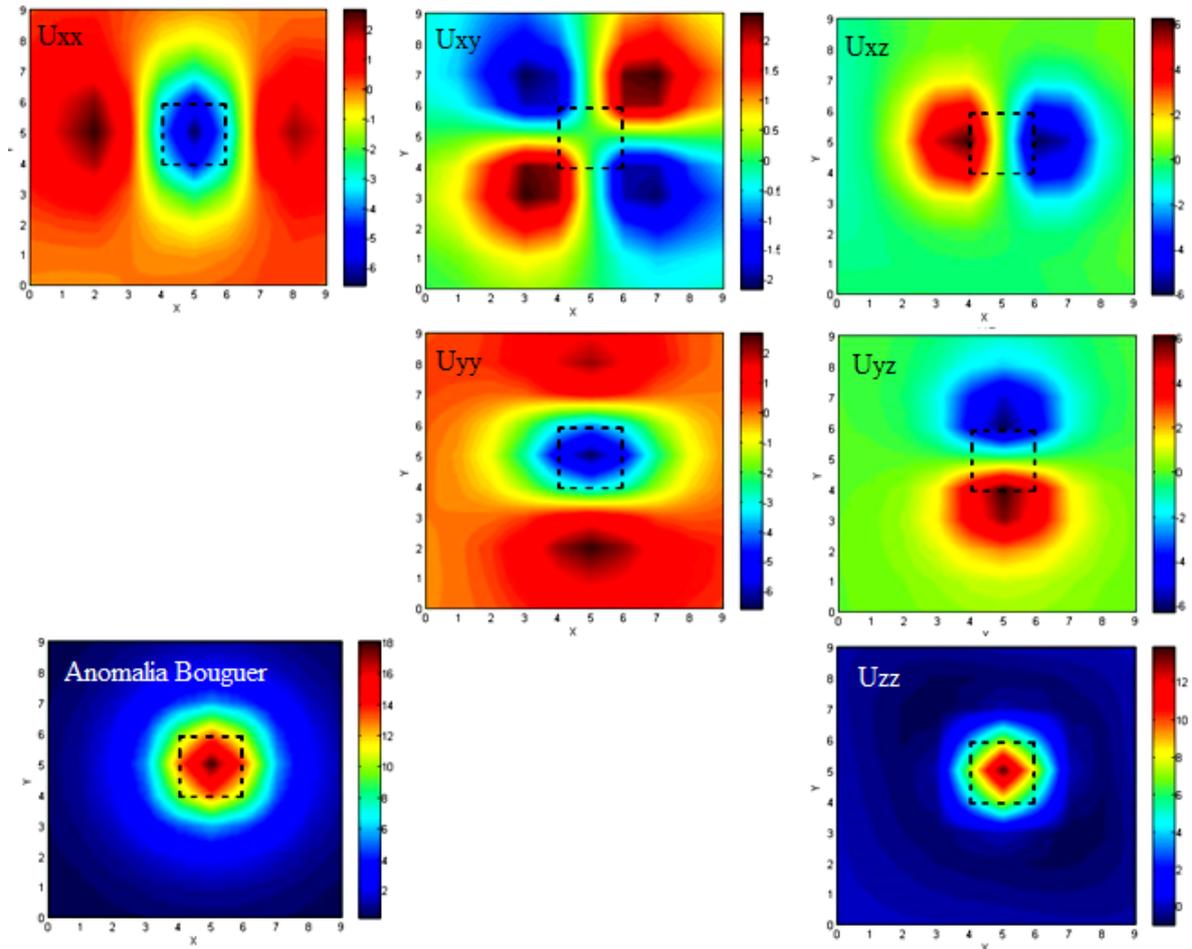


Figura 3.4: Anomalia Bouguer e suas correspondentes componentes do tensor gravimétrico obtidas no Fortran.

3.3 Avaliação do algoritmo Fortran.

A partir das figuras 3.3 e 3.4 pode-se verificar que o algoritmo Fortran foi capaz de calcular os tensores perfeitamente. A componente U_{zz} delimita satisfatoriamente o corpo. Sua discrepância, quando comparada com a obtida no ambiente MATLAB, se deve ao fato de neste ambiente esta componente ser obtida por uma expressão analítica e no Fortran, por método numérico. A componente U_{xx} identificou com exatidão as bordas leste e oeste do corpo, e a componente U_{yy} , as bordas norte e sul. A característica de quadrupolos da componente U_{xy} , com dois altos e dois baixos gravimétricos bem definidos, que possui forte correlação com corpos discretos, sendo bastante eficiente na identificação de corpos de minério, encontra-se bem representada. As componentes U_{xz} e U_{yz} , que conforme já descrito por Murphy (2004) identificam os centros de massa do corpo, encontra-se bem caracterizada.

CAPÍTULO 4

Aquisição e processamento dos dados de gravimetria

4.1 Obtenção e correção dos dados gravimétrico

Os dados de gravimetria foram cedidos pela Mineração Caraíba, que foi a responsável, também, pela aquisição dos dados. Este, por sua vez, deu-se em duas etapas.

A primeira etapa ocorreu em maio de 2010 sobre o alvo Lagoa da Mina, situado mais ao norte da fazenda Angico. As linhas de levantamento foram no sentido leste-oeste, com espaçamento uniforme de 25 metros entre as estações de medida, em uma malha quadrada, como mostra a figura 4.1.

A segunda etapa deu-se em abril de 2012 sobre o alvo Cercado Velho. Nesta etapa, as linhas também foram feitas no sentido leste-oeste, mas com um espaçamento uniforme de 50 metros na direção Norte-Sul e 25 metros na direção Leste-Oeste, como mostra a figura 4.2.

O gravímetro utilizado em ambas as etapas dos levantamentos foi o Scintrex CG-5. As correções nos valor da gravidade(correções de ar livre, correções de latitude) foram feitas utilizando as planilhas desenvolvidas por Holom e Oldow (2007) em seu artigo. A estação que serviu de base de referência nos levantamentos foi a da igreja da cidade de Pinhões, cuja gravidade é de 978052,750 mGal.

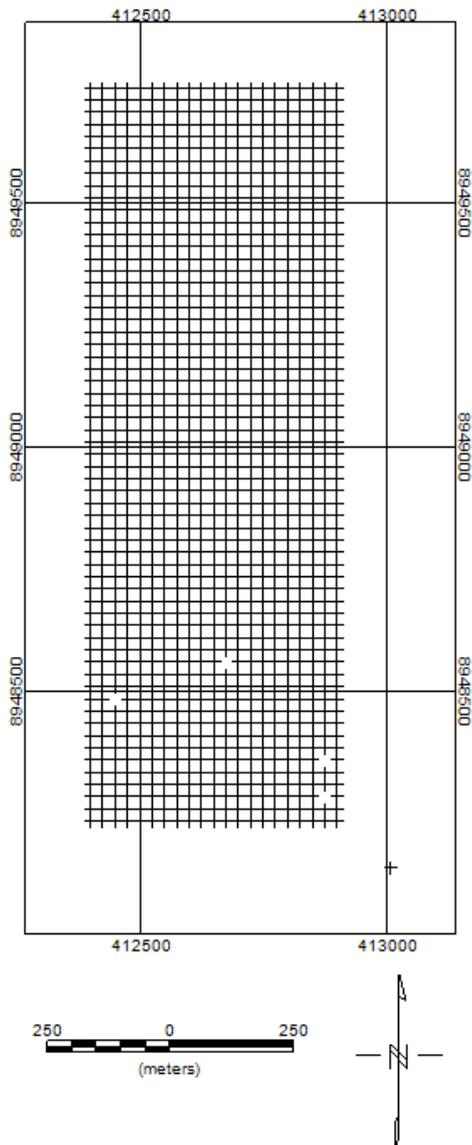


Figura 4.1: Linhas do levantamento gravimétrico de Lagoa da Mina.

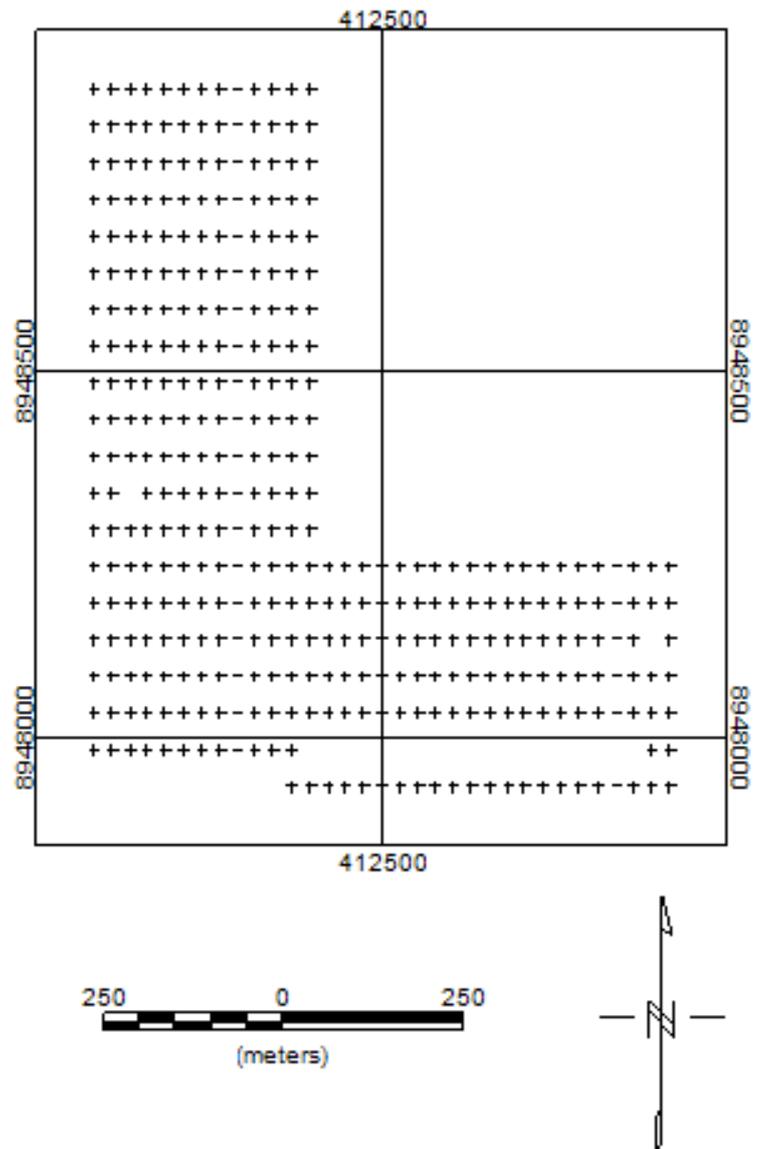


Figura 4.2: Linhas do levantamento gravimétrico de Cercado Velho.

Cada levantamento gerou seu respectivo arquivo de dados, que foram agrupados em um único arquivo, neste trabalho. A figura 4.3 ilustra a disposição das linhas após o agrupamento.

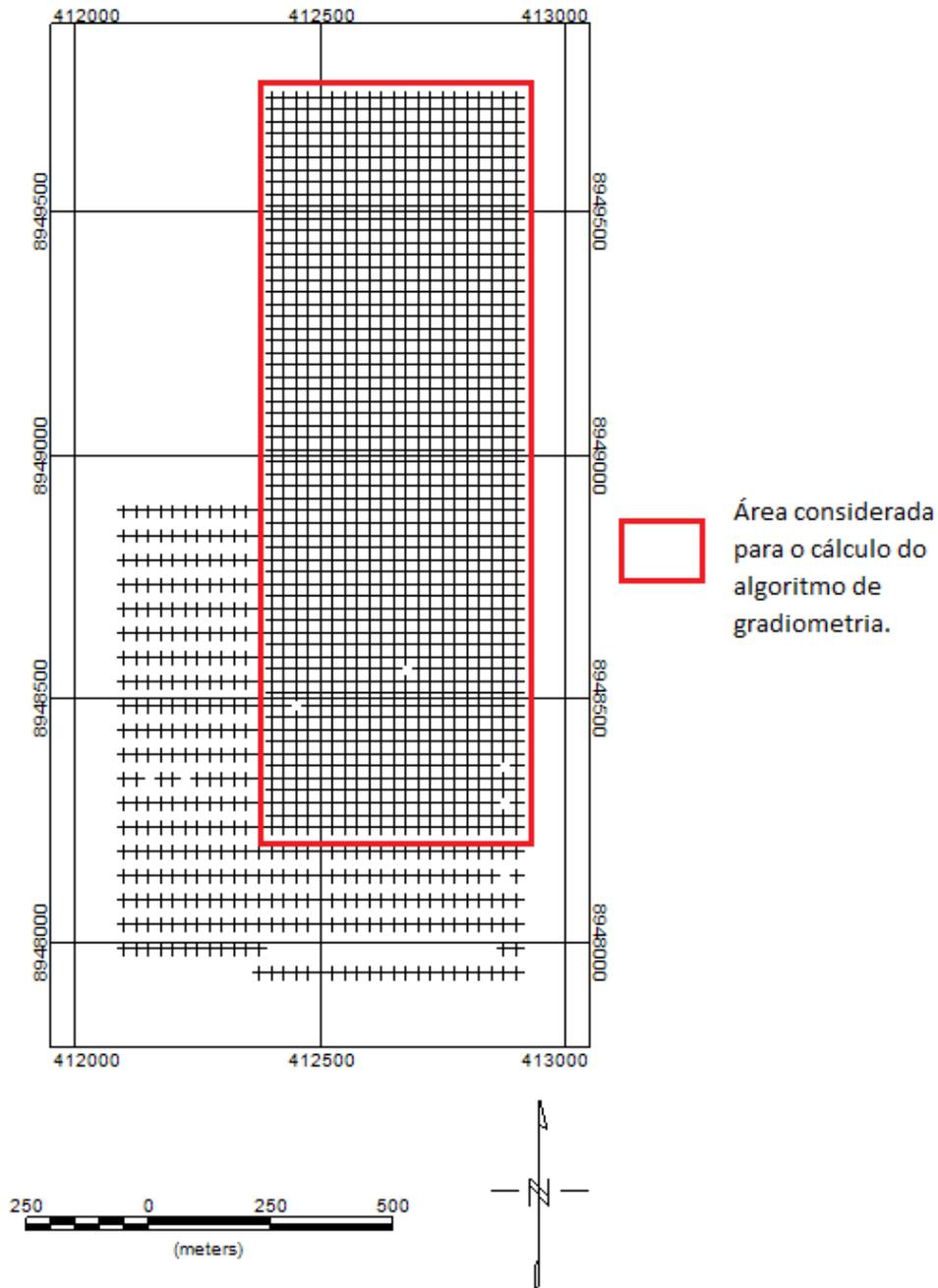


Figura 4.3: União das linhas do levantamento gravimétrico da fazenda Angico.

Da figura 4.3 vemos que a malha do levantamento é irregular. Tendo em vista as limitações impostas ao algoritmo pela sub-rotina *four*, ou seja, a Transformada Discreta de Fourier só pode ser aplicada à uma malha regular, tal como uma matriz de dimensões $n \times m$, e tendo em vista, também, a geologia local, alguns pontos do levantamento sobre Cercado Velho foram excluídos da malha total, e espaços em branco, que correspondem a pontos que por algum motivo não tiveram seus valores aferidos, foram preenchidos com valores artificiais, usando uma média aritmética simples dos quatro pontos vizinhos (circundantes). Foram considerado para o cálculo do tensor gravimétrico apenas a parte leste da malha integrada, conforme mostra a figura 4.3.

O resultado é ilustrado na figura 4.4 a seguir.

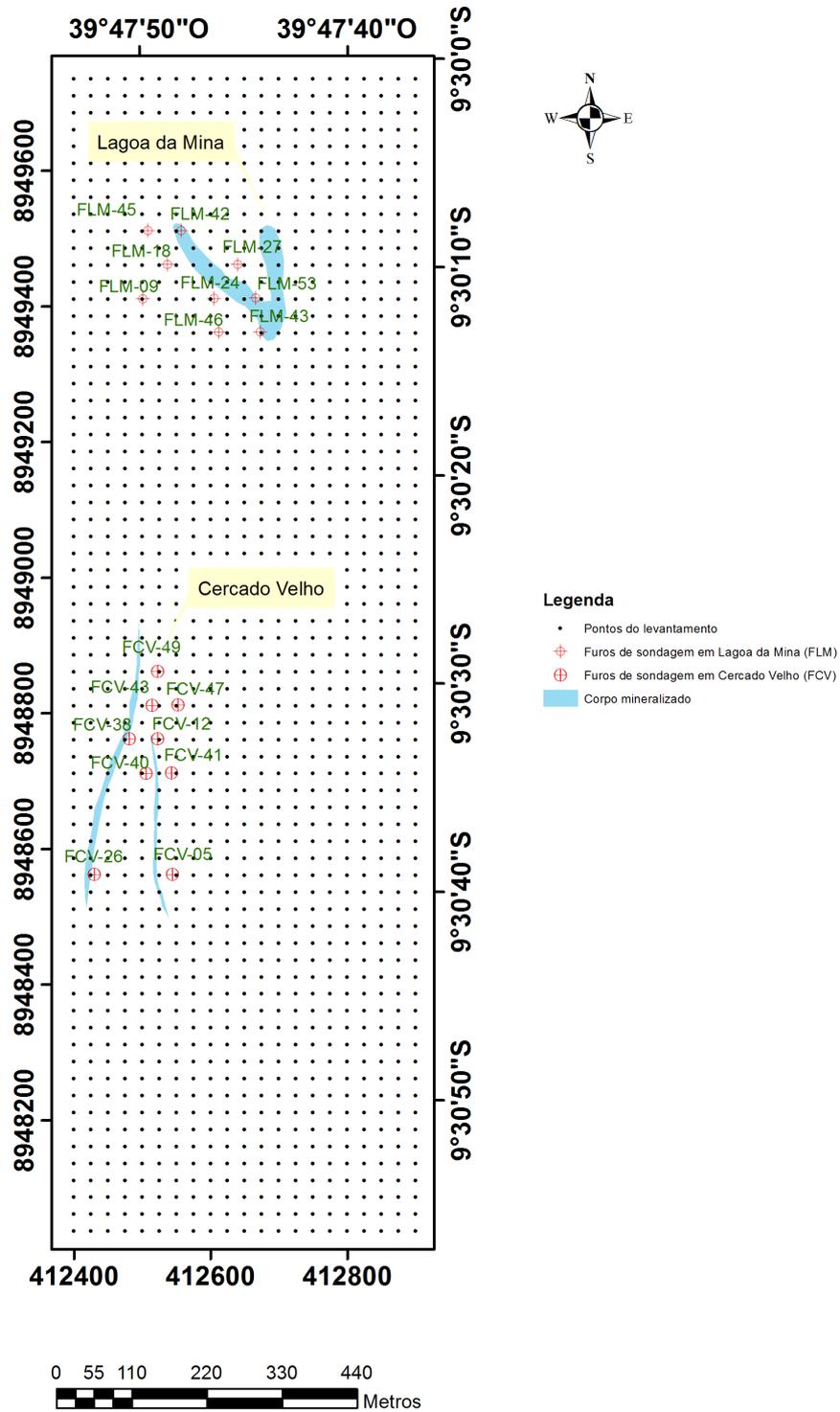


Figura 4.4: Malha resultante da correção das malhas de Cercado Velho e Lagoa da Mina, e eliminação dos seu dados espúrios.

Em posse dos valores corrigidos da gravidade, utilizou-se o software Oasis Montaj para gerar o mapa dessas anomalias, como mostrado na figura 4.5 a seguir. Todos os cálculos posteriores foram realizados sobre essa base de dados das anomalias corrigidas de gravidade.

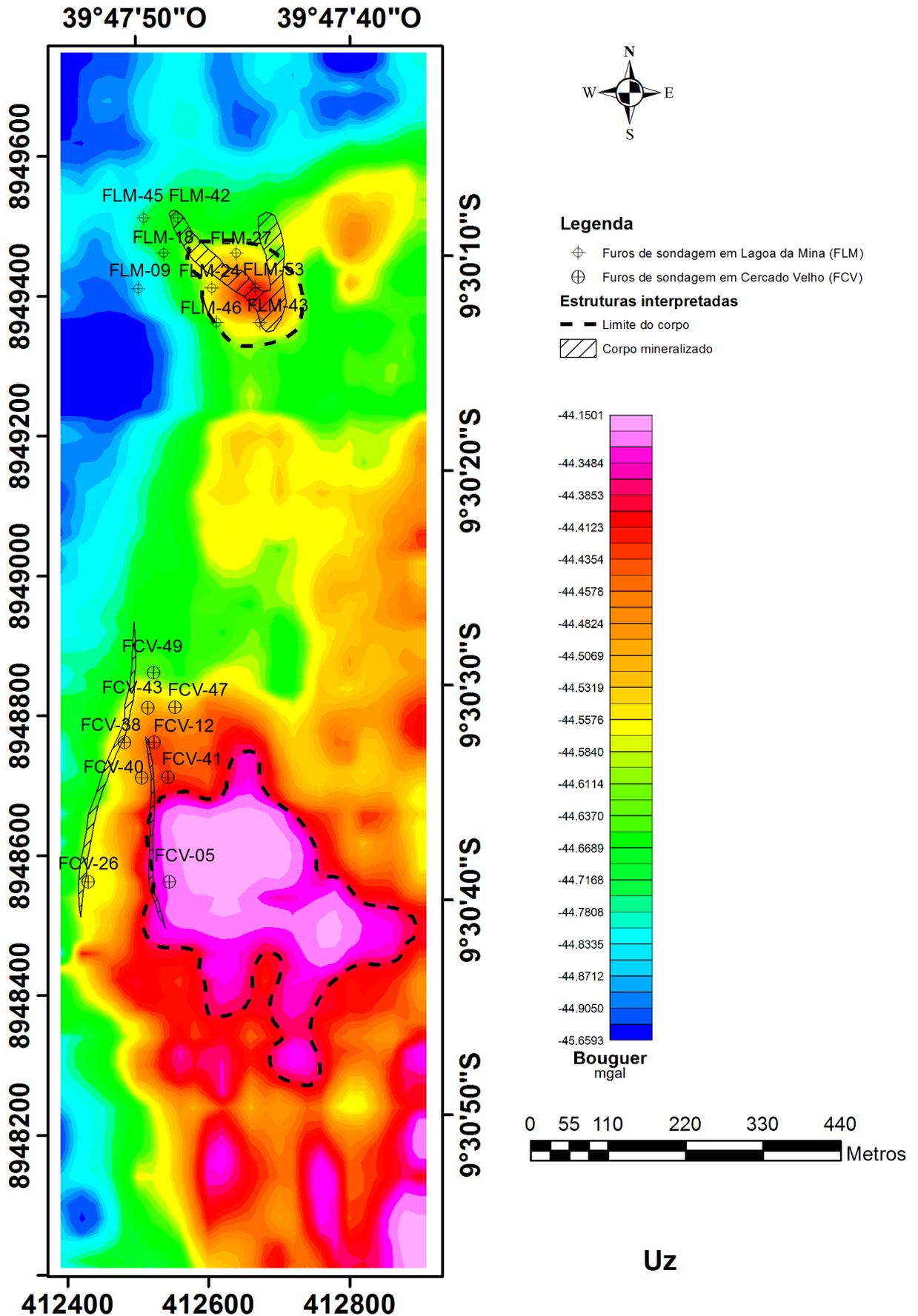


Figura 4.5: Mapa da anomalia Bouguer dos alvos. Em 1, temos a resposta gravimétrica sobre o alvo Lagoa da Mina, e em 2, sobre o alvo Cercado Velho.

CAPÍTULO 5

Resultados e Discussões

Tendo demonstrado a validade do algoritmo desenvolvido ao aplicá-lo a um modelo sintético e ter obtido resultados muito satisfatórios, neste ponto do trabalho aplicou-se tal algoritmo aos dados reais de anomalia Bouguer. Assim, cada componente do tensor gravimétrico foi calculada, como descrito na secção 3.2, e tiveram seus respectivos mapas gerados utilizando o Oasis Montaj, como ilustrados a seguir.

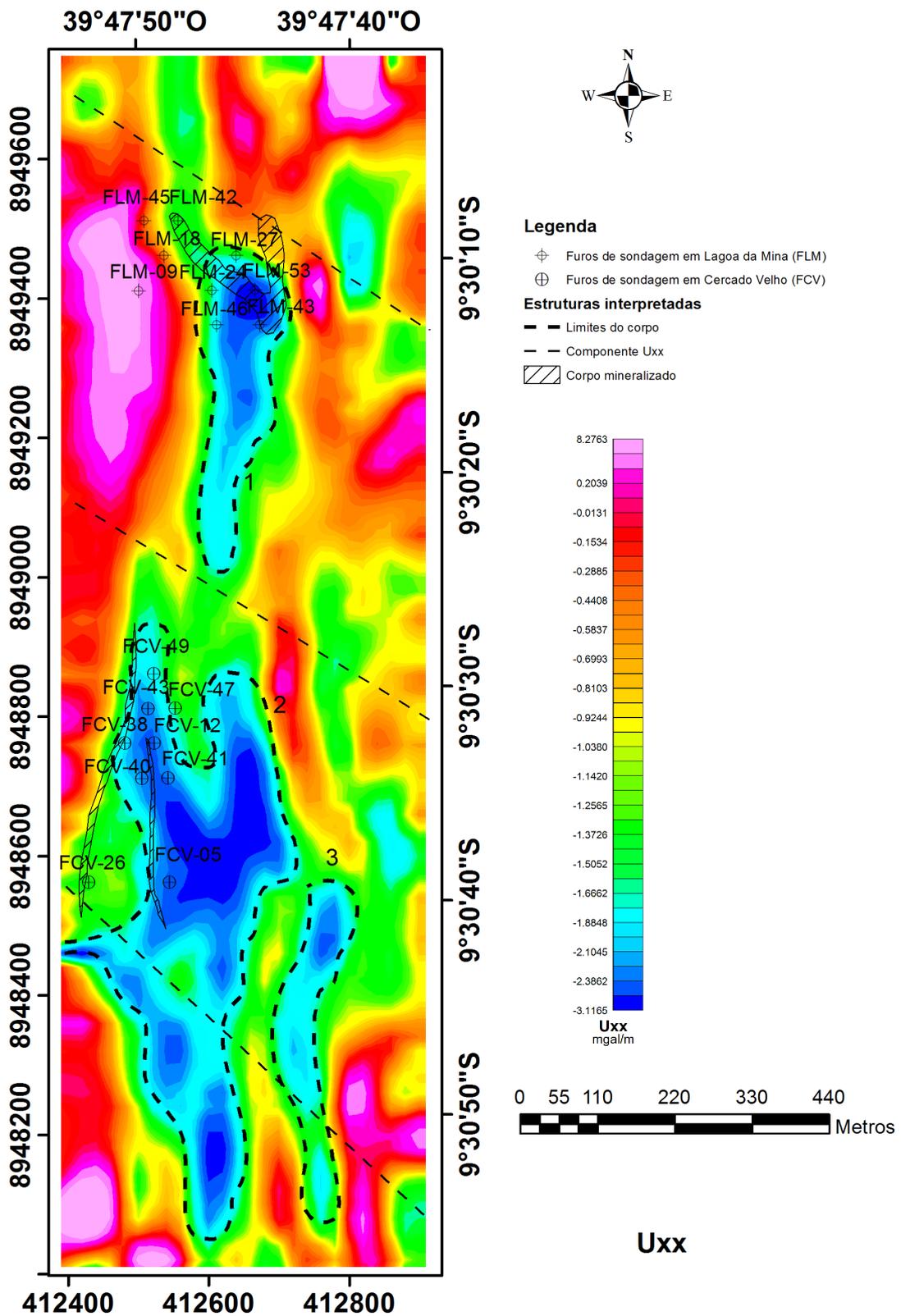


Figura 5.1: Mapa da componente U_{xx} . As regiões de baixo valor gradimétrico, em azul, mostram os limites leste-oeste de corpos em Lagoa da Mina e em Cercado Velho, regiões 1, 2 e 3.

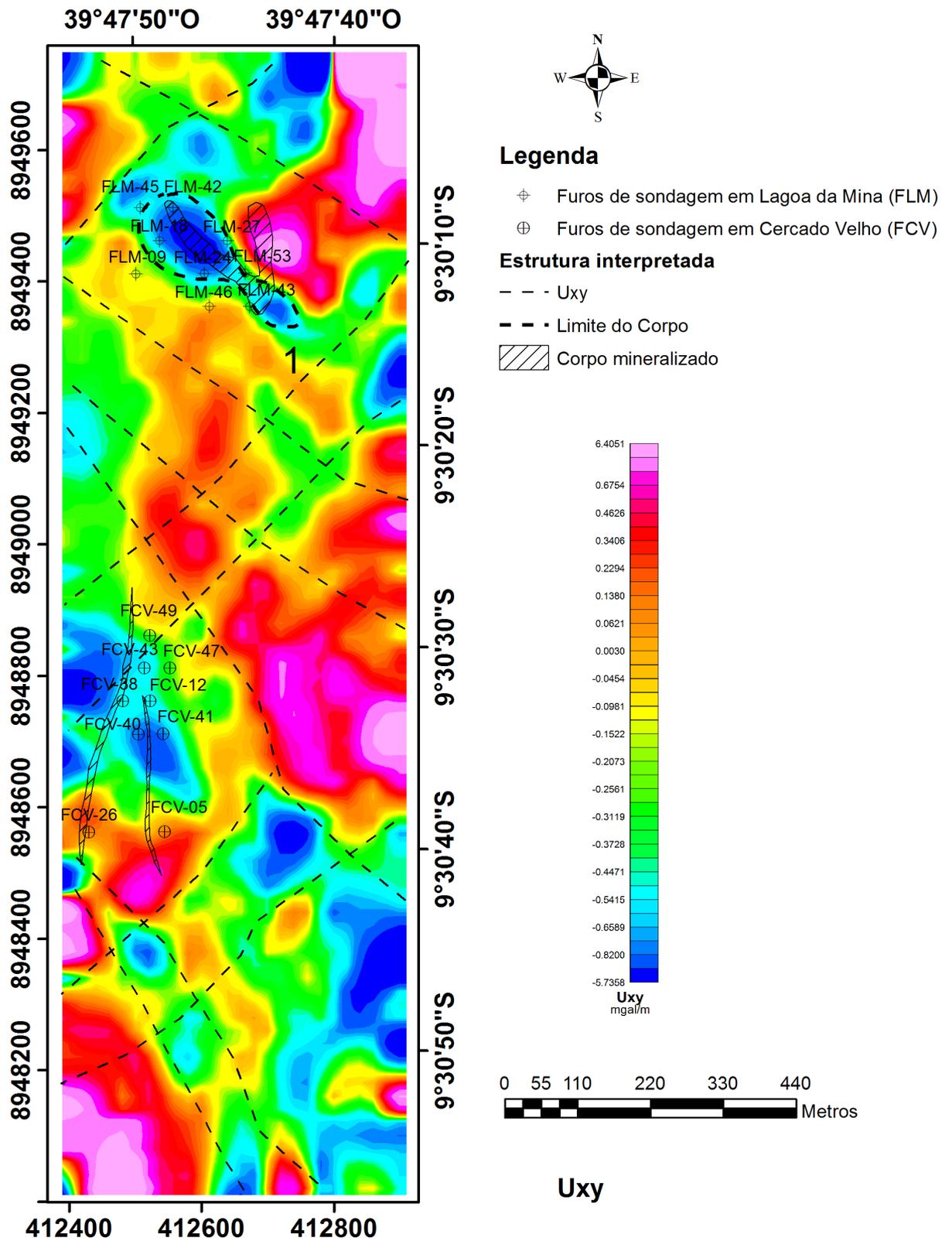


Figura 5.2: Mapa da componente U_{xy} . Esta componente destaca as estruturas com direção NW-SE e NE-SW.

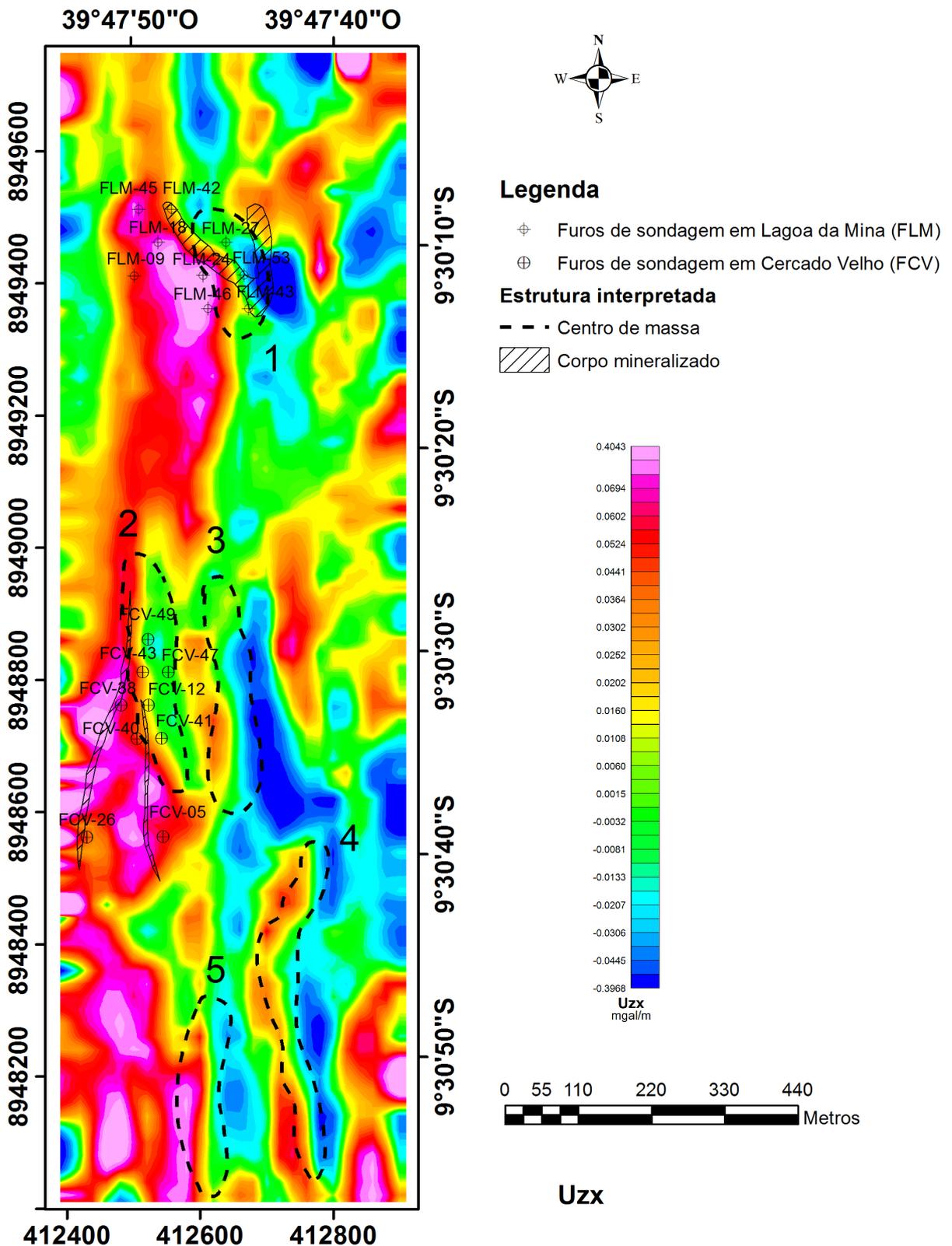


Figura 5.3: Mapa da componente U_{zx} . As regiões delimitadas em 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem ao centro de massa, na direção norte-sul, de corpos da região.

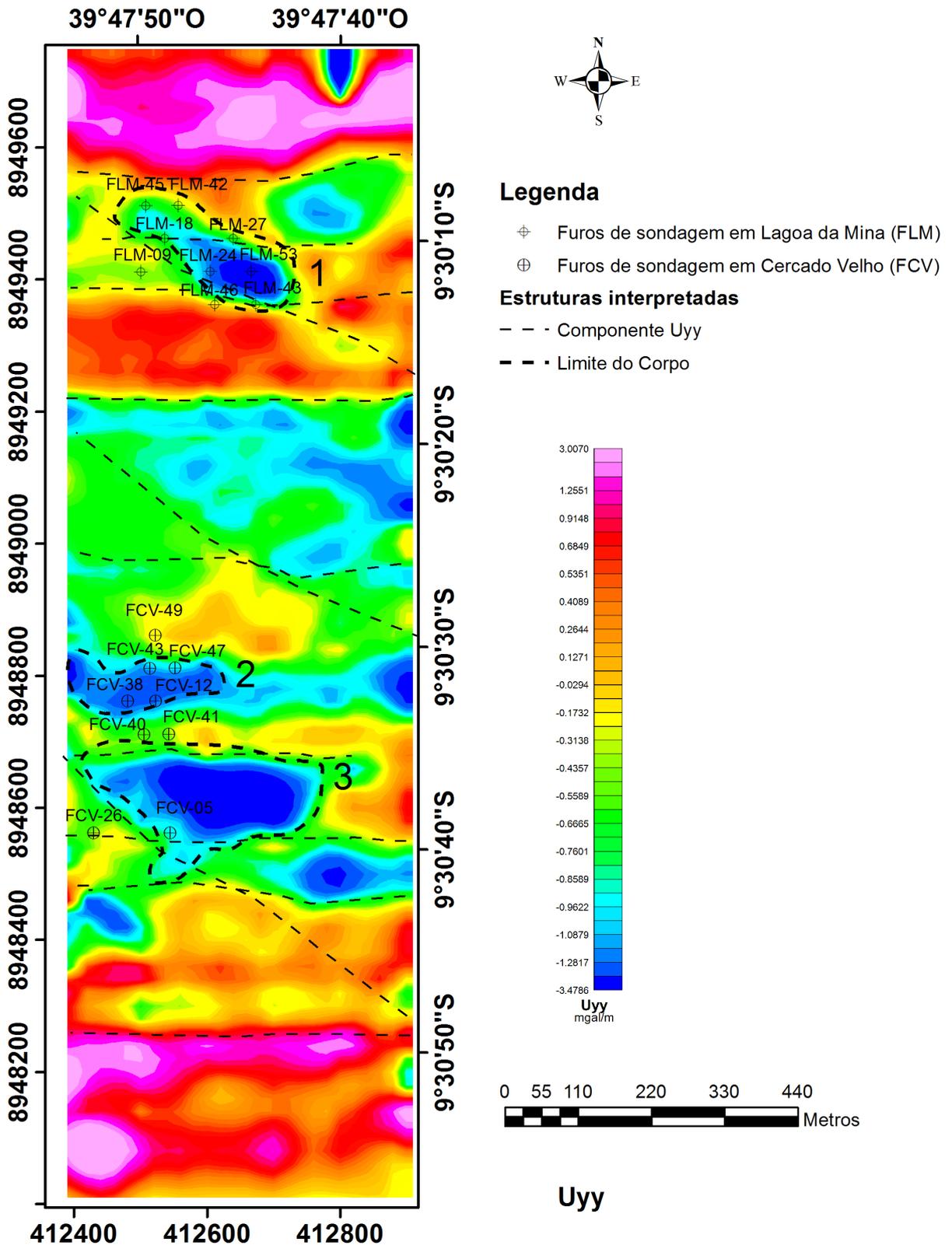


Figura 5.4: Mapa da componente U_{yy} . As regiões limitadas por 1 correspondem ao limite norte-sul do corpo em Lagoa da Mina, e as limitadas por 2 e 3, aos limites de corpos em Cercado Velho.

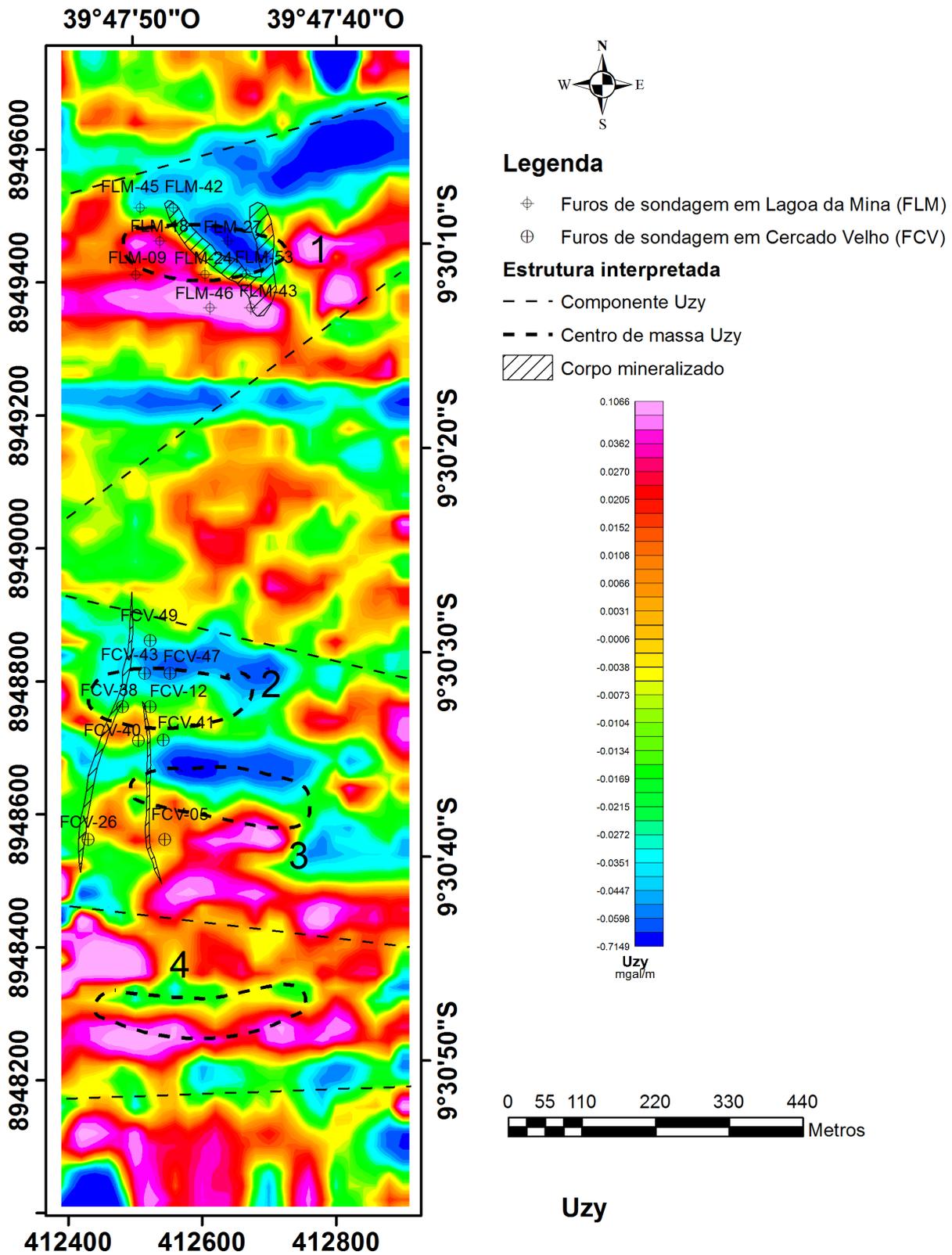


Figura 5.5: Mapa da componente *Uzy*. A região em 1 corresponde ao centro de massa do corpo em Lagoa da Mina, e as regiões 2, 3 e 4 correspondem ao centro de massa de corpos em Cercado Velho.

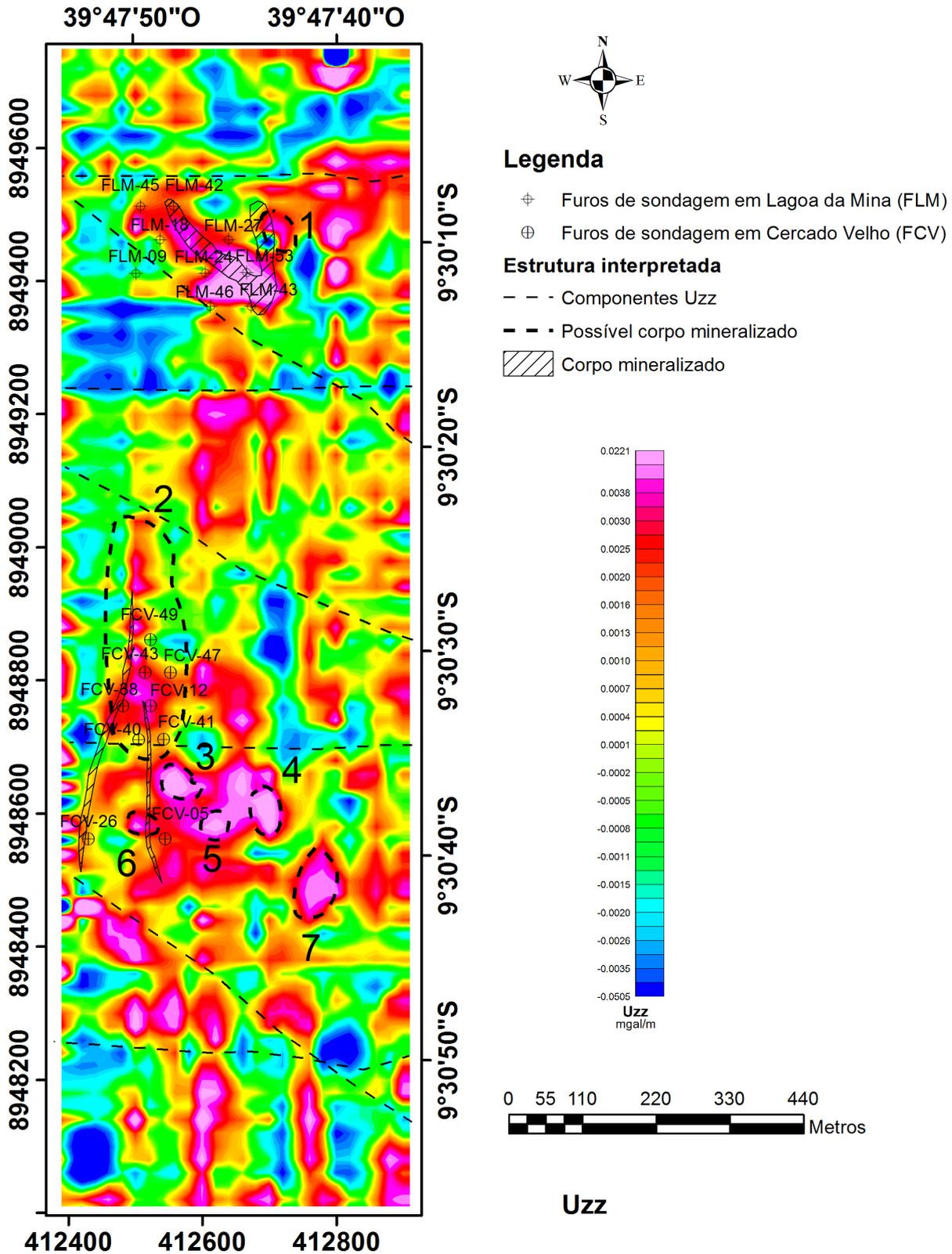


Figura 5.6: Mapa da componente U_{zz} . As regiões enumerada de 1 até 7 correspondem a possíveis corpos mineralizados, identificados pelo algoritmo.

A partir dos mapas dos gradientes gradiométricos podemos observar que:

1. A componente Uxx , figura 5.1, identificou os limites leste-oeste do corpo mineralizado no alvo Lagoa da Mina, região 1 no mapa, bem como, 2 corpos, em 2 e 3, na região de Cercado Velho, evidenciando seus alongamentos na direção norte-sul. Esse lineamento dos corpos nesta área já fora identificado geologicamente, como mencionado no capítulo 2.
2. A componente Uxy , figura 5.2, identificou com exatidão a porção mineralizada, orientada na direção NW-SE, do alvo Lagoa da Mina, região 1 no mapa, bem como outras estruturas geológicas nesta mesma direção e na direção NE-SW.
3. A componente Uzx , figura 5.3, delimitou o centro de massa, na direção leste-oeste, do corpo em Lagoa da Mina, regiões 1, e mais 4 corpos nas proximidades de Cercado Velho, regiões 2, 3, 4 e 5 no mapa.
4. A componente Uyy , figura 5.4, identificou os limites norte-sul do corpo em Lagoa da Mina, região 1, e em 2 e 3, limites de corpos em Cercado Velho, bem como, estruturas na direção NW-SE.
5. A componente Uzy , figura 5.5, identificou o centro de massa, na direção norte-sul, do corpo em Lagoa da Mina, região 1, e em Cercado Velho, mais três corpos, região 2, 3 e 4, bem como estruturas na direção NW-SE e NE-SW.
6. A componente Uzz , figura 5.6, identificou pontos anômalos associados a possíveis corpos mineralizados.

A figura 5.7 mostra as estruturas interpretadas a partir das seis componentes do tensor gravimétrico.

A eficiência do método, bem com suas contribuições para melhor entendimento dos alvos, podem ser melhor entendidos quando analisados juntamente com informações geológicas do local. Assim, foram elaborados mais seis mapas, nos quais os mapas de cada componente do tensor foram sob-postos ao mapa geológico simplificado da região 2.6. Nesses mapas encontram-se, também, posicionados alguns furos de sondagem cedidos pela Mineração Caráiba.

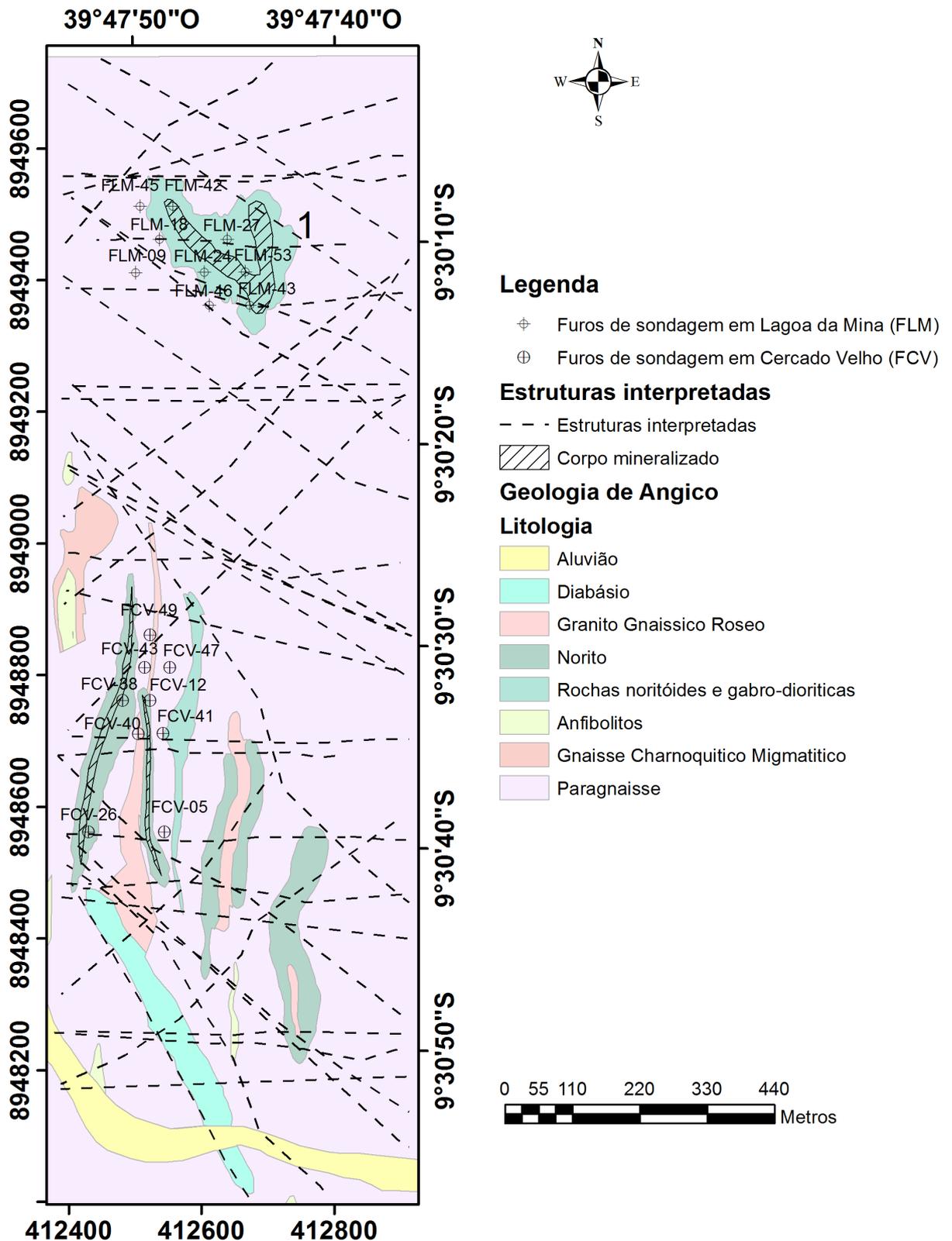


Figura 5.7: Mapa geológico simplificado da Região de Angico com as estruturas interpretadas a partir das componentes do tensor.

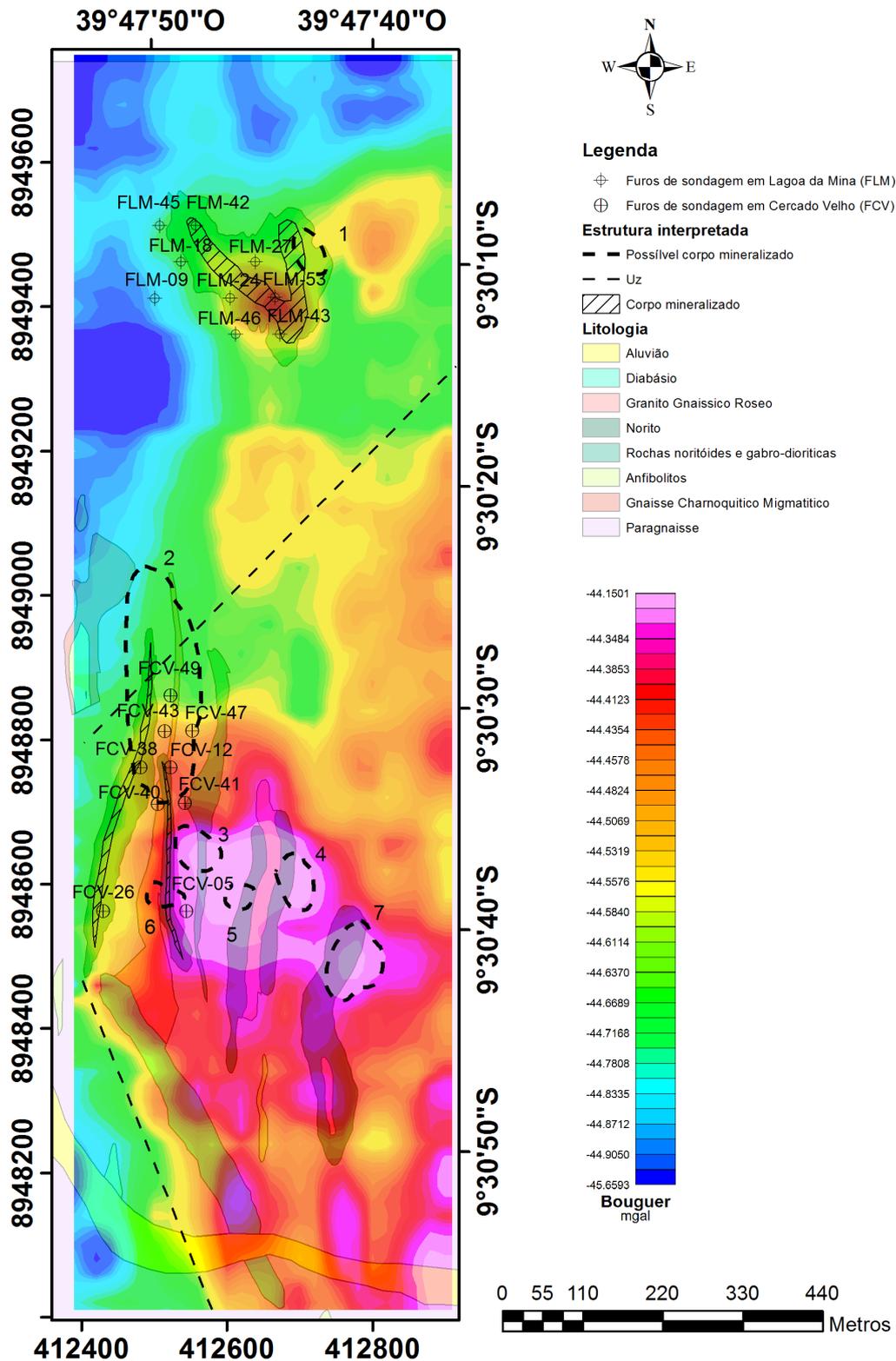


Figura 5.8: Mapa geológico simplificado da Região de Angico sobreposto ao mapa de anomalia Bouguer. Ao Norte temos a anomalia Bouguer associada ao corpo Lagoa da Mina. Ao sul, em Cercado Velho, a zona mineralizada está a oeste da anomalia gravimétrica e parece não ser identificada pelo levantamento. As regiões enumeradas de 1 até 7 são possíveis localidades mineralizadas identificadas pela componente Uzz do tensor, como na figura 5.6.

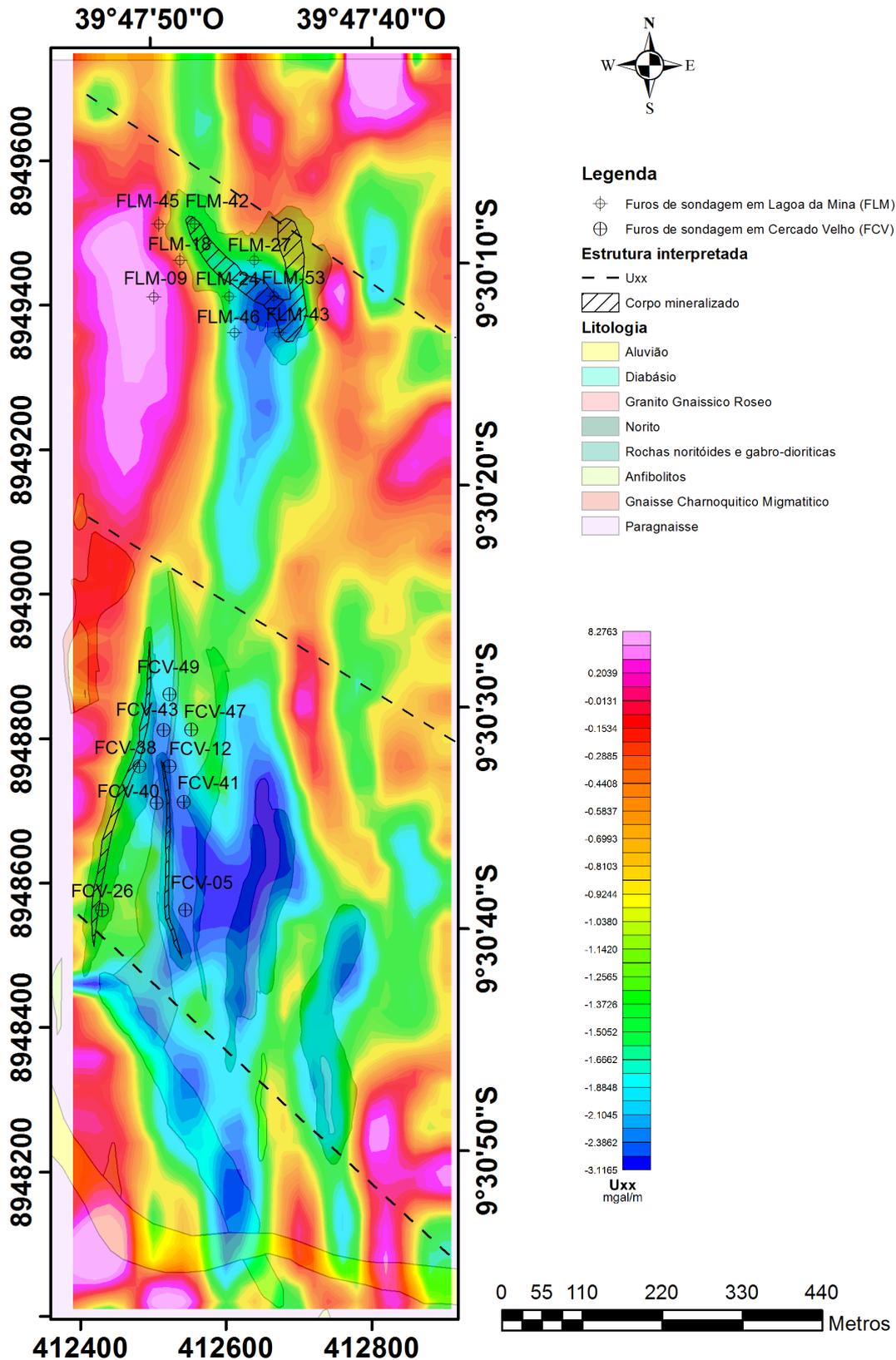


Figura 5.9: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{xx} . Na parte norte, o corpo Lagoa da Mina coincide com a zona mineralizada e mostra o corpo se estendendo para sul da zona conhecida. Na parte sul, no alvo Cercado Velho, os valores baixos da componente U_{xx} coincidem com a zona mineralizada identificada pelos furos FCV-49 e FCV-43.

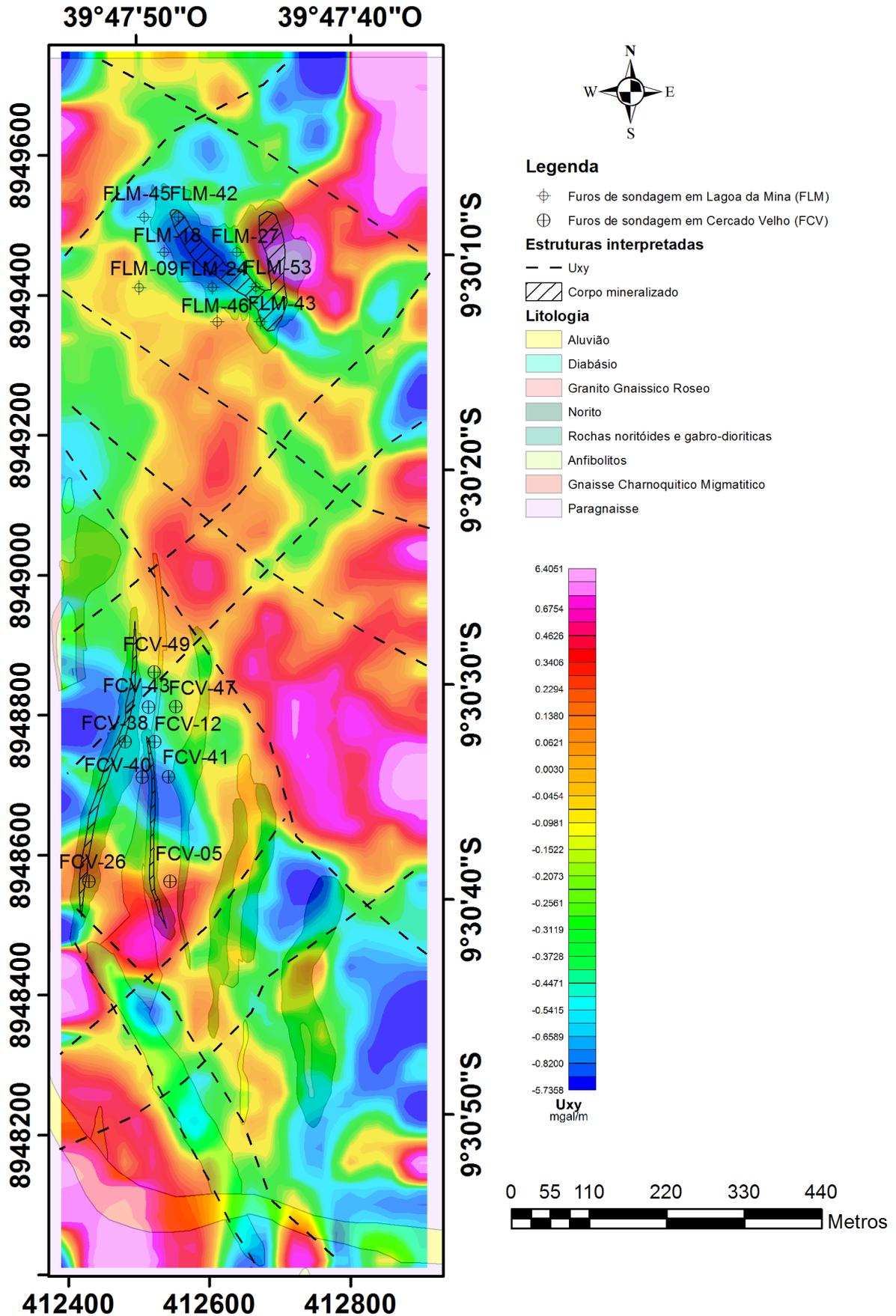


Figura 5.10: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{xy} . Tal componente é útil, principalmente, na identificação de estruturas NW-SE e NE-SW.

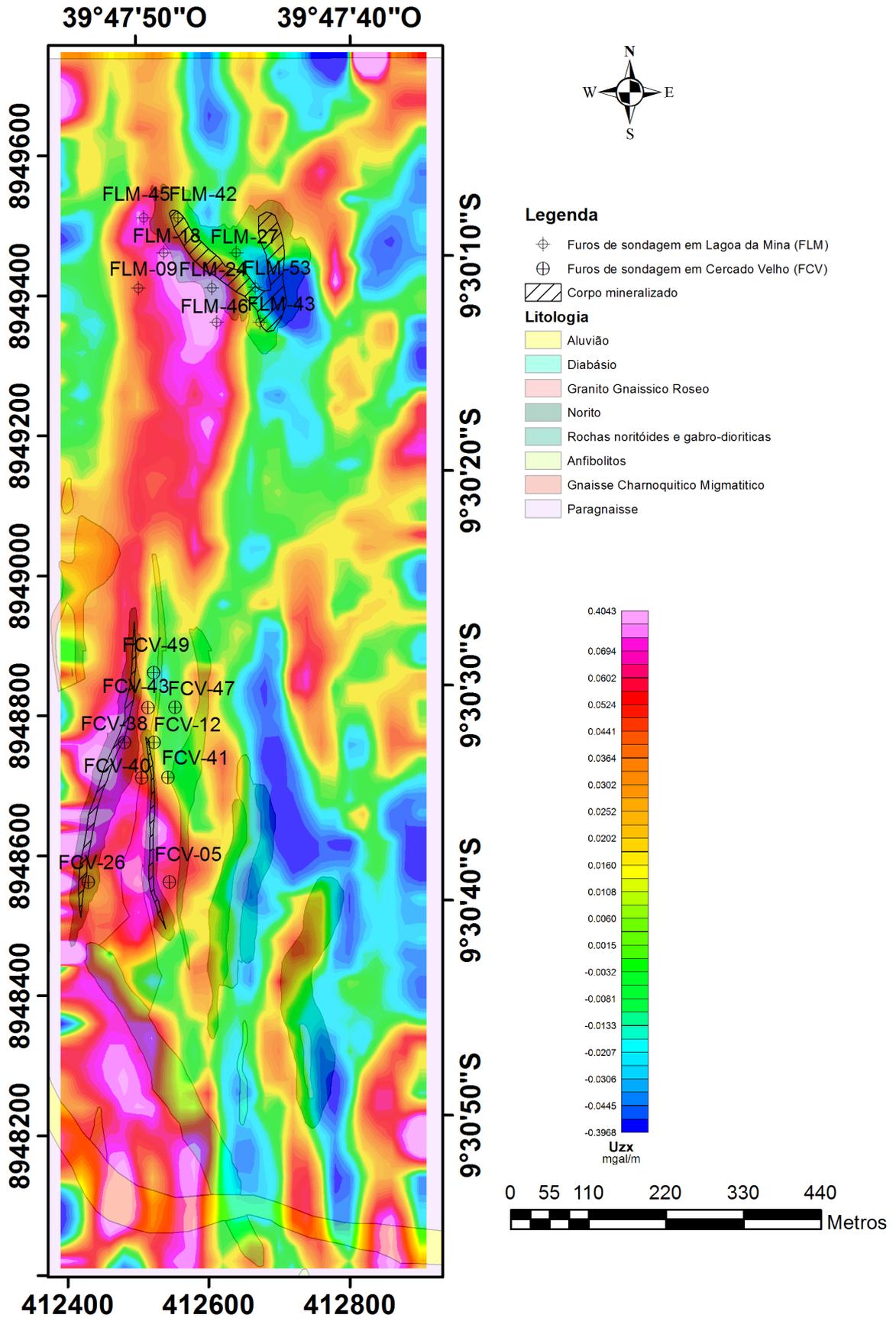


Figura 5.11: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{zx} . Na figura, podemos ver a correlação entre o centro de massa calculado e os corpos da região.

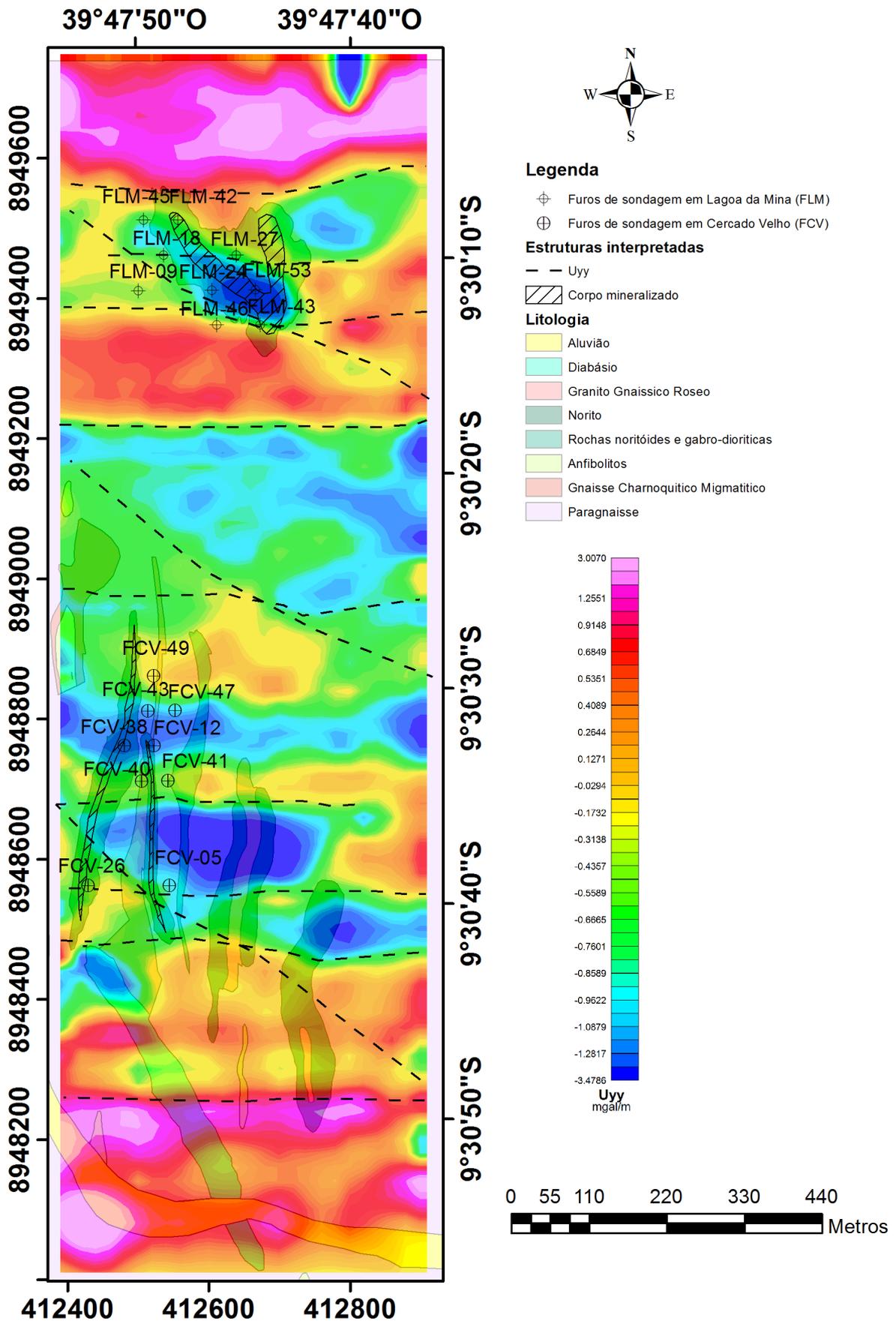


Figura 5.12: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{yy} . O valores baixos de gradiometria, região em azul no mapa, estão associados aos corpos do alvo Angico. Tal componente é útil na identificação de estruturas E-W.

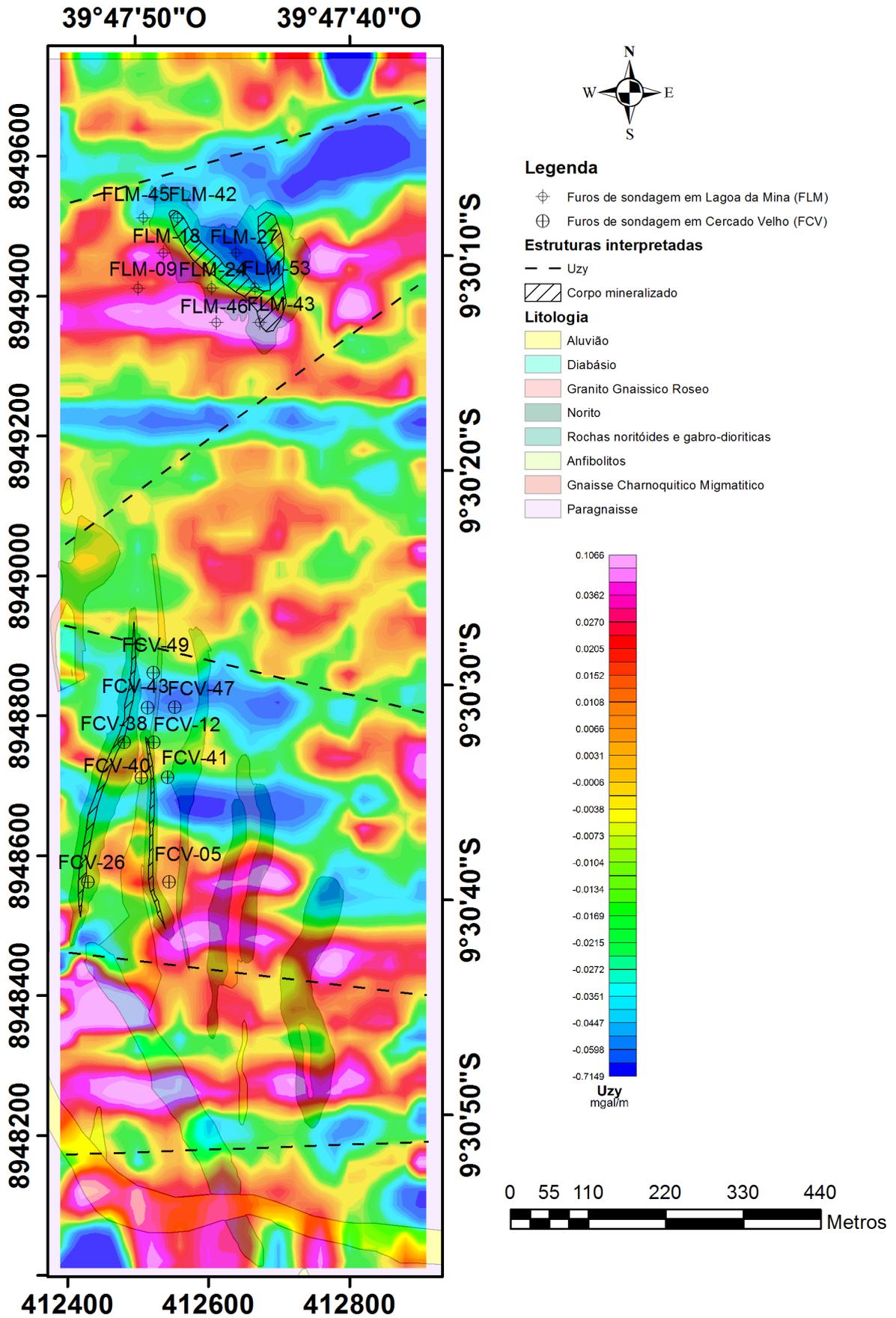


Figura 5.13: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente *Uzy*.

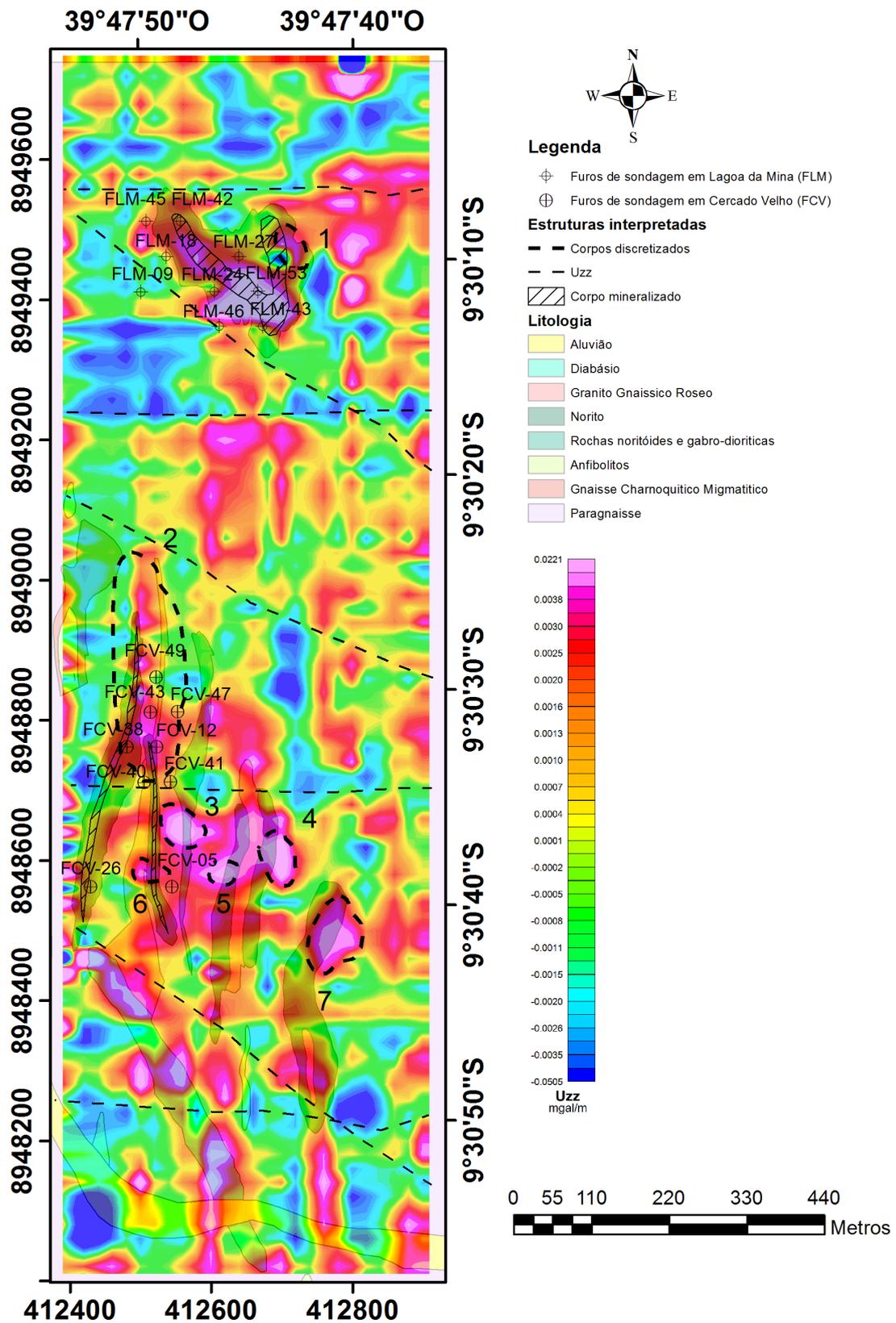


Figura 5.14: Mapa geológico simplificado de Angico sobreposto ao mapa da componente U_{zz} . Observe que as regiões assinaladas em 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 correspondem a corpos discretizados, possivelmente mineralizados, pelo cálculo desta componente.

A partir da análise da figura 5.8 percebemos que a componente vertical da gravidade foi capaz de identificar o alvo Lagoa da Mina, muito embora seus valores sejam relativamente baixos, mesmo estando sobre o corpo mineralizado. Deve-se notar a coerência nas direções dos furos em Lagoa da Mina (FLM). Todos esses furos possuem azimute de 90° , podendo interseccionar tal corpo, a menos de uma geometria muito desfavorável em subsuperfície. Na parte sul da regão, em Cercado Velho, todos os corpos encontram-se representados por uma superfície suave de alto gravimétrico, ou seja, esta componente não é capaz de fornecer informações a respeito da geometria dos corpos geológicos e não encontra-se correlacionada aos corpos mineralizados deste alvo. Todos furos de Cercado Velho (FCV) possuem azimute de 270° , visto que a mineralização está a oeste do alvo. As regiões destacadas em 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, correspondem aos corpos discretizados pela componente Uzz.

Observando o mapa da figura 5.9, vemos que as regiões de baixos valores de gradiometria estão associadas às bordas W-E dos corpos destes alvos. Em Lagoa da Mina, a região de baixos valores apresenta boa correlação com os limites desse corpo. O mesmo ocorre em Cercado Velho, onde é possível perceber que os corpos foram separados em duas estruturas. A estrutura a oeste do alvo, é constituída por um conjunto de corpos noríticos, diabásicos, gabro-dioríticos e graníticos, contendo, ainda, o corpo mineralizado. A estrutura a leste é constituída por corpo norítico e granítico. Ambas as estruturas encontram-se melhor identificadas por esta componente gradiométrica que pela componente vertical da gravidade, apenas.

Observando o mapa da figura 5.10, vemos que esta componente identificou satisfatoriamente o segmento NW-SE do corpo mineralizado em Lagoa da Mina. Já em Cercado Velho, devido à disposição espacial dos corpos, esta componente não traz informações adicionais sobre eles.

Observando o mapa da figura 5.11, vemos que o centro de massa dos corpos, regiões entre um alto e um baixo gradiométrico consecutivo, encontra-se alinhado com os corpos dos alvos. Sobretudo em Cercado Velho, onde é possível correlacioná-los aos corpos ultra-máficos deste alvo.

A partir da análise do mapa da figura 5.12, percebemos que em Lagoa da Mina o baixo gradiométrico está satisfatoriamente correlacionado aos limites N-S deste corpo. Em Cercado Velho, tal fato não se repete por causa da disposição espacial destes corpos.

Observando o mapa da figura 5.13, vemos que em ambos os alvos, esta componente não foi capaz de adicionar informações satisfatoriamente, devido à disposição espacial dos corpos.

Observando o mapa da figura 5.14, percebemos que em Lagoa da Mina, esta componente foi capaz de identificar satisfatoriamente o corpo mineralizado. O mesmo ocorre em Cercado Velho, onde a componente foi capaz de identificar os corpos mineralizados, regiões

delimitadas em 2 e 6. As regiões delimitadas em 1, 3, 4, 5 e 7 correspondem a possíveis unidades mineralizadas nesta região.

CAPÍTULO 6

Conclusões

Com a aplicação do algoritmo escrito neste trabalho aos dados de gravimetria cedidos pela Mineração Caraíba, foi possível extrair novas informações acerca da concentração anômala de densidade das fontes estudadas. A partir da componente U_{xx} foi possível identificar os limites do corpos, bem como falhas e outras estruturas na direção N-S. O mesmo é observado a partir da componente U_{yy} , agora na direção E-W. Da componente U_{xy} observamos falhas e outras estruturas nas direções NW-SE e NE-SW. Entre todas as componentes, a U_{zz} é a que traz resultados mais relevantes, indicando a possibilidade de novos corpos mineralizados que não são destacados pelo mapa Bouguer. Neste mapa, ainda, vemos um certo alinhamento das anomalias com as linhas de levantamento, o que pode ser gerado por desnivelamento na fonte de aquisição, o que não atrapalhou a análise e interpretação dos dados. Entretanto, vale lembrar, como descrito no capítulo 2, que a região possui diversos pontos de mineralização. Desta maneira, este trabalho sugere algumas áreas não exploradas que podem corresponder a novos corpos mineralizados ou mesmo a extensão dos já conhecidos. Além disso, o trabalho valida a importância do método pela análise de tensores aplicados à exploração mineral. Não obstante, este trabalho também se fez importante para o desenvolvimento de um programa de código aberto, escrito em linguagem Fortran, para o cálculo das componentes do tensor gravimétrico que poderá vir a ser utilizado por outros estudantes que se interessem pela área de estudo. O algoritmo encontra-se no apêndice deste trabalho.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que direta ou indiretamente me ajudaram e me ajudam a continuar seguindo em frente. Gostaria de agradecer a minha família, aos meus amigos e a minha noiva, por sempre estarem comigo. Gostaria de agradecer à Mineração Caraíba pela acolhida e por disponibilizar os dados. Gostaria de agradecer ao meu orientado, Prof. Dr. Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos, pela paciência e dedicação conferidas a mim. Quero fazer um agradecimento especial ao Geólogo MSc. Florivaldo Oliveira Sena, o Flori, que “simplesmente” acreditou em mim quando nem eu mesmo acreditava mais! Obrigado a todos!

Referências Bibliográficas

1. Amidror, I. Mastering the Discrete Fourier Transform in One, Two or Several Dimensions: Pitfalls and Artifacts. London: Springer, 388p, 2013. (Series: Computational Imaging and Vision, v.43).
2. Arisoy, M. e Dikmen, U. Potensoft: Matlab-based software for potential field data processing, modeling and mapping. Computers and Geosciences, v.37, p.935–942, 2011.
3. Barbosa, J. S.F.; Sabaté, P. Geological features and the Paleoproterozoic collision of four Archean crustal segments of the São Francisco Craton, Bahia, Brazil. A synthesis. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.74, n.2, p.343-359, 2002.
4. Bell, R. E.; Anderson, R.; Pratson, L. Gravity gradiometry resurfaces. The Leading Edge, New York, v.16, n.1, p.55-60, 1997.
5. Bell, R. E. Gravity Gradiometry. Scientific American, v.278, n.6, p.74-79, 1998.
6. Blakely, R. J. Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications. Australia: Cambridge University Press, 441p, 1996.
7. Brooks, M.; Kearey, P.; Hill, I. Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho. Geofísica de exploração. São Paulo: Oficina de Textos, 430p, 2009.
8. Delgado, I. M.; Souza, J. D. Projeto Cobre - Curaçá: relatório final, geologia econômica do distrito cuprífero do Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Salvador: CPRM; Diretoria de Operações Agência Salvador, v.30, 1975.
9. Holom, D. I.; Oldow, J. S. Gravity reduction spreadsheet to calculate the Bouguer anomaly using standardized methods and constants. Geosphere, v.3, n.2, p.86-90, 2007.
10. Melo, R. C.; Loureiro, H. S. C.; Pereira, L. H. M. (Org.). Serrinha, folha SC.24-Y-D: Estado da Bahia, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 80p, 1995. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
11. Misi, A. et al. Principais domínios metalogenéticos: Cobre do Vale do Rio Curaçá. In: Misi, A.; Teixeira, J. B. G.; Sá, J. H. S. (Coord. e Ed.). Mapa Metalogenético Digital do Estado da Bahia e Principais Províncias Mineraias. Salvador: CBPM, p.157-176, 2012. (Série Publicações especiais, v.11).

12. Murphy, C. A. The Air-FTGTM airborne gravity gradiometer system. In: Workshop de Airborne Gravity, 2004. Australia: ASEG-PESA, v.18, p.7–14, 2014.
13. Rabelo, T. N. et al. Avaliação de imagens multipolarizadas de radar (banda L) do sensor SARR99B para mapeamento geológico no Baixo Vale do Curaçá, Bahia. Revista Brasileira de Geociências, v.38, p.700-714, 2008.
14. Saad, A. H. Understanding gravity gradients — a tutorial. The Leading Edge, n.8, p.942-949, 2006.
15. Seixas, S. R. M. et al. Projeto Bahia II: relatório final; geologia das folhas de Itaberaba e Serrinha. Salvador: CPRM, v.1, 284p, 1975.
16. Teixeira, J. B. G. et al. Depósito de cobre do Vale do Rio Curaçá, Bahia. In: Brito, R. S. C.; Silva, M. G.; Kuyumjian, R. M.(Ed.). Modelos de depósito de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. Brasília: CPRM, p.73-95, 2010. (Programa Geologia do Brasil Recursos Minerais: série Metalogenética).

APÊNDICE A

Códigos Fortran

A.1 Códigos para o cálculo das componentes do tensor gradiométrico.

```
#####  
!      Programa: EXPAND_GRAV.  
!      Expande e preenche a matriz gravidade para o calculo da  
! componente Uzz do tensor gradiometrico.  
!  
#####  
  
implicit none  
real  tgwz(1000,1000),trans_grav(1000,1000)  
real  grdgx1(1000,3),grdgx2(1000,3)  
real  grdgy1(3,1000),grdgy2(3,1000), x1,x2  
real  x(4,4),y(1,4),invx(4,4), c(1,4)  
real  npts, l,m  
integer cdiff, rdiff, i, j, k,n,nc,nr  
data  x/16*0.0/  
cdiff=1  
rdiff=2  
npts=8  
l=4  
m=6  
n=4  
nc=m  
nr=1  
  
open (unit=10, file="gravidade.txt", status="unknown")  
open (unit=11, file="expand_grav.txt", status="unknown")
```

```

!Descricao dos parametros, funcoes e arquivos.

!trans_grav.txt= arquivo contendo os valores de
!gravidade da matriz gravidade lida em campo transpota.
!npts = potencia de dois mais proxima da maior dimensao
!da matriz g.
!l=numero de linhas da matriz trans_grav.
!m=numero de colunas da matriz trans_grav.
!tgwz(npts,npts)=matriz que contera todos os seus
!elemetos iguaia a zero e posteriormente, tera seus
!elementos, convinientemente, trocados por
!elementos da matriz trans_grav.
!trans_grav(l,m)=matriz com os valores de gravidade
!obtidos em campo.
!grdgx1(l,1:3)= Matriz contendo o gradiente da borda da matriz g,
!tomados na direcao do eixo x.
!grdgx2(l,m-2:m)= Matriz contendo o gradiente da
!borda da matriz g tomados na direcao do eixo x.
!invx(4,4)= matriz inversa de x.

!Expasao da matriz g a partir da matriz gwz

do i=1,npts
do j=1,npts
tgwz(i,j)=0
end do
end do

do i=1,l
do j=1,m
read(10,*)trans_grav(i,j)
end do
end do

do i=rdiff+1,rdiff+l
do j=cdiff+1,cdiff+m

tgwz(i,j)=trans_grav(i-rdiff,j-cdiff)
end do
end do

```

```

do i=1,1

grdgx1(i,1)=trans_grav(i,2)-trans_grav(i,1)
grdgx1(i,2)=(trans_grav(i,3)-trans_grav(i,1))/2
grdgx1(i,3)=trans_grav(i,3)-trans_grav(i,2)

end do
do i=1,1
grdgx2(i,nc-2)=trans_grav(i,nc-1)-trans_grav(i,nc-2)
grdgx2(i,nc-1)=(trans_grav(i,nc)-trans_grav(i,nc-2))/2
grdgx2(i,nc)=trans_grav(i,nc)-trans_grav(i,nc-1)
end do

x1=0.0
x2=((2*cdiff)+1)

x(1,1)=1.0
x(1,2)=1.0
x(1,3)=0.0
x(1,4)=0.0
x(2,1)=x1
x(2,2)=x2
x(2,3)=1.0
x(2,4)=1.0
x(3,1)=x1**2
x(3,2)=x2**2
x(3,3)=2*x1
x(3,4)=2*x2
x(4,1)=x1**3
x(4,2)=x2**3
x(4,3)=3*x1**2
x(4,4)=3*x2**2

call matriz_inversa (x,invx,n)

do k=1,1
y(1,1)=trans_grav(k,nc)
y(1,2)=trans_grav(k,1)
y(1,3)=grdgx2(k,nc)
y(1,4)=grdgx1(k,1)
do i=1,4

```

```

c(1,i)=0.0
do j=1,4
c(1,i)=c(1,i)+y(1,j)*invx(j,i)
end do
end do
do j=1, cdiff
tgwz(k+rdiff,j)=c(1,1)+(j+cdiff)*c(1,2)+c(1,3)*(j+cdiff)**2+
&c(1,4)*(j+cdiff)**3
tgwz(k+rdiff, j+nc+cdiff)=c(1,1)+j*c(1,2)+c(1,3)*j**2+c(1,4)*j**3
end do
end do

do j=1,m
grdgy1(1,j)=trans_grav(2,j)-trans_grav(1,j)
grdgy1(2,j)=(trans_grav(3,j)-trans_grav(1,j))/2
grdgy1(3,j)=trans_grav(3,j)-trans_grav(2,j)
end do
do j=1,m
grdgy2(1-2,j)=trans_grav(1-1,j)-trans_grav(1-2,j)
grdgy2(1-1,j)=(trans_grav(1,j)-trans_grav(1-2,j))/2
grdgy2(1,j)=trans_grav(1,j)-trans_grav(1-1,j)
end do
x1=0
x2=(2*rdiff)+1
x(1,1)=1
x(1,2)=1
x(1,3)=0
x(1,4)=0
x(2,1)=x1
x(2,2)=x2
x(2,3)=1
x(2,4)=1
x(3,1)=x1**2
x(3,2)=x2**2
x(3,3)=2*x1
x(3,4)=2*x2
x(4,1)=x1**3
x(4,2)=x2**3
x(4,3)=3*x1**2
x(4,4)=3*x2**2

```

```

call matriz_inversa (x, invx, n)
do k=1, m
y(1,1)=trans_grav(nr, k)
y(1,2)=trans_grav(1, k)
y(1,3)=grdgy2(1, k)
y(1,4)=grdgy1(1, k)
do i=1, 4
c(1, i)=0.0
do j=1, 4
c(1, i)=c(1, i)+y(1, j)*invx(j, i)
end do
end do
do i=1, rdiff
tgwz(i, k+cdiff)=c(1, 1)+(i+rdiff)*c(1, 2)+c(1, 3)*(i+rdiff)**2+
&c(1, 4)*(i+rdiff)**3
tgwz(i+rdiff+1, k+cdiff)=c(1, 1)+i*c(1, 2)+c(1, 3)*i**2+c(1, 4)*i**3
end do
end do

do i=rdiff+1+1, npts
do j=cdiff+m+1, npts
if((i-1-rdiff).gt.(j-m-cdiff)) then
tgwz(i, j)=tgwz(i, m+cdiff)
else
tgwz(i, j)=tgwz(1+rdiff, j)
end if
end do
end do

do i=1, rdiff
do j=1, cdiff
if(i.gt.j) then
tgwz(i, j)=tgwz(rdiff+1, j)
else
tgwz(i, j)=tgwz(i, cdiff+1)
end if
end do
end do

do i=1, rdiff
do j= cdiff+m+1, npts
if(i.gt.(npts-j)) then

```

```

tgwz(i,j)=tgwz(rdifff+1,j)
else
tgwz(i,j)=tgwz(i,cdifff+m)
end if
end do
end do

do i=rdifff+1+1,npts
do j=1,cdifff
if((npts-i).gt.j) then
tgwz(i,j)=tgwz(rdifff+1,j)
else
tgwz(i,j)=tgwz(i,cdifff+1)
end if
end do
end do

do i=1, npts
do j=1,npts
write (11,*)tgwz(i,j)
end do
end do

close(10)
close(11)
stop
end

!#####
!      Programa: EXPAND_GRAV.
!      Expande e preenche a matriz gravidade para o calculo da
!componente Potencial gravitacional, ou seja, integra a gravidade.
!
!#####

implicit none

real tgwz(1000,1000),trans_grav(1000,1000)
real grdgx1(1000,3),grdgx2(1000,3)
real grdgy1(3,1000),grdgy2(3,1000), x1,x2
real x(4,4),y(1,4),invx(4,4), c(1,4)

```

```

real npts, l,m
integer cdiff, rdiff, i, j, k,n,nc,nr
data x/16*0.0/

cdiff=3
rdiff=5
npts=16
l=6
m=9
n=4
nc=m
nr=1

open (unit=10, file="trans_grav.txt", status="unknown")
open (unit=11, file="taper_grav.txt", status="unknown")

do i=1,npts
do j=1,npts
tgwz(i,j)=0
end do
end do

do i=1,l
do j=1,m
read(10,*)trans_grav(i,j)
end do
end do

do i=rdiff+1,rdiff+l
do j=cdiff+1,cdiff+m
tgwz(i,j)=trans_grav(i-rdiff,j-cdiff)
end do
end do

do i=1,l

grdgx1(i,1)=trans_grav(i,2)-trans_grav(i,1)
grdgx1(i,2)=(trans_grav(i,3)-trans_grav(i,1))/2
grdgx1(i,3)=trans_grav(i,3)-trans_grav(i,2)

end do

```

```

do i=1,1

grdgx2(i,nc-2)=trans_grav(i,nc-1)-trans_grav(i,nc-2)
grdgx2(i,nc-1)=(trans_grav(i,nc)-trans_grav(i,nc-2))/2
grdgx2(i,nc)=trans_grav(i,nc)-trans_grav(i,nc-1)

end do

x1=0.0
x2=((2*cdiff)+1)

x(1,1)=1.0
x(1,2)=1.0
x(1,3)=0.0
x(1,4)=0.0
x(2,1)=x1
x(2,2)=x2
x(2,3)=1.0
x(2,4)=1.0
x(3,1)=x1**2
x(3,2)=x2**2
x(3,3)=2*x1
x(3,4)=2*x2
x(4,1)=x1**3
x(4,2)=x2**3
x(4,3)=3*x1**2
x(4,4)=3*x2**2

call matriz_inversa (x,invx,n)

do k=1,1

y(1,1)=trans_grav(k,nc)
y(1,2)=trans_grav(k,1)
y(1,3)=grdgx2(k,nc)
y(1,4)=grdgx1(k,1)

do i=1,4
c(1,i)=0.0
do j=1,4
c(1,i)=c(1,i)+y(1,j)*invx(j,i)

```

```

end do
end do

do j=1, cdiff

tgwz(k+rdiff,j)=c(1,1)+(j+cdiff)*c(1,2)+c(1,3)*(j+cdiff)**2+
&c(1,4)*(j+cdiff)**3

tgwz(k+rdiff, j+nc+cdiff)=c(1,1)+j*c(1,2)+c(1,3)*j**2+c(1,4)*j**3

end do
end do

do j=1,m
grdgy1(1,j)=trans_grav(2,j)-trans_grav(1,j)
grdgy1(2,j)=(trans_grav(3,j)-trans_grav(1,j))/2
grdgy1(3,j)=trans_grav(3,j)-trans_grav(2,j)
end do

do j=1,m
grdgy2(1-2,j)=trans_grav(1-1,j)-trans_grav(1-2,j)
grdgy2(1-1,j)=(trans_grav(1,j)-trans_grav(1-2,j))/2
grdgy2(1,j)=trans_grav(1,j)-trans_grav(1-1,j)
end do

x1=0
x2=(2*rdiff)+1

x(1,1)=1
x(1,2)=1
x(1,3)=0
x(1,4)=0
x(2,1)=x1
x(2,2)=x2
x(2,3)=1
x(2,4)=1
x(3,1)=x1**2
x(3,2)=x2**2
x(3,3)=2*x1
x(3,4)=2*x2
x(4,1)=x1**3
x(4,2)=x2**3

```

```

x(4,3)=3*x1**2
x(4,4)=3*x2**2

call matriz_inversa (x,invx,n)

do k=1,m
y(1,1)=trans_grav(nr,k)
y(1,2)=trans_grav(1,k)
y(1,3)=grdgy2(1,k)
y(1,4)=grdgy1(1,k)

do i=1,4
c(1,i)=0.0
do j=1,4
c(1,i)=c(1,i)+y(1,j)*invx(j,i)

end do

end do

do i=1,rdiff
tgwz(i,k+cdiff)=c(1,1)+(i+rdiff)*c(1,2)+c(1,3)*(i+rdiff)**2+
&c(1,4)*(i+rdiff)**3

tgwz(i+rdiff+1, k+cdiff)=c(1,1)+i*c(1,2)+c(1,3)*i**2+c(1,4)*i**3

end do
end do

do i=rdiff+1+1,npts
do j=cdiff+m+1,npts
if((i-1-rdiff).gt.(j-m-cdiff)) then
tgwz(i,j)=tgwz(i,m+cdiff)
else
tgwz(i,j)=tgwz(1+rdiff,j)
end if
end do
end do

do i=1,rdiff
do j=1,cdiff
if(i.gt.j) then

```

```

tgwz(i,j)=tgwz(rdifff+1,j)
else
tgwz(i,j)=tgwz(i,cdifff+1)
end if
end do
end do

```

```

do i=1,rdifff
do j= cdifff+m+1,npts
if(i.gt.(npts-j)) then
tgwz(i,j)=tgwz(rdifff+1,j)
else
tgwz(i,j)=tgwz(i,cdifff+m)
end if
end do
end do

```

```

do i=rdifff+1+1,npts
do j=1,cdifff
if((npts-i).gt.j) then
tgwz(i,j)=tgwz(rdifff+1,j)
else
tgwz(i,j)=tgwz(i,cdifff+1)
end if
end do
end do

```

```

do i=1, npts
do j=1,npts
write (11,*)tgwz(i,j)
end do
end do

```

```

close(10)
close(11)
stop
end

```

```

!##### Subroutine #####
!  

!Calcula a inversa de uma matriz por eliminacao gaussiana.  

!
```

```
!#####
```

```

subroutine matriz_inversa (matriz,inversa,n)
implicit none
integer :: n
real, dimension (n,n):: matriz
real, dimension (n,n):: inversa
integer:: i,j,k
integer:: inver=1
real::m
real, dimension (n,2*n)::mat_aumen
do i =1,n
do j = 1, 2*n
if (j<=n) then
mat_aumen (i,j) = matriz(i,j)
else if ((i+n) == j) then
mat_aumen (i,j) = 1
else
mat_aumen (i,j) = 0
end if
end do
end do

do k=1,n-1
if (abs (mat_aumen(k,k)) <= 1.0E-6) then
inver = 0
do i=k+1,n
if (abs(mat_aumen(i,k))>1.0E-6) then
do j = 1,2*n
mat_aumen(k,j)=mat_aumen(k,j)+mat_aumen(i,j)
end do
inver=1
exit
end if
if (inver==0 ) then
write(*,'(/,x,A,/)' )'A_matriz_nao_e_inverstivel!'
inver=0
stop
end if
end do
end if
do j = k + 1,n

```

```

m=mat_aumen(j,k)/mat_aumen(k,k)
do i = k, 2*n
mat_aumen(j,i)=mat_aumen(j,i)-m*mat_aumen(k,i)
end do
end do
end do
do i = 1 , n
if (abs(mat_aumen(i,i))<= 1.0E-6) then
write (*,'(/,x,A,/)' )'A_matriz_nao_e_inverstivel!'
inver = 0

stop
end if
end do
do i = 1 , n
m=mat_aumen ( i , i )
do j=i,2*n
mat_aumen(i,j)=mat_aumen(i,j)/m
end do
end do

do k = n-1 , 1 , -1
do i = 1 , k
m = mat_aumen ( i , k+1)
do j = k , 2 * n
mat_aumen(i,j)=mat_aumen(i,j)-mat_aumen(k+1,j)*m
end do
end do
end do

do i =1, n
do j = 1 , n
inversa ( i , j ) = mat_aumen ( i , j + n )
end do
end do
return
end

!#####
!          Programa: CMPLX
!          Transforma os dados reais em complexo

```

```

#####

implicit none
real, dimension(:), allocatable:: gwz
integer i,npts

complex, dimension(:), allocatable:: gwzc

open (unit=10, file="taper_grav.txt", status="unknown")
open (unit=11, file="gwzc.txt", status="unknown")

write(*,*)"Entre com o valor de npts"
read(*,*)npts

allocate(gwz(npts*npts),gwzc(npts*npts))

do i=1,npts*npts
read(10,*)gwz(i)
gwzc(i)=gwz(i)
write (11,*)gwzc(i)
end do

deallocate(gwz,gwzc)

stop
end

#####
!
!Programa: FFT2D
!Passa os parametros para a subroutine fourt retirada
! de RICHARD J. BLAKELY
!
#####

implicit none
complex, dimension(:), allocatable :: gwzc , work
integer nn(2),npts,i, ndim,isign,iform

open (unit=10, file="gwzc.txt", status="unknown")
open (unit=11, file="Tgwzc.txt", status="unknown")

```

```

write(*,*)"Entre com o valor de npts"
read(*,*)npts
nn(1)=npts
nn(2)=npts
ndim=2

allocate (gwzc(npts*npts),work(2*npts*npts))

do i=1,npts*npts
read (10,*)gwzc(i)
end do

isign=-1
iform=0

call fourt (gwzc, nn, ndim,isign,iform,work)

do i=1,npts*npts
write(11,*) gwzc(i)
end do

deallocate (gwzc,work)

close(10)
close(11)
stop
end

!#####
!Programa FFTSHIFT
!Faz a transformada FFTSHIFT de uma matriz de dados
! qualquer ordem
!#####

complex, dimension(:,:), allocatable::a,b
integer l,m,f,v,c,bb,aa,ss,npts
real ll,mm

write (*,*)"De qual documento deseja calcular a FFTSHIFT?"
write (*,*)"Para calcular do documento Tgwzc, tecle 1"

```

```

write (*,*)"Para calcular do documento fz, tecla 2"
read(*,*)ss
write (*,*)"Entre com o valor de npts"
read(*,*)npts

l=npts
m=npts
allocate(a(l,m),b(l,m))

if (mod(l,2)==0) then
bb =1
else
bb=0
end if

if (mod(m,2)==0) then
c=1
else
c=0
end if
aa=bb
bb=c
c=aa
ll=l
mm=m
f = ceiling(ll/2)
v= ceiling(mm/2)

if(ss.eq.1) then
open(unit=10,file='Tgwzc.txt',status='unknown')
open(unit=11,file='shift_Tgwzc.txt',status='unknown')

do i=1,l
do j=1,m
if (i.lt.f.and.j.lt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.lt.f.and.j.eq.v) then
read(10,*)a(i,j)

```

```
end if

if (i.lt.f.and.j.gt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.eq.f.and.j.lt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.eq.f.and.j.eq.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.eq.f.and.j.gt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.gt.f.and.j.lt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.gt.f.and.j.eq.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

if (i.gt.f.and.j.gt.v) then
read(10,*)a(i,j)
end if

end do
end do

do i=1,l
do j=1,m

if (i.lt.f.and.j.lt.v) then
b(i,j)=a(i+f,j+v)
end if

if (i.lt.f.and.j.eq.v) then
b(i,j)=a(i+f,j-v+1+2*v*bb -1*bb)
```

```

end if

if (i.lt.f.and.j.gt.v)then
b(i,j)=a(i+f, j-v+1-bb)
end if

if (i.eq.f.and.j.lt.v)then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c, j+v)
end if

if (i.eq.f.and.j.eq.v)then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c, j-v+1+2*v*bb -1*bb)
end if

if (i.eq.f.and.j.gt.v)then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c, j-v+1-bb)
end if

if (i.gt.f.and.j.lt.v)then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c, j+v)
end if

if (i.gt.f.and.j.eq.v)then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c, j-v+1+2*v*bb -1*bb)
end if

if (i.gt.f.and.j.gt.v)then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c, j-v+1-bb)
end if

write(11,*)b(i,j)

end do
end do

else

open(unit=12, file='fz.txt', status='unknown')
open(unit=13, file='shift_fz.txt', status='unknown')

do i=1,l
do j=1,m

```

```
if (i.lt.f.and.j.lt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.lt.f.and.j.eq.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.lt.f.and.j.gt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.eq.f.and.j.lt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.eq.f.and.j.eq.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.eq.f.and.j.gt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.gt.f.and.j.lt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.gt.f.and.j.eq.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
if (i.gt.f.and.j.gt.v) then
read(12,*)a(i,j)
end if
```

```
end do
end do
```

```
do i=1,l
```

```

do j=1,m

if (i.lt.f.and.j.lt.v) then
b(i,j)=a(i+f,j+v)
end if

if (i.lt.f.and.j.eq.v) then
b(i,j)=a(i+f,j-v+1+2*v*bb -1*bb)
end if

if (i.lt.f.and.j.gt.v) then
b(i,j)=a(i+f, j-v+1-bb)
end if

if (i.eq.f.and.j.lt.v) then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c,j+v)
end if

if (i.eq.f.and.j.eq.v) then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c,j-v+1+2*v*bb -1*bb)
end if

if (i.eq.f.and.j.gt.v) then
b(i,j)=a(i-f+1+2*f*c-1*c,j-v+1-bb)
end if

if (i.gt.f.and.j.lt.v) then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c,j+v)
end if

if (i.gt.f.and.j.eq.v) then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c,j-v+1+2*v*bb -1*bb)
end if

if (i.gt.f.and.j.gt.v) then
b(i,j)=a(i-f+1-1*c,      j-v+1-bb)
end if

write(13,*)b(i,j)

end do
end do

```

```

end if

deallocate(a,b)

close(10)
close(11)
close(12)
close(13)
stop
end

#####
!Programa GERA_K
!Gera os numeros de onda k
!Autor: adaptada de RICHARD J. BLAKELY
!#####

implicit none

real, dimension(:,:), allocatable :: freq,freq1,flipud_freq1
real, dimension(:,:), allocatable :: flip_lr_ud_freq1
real, dimension(:,:), allocatable :: freq2,flipud_freq2
real, dimension(:,:), allocatable :: freq3,fliplr_freq3

integer dx,dy,nyqx,nyqy,i,j,npts,nqx,nqy
real dkx,dky,pi,freqx,freqy
open(unit=10, file="freq.txt", status="unknown")
write(*,*)"Entre com os valores de npts"
read(*,*)npts

pi = 3.14159265359
dx=1
dy=1
dkx = 2.0*pi/(npts*dx)
dky = 2.0*pi/(npts*dy)
nyqx = (npts/2)+1
nyqy = (npts/2)+1

allocate(freq(npts,npts),freq1(nyqx,nyqy),flipud_freq1(nyqx,nyqy))
allocate(flip_lr_ud_freq1(nyqx,nyqy))

```

```

allocate(freq2(nyqx,npts-nyqy),flipud_freq2(nyqx,npts-nyqy))
allocate (freq3(npts-nyqx,nyqy),fliplr_freq3(npts-nyqx,nyqy))

do i= 1,npts
do j=1,npts
if(i.le.nyqx) then
freqx=(i-1)*dkx
else
freqx=(i-nyqx-1)*dkx
end if
if(j.le.nyqy) then
freqy=(j-1)*dky
else
freqy=(j-nyqy-1)*dky
end if
freq(i,j)=sqrt(freqx*freqx+freqy*freqy)
end do
end do

do i=1,nyqx
do j=1,nyqy
freq1(i,j)=freq(i,j)
end do
end do

call flipud(freq1,nyqx,nyqy,flipud_freq1)
call fliplr(flipud_freq1,nyqx,nyqy,flip_lr_ud_freq1)

do i=1,nyqx
do j=1,nyqy
freq(i,j)=flip_lr_ud_freq1(i,j)
end do
end do

do i=1,nyqx
do j=nyqy+1,npts
freq2(i,j-nyqy)=freq(i,j)
end do
end do

nqy=npts-nyqy

```

```

call flipud(freq2,nyqx,nqy,flipud_freq2)

do i=1,nyqx
do j=nyqy+1,npts
freq(i,j)=flipud_freq2(i,j-nyqy)
end do
end do

do i=nyqx+1,npts
do j=1,nyqy
freq3(i-nyqx,j)=freq(i,j)
end do
end do

nqx=npts-nyqy

call fliplr(freq3,nqx,nyqy,fliplr_freq3)

do i=nyqx+1,npts
do j=1,nyqy
freq(i,j)=fliplr_freq3(i-nyqx,j)
end do
end do

do i=1,npts
do j=1,npts
write(10,*)freq(i,j)
end do
end do

deallocate(freq,freq1,flipud_freq1)
deallocate(flip_lr_ud_freq1)
deallocate(freq2,flipud_freq2)
deallocate (freq3,fliplr_freq3)

close(10)
stop
end

subroutine fliplr(flipud_freq1,nyqx,nyqy,flip_lr_ud_freq1)

```

```

real flipud_freq1(nyqx,nyqy), flip_lr_ud_freq1(nyqx,nyqy)
integer i,j, ll,mm
ll=nyqx
mm=nyqy

```

```

do i=1,ll
do j=1,mm
flip_lr_ud_freq1(i,j)=flipud_freq1(i,mm+1-j)
end do
end do

```

```

return
end

```

```

subroutine flipud(freq1,nyqx,nyqy,flipud_freq1)

```

```

real freq1(nyqx,nyqy), flipud_freq1(nyqx,nyqy)
integer i,j, ll,mm
ll=nyqx
mm=nyqy

```

```

do i=1,ll
do j=1,mm
flipud_freq1(i,j)=freq1(ll+1-i,j)
end do
end do

```

```

return
end

```

```

!#####
!Programa MULT_FREQ_FFTSHIFT
!Faz a multiplicacao da transformada FFTSHIFT pelas frequencias
!#####

```

```

implicit none

```

```

complex fz(1000,1000), f(1000,1000)
real freq(1000,1000)
integer npts,i,j,ordem

```

```

open (unit=10, file="freq.txt", status="unknown")
open (unit=11, file="shift_Tgwzc.txt", status="unknown")
open (unit=12, file="fz.txt", status="unknown")

write(*,*)"Entre com o valor de npts"
read(*,*)npts

ordem =1
do i=1,npts
do j=1,npts
read (10,*)freq(i,j)
read(11,*)f(i,j)

fz(i,j)=f(i,j)*(freq(i,j)**ordem)

write(12,*)fz(i,j)

end do
end do

close(10)
close(11)
close(12)

stop
end

#####
!Programa IMPRIME_Uzz
!Imprime a componente Uzz do tensora FFTSHIFT pelas frequencias
!#####

implicit none

complex,dimension(:,:),allocatable:: invfz
integer npts,rdiff,cdiff,l,m,i,j
real,dimension(:,:),allocatable:: dz

open (unit=10, file="inv_shift_fz.txt", status="unknown")

```

```

open (unit=11, file="TZZ.txt", status="unknown")

write(*,*)"Entre com os valores de npts, cdiff e rdiff, nesta ordem"
read(*,*)npts,cdiff,rdiff

write(*,*)"Entre com o numero de linhas e colunas da matriz gravidade"
read(*,*)l,m

allocate(invfz(npts,npts),dz(l,m))

do i=1,npts
do j=1,npts
read(10,*)invfz(i,j)
end do
end do

do i=1+rdiff,l+rdiff
do j=1+cdiff,m+cdiff
dz(i-rdiff,j-cdiff)=real (invfz(i,j))
write(11,*)      dz(i-rdiff,j-cdiff)
end do
end do

deallocate(invfz,dz)

close(10)
close(11)

stop
end

#####
!Programa CALC_TRANSP
!Transpoem a matriz gravidade
#####

implicit none

real trans_grav(100,100)
integer l,m,i,j

```

```
write(*,*)"Entre com o numero de linhas e colunas da matriz gravida

open (unit=10, file="Pot.txt", status="unknown")
open (unit=11, file="dz.txt", status="unknown")

read(*,*)l
read(*,*)m

do j=1,l
do i=1,m
read (10,*)trans_grav(i,j)
write(11,*)trans_grav(i,j)
end do
end do

do i=1,m
do j=1,l
write(11,*)trans_grav(i,j)
end do
end do

stop
end
```