

8.1 Resumo

O complexo alcalino de Jacupiranga consiste numa das maiores jazidas carbonatíticas do Brasil. Vários estudos tiveram Jacupiranga como tema, ex. Hung et al. (1994) entre outros trabalhos de geologia e geoquímica, e de geofísica (Rosales, 1999).

Razões iniciais dos isótopos Sr, Nd, Pb e a correlação negativa entre os isótopos de Pb e Sr indicam que Jacupiranga possui similaridades com o magma basáltico com alta concentração de Ti na Bacia do Paraná, bem como com as rochas constituintes de Tristão da Cunha (Hung et al., 1994).

Rosales (1999) apresenta o modelo 2.5 D do complexo; apesar de ser um trabalho de gravimetria mais completo do que o aqui apresentado faz-se necessário um estudo tridimensional para obter informações do alojamento e dos vínculos estruturais. Para o modelo 3D apresentado nesse trabalho utilizou-se o programa IGMAS (Gotzel & Lahmeyer, 1988).

8.2 Introdução

O complexo de Jacupiranga está localizado aproximadamente a 200 km SW do município de São Paulo, compondo uma intrusão máfica – ultrabásica alcalina, com formato em superfície elíptica, com 10,5 x 6,7 km² e orientada na direção NNW, situada no domínio Apiaí (Campanha & Sadowsky, 1999). O complexo é composto basicamente por piroxenito (jacupiranguito), peridotitos e ijolitos, intrudidos em rochas graníticas-gnaíssicas que formam o embasamento

Precambriano. O mapa geológico é observado na Figura 8.1, sendo verificada ao seu redor uma rica zona fenitizada. Datações por Potássio-Argônio revelam idades de 130 Ma correspondendo ao período do Cretáceo inferior (Neocomiano).

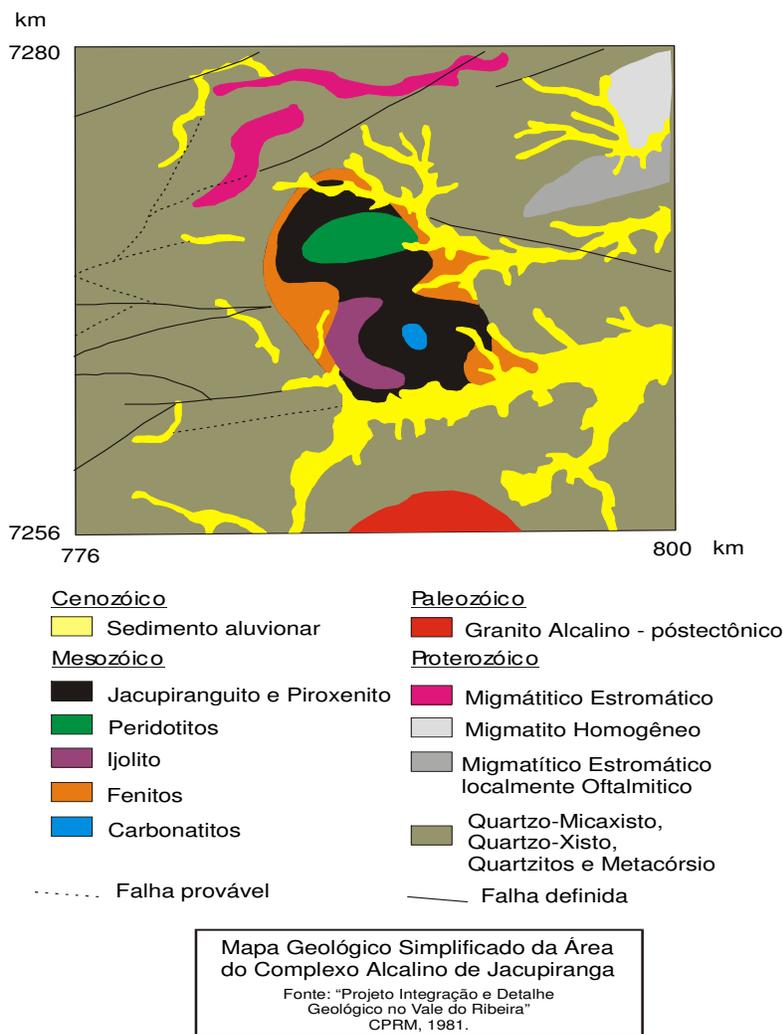


Figura 8.1. Mapa geológico do complexo alcalino de Jacupiranga.

O piroxenito é intrudido por ijolitos e por um corpo carbonatítico alongado. Enxames de diques e pequenas intrusivas, apresentando plagioclásios, situam-se ao redor ou cortando as principais litologias. Essas rochas são compostas por

clinopiroxênios, mela-gabros à quartizo-monzonito e quartzo sienitos. (Gaspar, 1989)

O complexo alcalino de Jacupiranga, já havia sido modelado através de dados gravimétricos por Rosales (1999), usando geometria 2.5D. As densidades usadas no modelamento foram correlacionadas com os litotipos mais comuns do complexo: jacupiranguito e piroxenito ($3,54 \text{ g/cm}^3$), peridotito ($3,26 \text{ g/cm}^3$), carbonatito ($2,8 \text{ g/cm}^3$), fenito ($2,93 \text{ g/cm}^3$) e o ijolito ($3,31 \text{ g/cm}^3$); o valor utilizado para a densidade da rocha encaixante foi de $2,7 \text{ g/cm}^3$. A máxima profundidade obtida no modelo de Rosales (1999) foi de aproximadamente 7 km para o jacupiranguito e piroxenito.

8.3 Gravimetria

Os dados gravimétricos foram coletados em diversas ocasiões entre os anos de 1997 e 1998, ao longo de estradas e trilhas, constituindo o banco de dados usado por Rosales (1999). A distribuição espacial das estações foi concretizada para a investigação em escala de semi-detalhe, sendo plenamente satisfatória para os objetivos de se modelar com geometria 3D.

O campo anômalo Bouguer é mostrado na Figura 8.2, conjuntamente com o residual Bouguer obtido através do método da omissão (Mantovani et al., un publ.; vide capítulo II da tese). A malha para confecção do mapa, referente a cada estação de medida, foi interpolada para obtenção de uma distribuição espacial regular de dados. O interpolador empregado foi o de mínima curvatura com máxima tensão nas bordas e intervalo de amostragem de 200 m.

8.4 Modelo 3D

O modelo 3D de Jacupiranga foi obtido através do programa IGMAS, para uma densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$ supondo um corpo homogêneo de formato irregular. O valor de densidade empregado visou determinar os extremos do intervalo de profundidade da alcalina. Os campos observado e modelado são visualizados conjuntamente na Figura 8.3.

A análise estatística do modelo 3D é verificada na Figura 8.4, juntamente com o mapa de resíduos entre os campos observado e modelado. As máximas discrepâncias nos resíduos ocorrem fora do limite espacial da alcalina, onde apenas 3% dos dados possuem resíduos superior 2 mGal. A média dos resíduos está deslocada de cerca de 2 mGal do valor ideal, zero mGal, por não se ter modelado o campo ao redor. A correlação entre ambos os campos é de 99% e o desvio padrão está dentro do intervalo de incertezas dos dados.

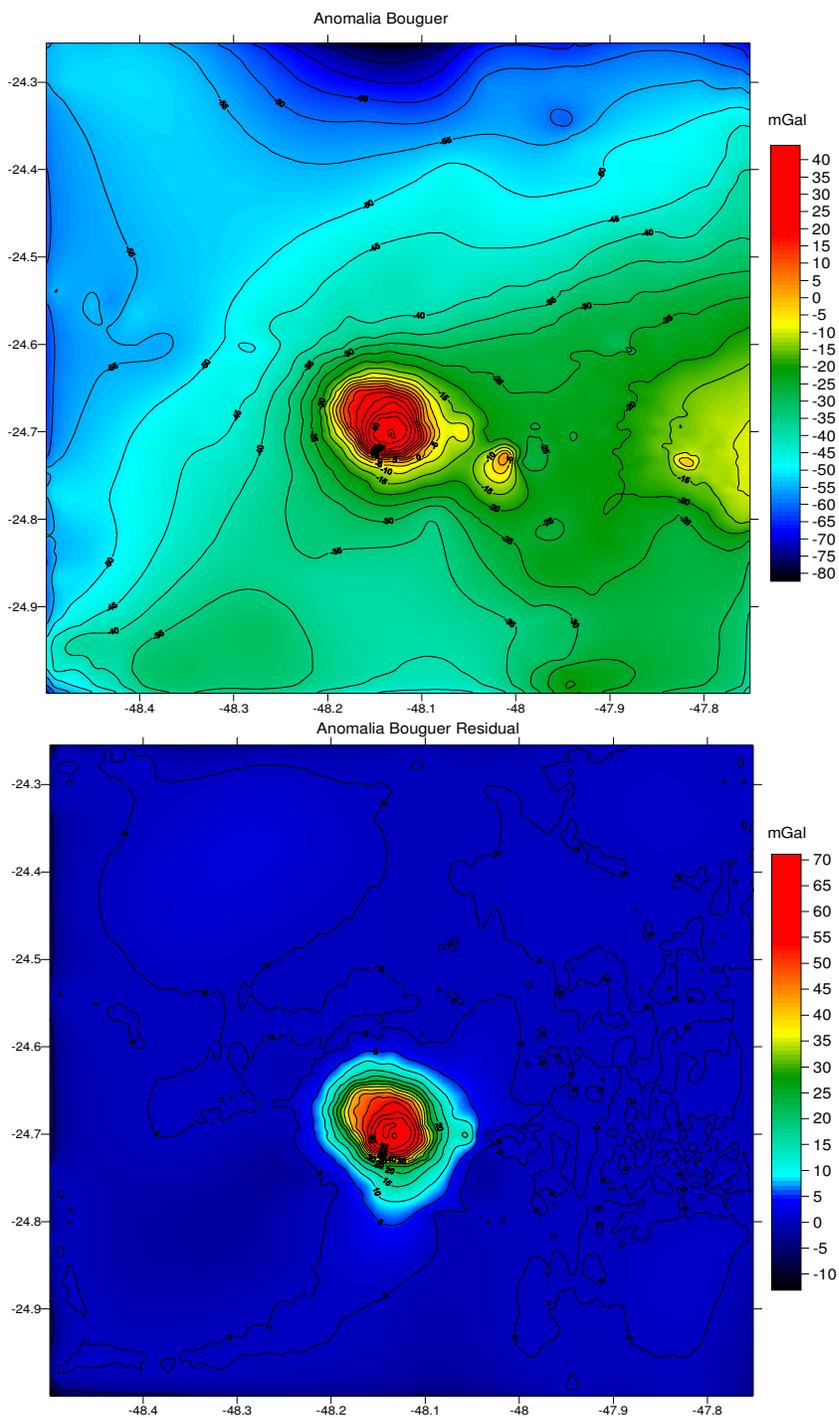


Figura 8.2. Anomalia Bouguer observada para a alcalina de Jacupiranga e a sua anomalia residual Bouguer. Obteve-se o residual a partir da ausência (eliminação) de estações sobre a intrusão.

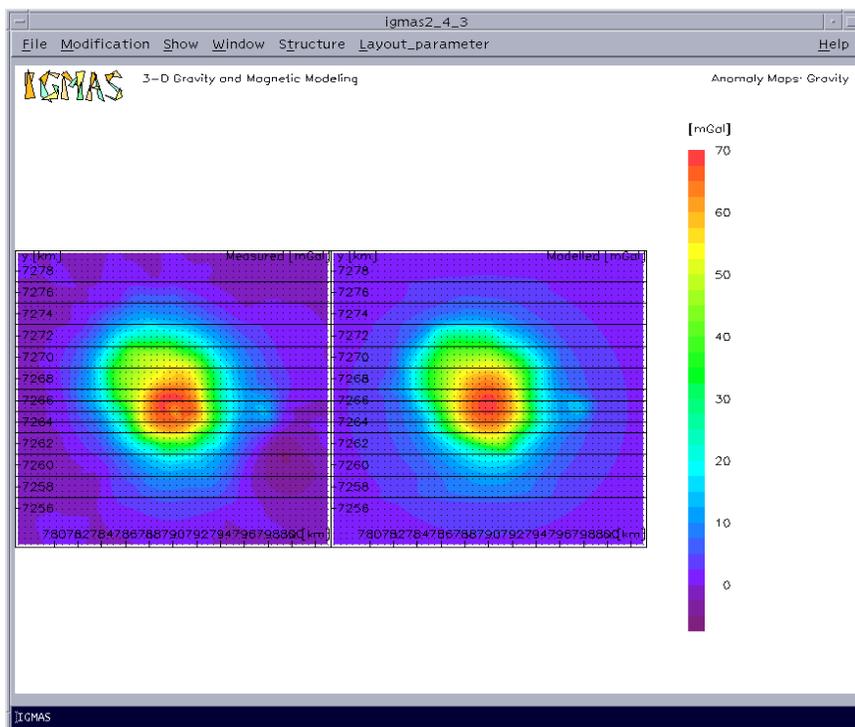


Figura 8.3. Anomalia Bouguer observada (à direita) e modelada (à esquerda) para corpo homogêneo de geometria 3D, com densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$ e encaixante de $2,67 \text{ g/cm}^3$.

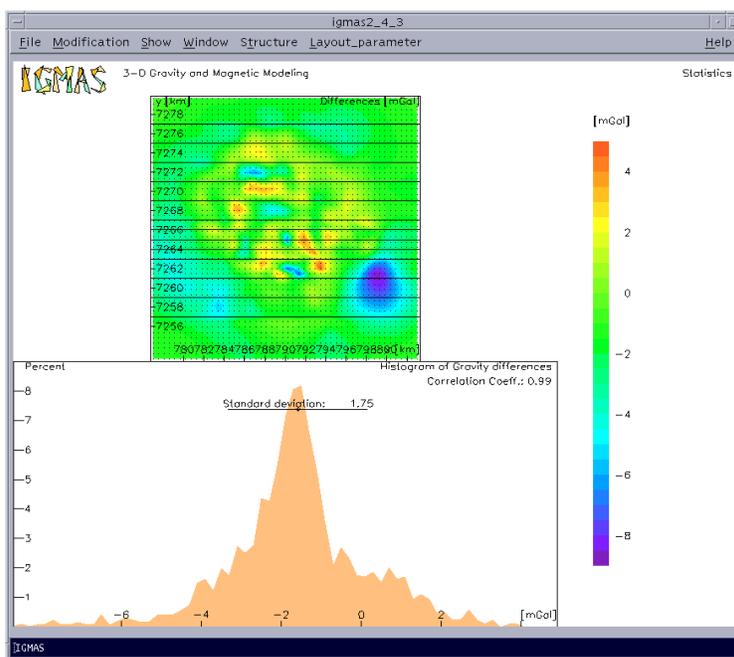


Figura 8.4. Estatística do modelo 3D do complexo alcalino de Jacupiranga.

A curva de “isópacas” referente ao modelo 3D está na Figura 8.5, sendo a máxima profundidade da alcalina da ordem de 16 km. O valor apresenta-se discordante daquele obtido por Rosales (1999) devido às densidades empregadas, tanto para os litotipos como da encaixante; além disso, não se podem sub-estimar as diferenças inerentes à modelagem com geometria 2,5 e a tridimensional aqui apresentada. Comparando as profundidades resulta: 16 km para Jacupiranga, 14 km para Juquiá e 12 km para Pariquera Açú. Como Juquiá e Pariquera Açú são intrusões menores era de se esperar que a profundidade da raiz de Jacupiranga fosse maior. É de se esperar que quanto maior o volume de magma maior a profundidade, já que, em ambas as alcalinas sugere-se uma geometria semelhante a um cone de profundidade muito maior do que a secção superficial (pipe), a não ser, do espalhamento do magma na superfície, algo que não é suportado pelos atuais modelos gravimétricos.

O mapa de distribuição de massa por unidade de área pode ser visualizado na Figura 8.6. O eixo do centro de massa em Jacupiranga ao longo de uma direção preferencial é discreta em comparação a Pariquera Açú e Juquiá, que apresentam forte tendência de alinhamento na direção NW-SE, a mesma do lineamento Guapiára. Talvez esse menor alinhamento da concentração de massa seja devido à posição de Jacupiranga no Arco de Guapiara (Machado, 2000) que é tangente à maior concentração dos alinhamentos magnéticos, observada na Figura 8.15, ou seja, na borda da região de maior arqueamento enquanto que os demais complexos estão inseridos na região de intensa deformação.

No caso de Jacupiranga, pode-se inferir suave alinhamento dos máximos valores de distribuição na direção NW. A maior concentração de massa ocorre na região central do complexo, formando uma geometria aproximadamente circular. A massa relativa ao modelo de Jacupiranga é de $0,22791 \times 10^{15}$ kg e o volume de $0,36176 \times 10^3$ km³.

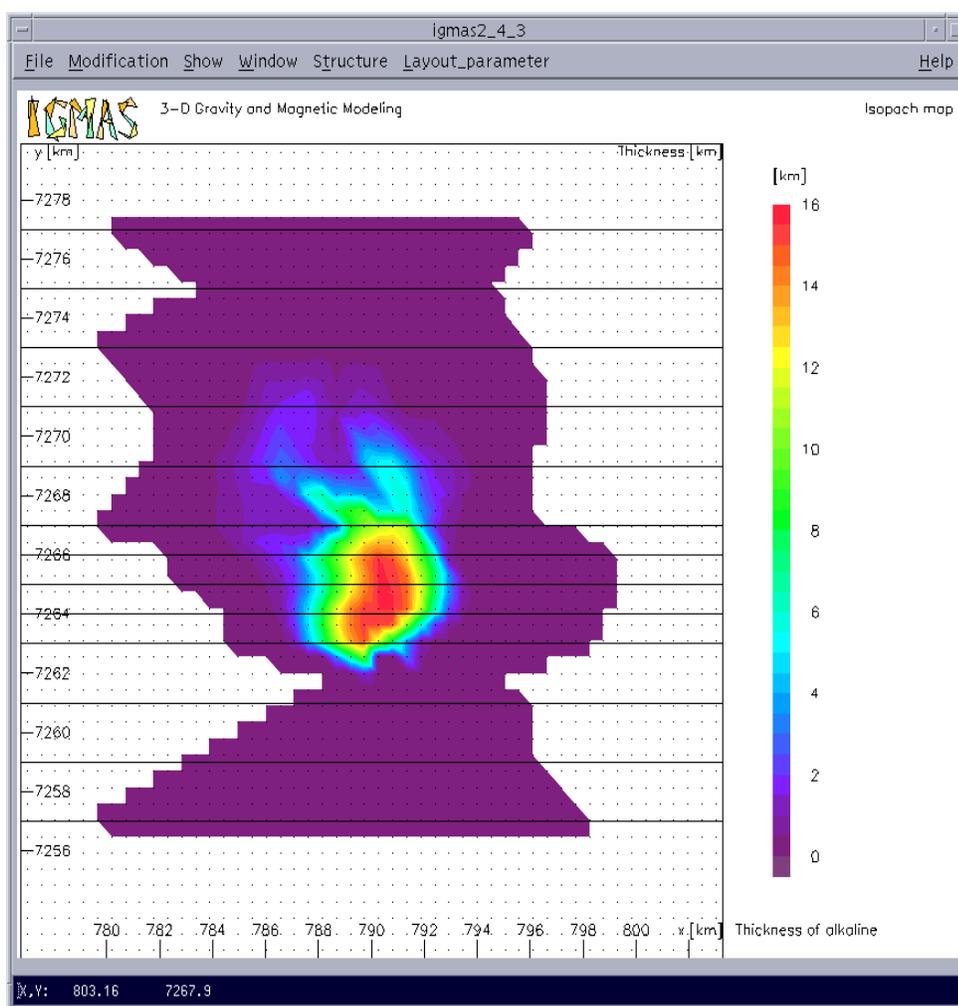


Figura 8.5. Mapa de “isópacas” do modelo 3D de Jacupiranga, com máxima profundidade da ordem de 16 km.

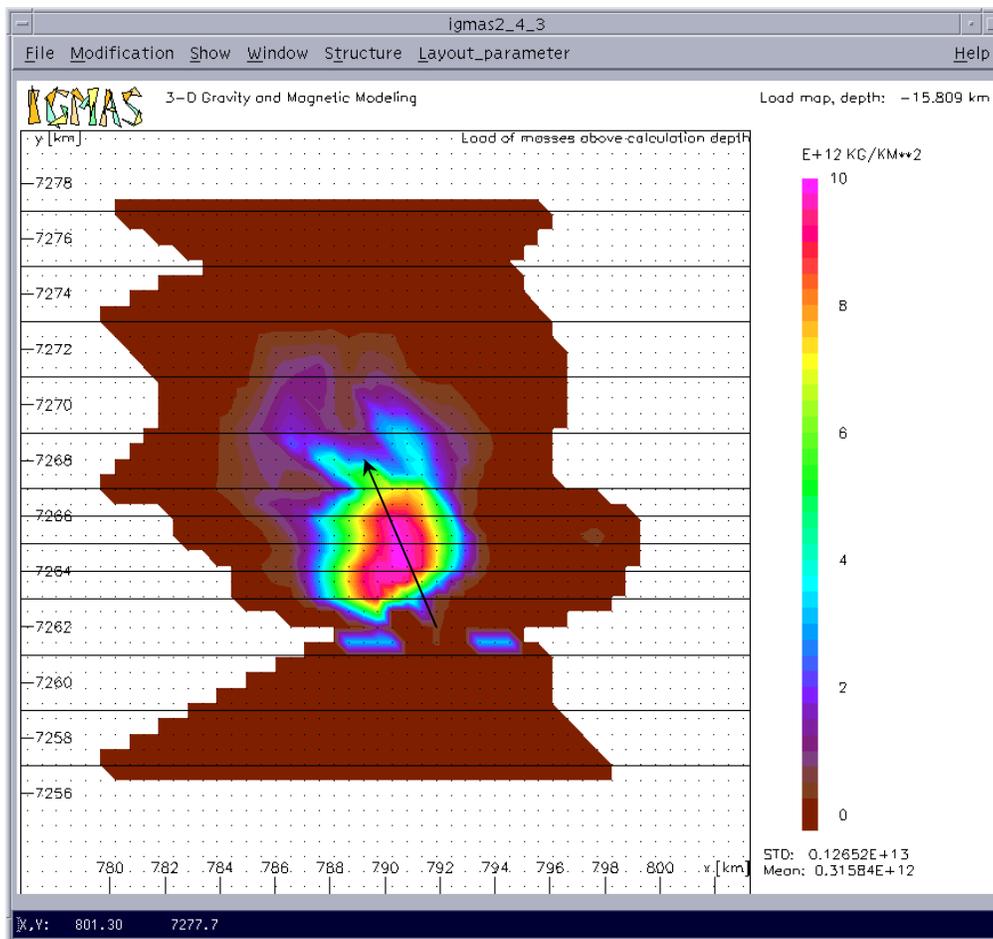
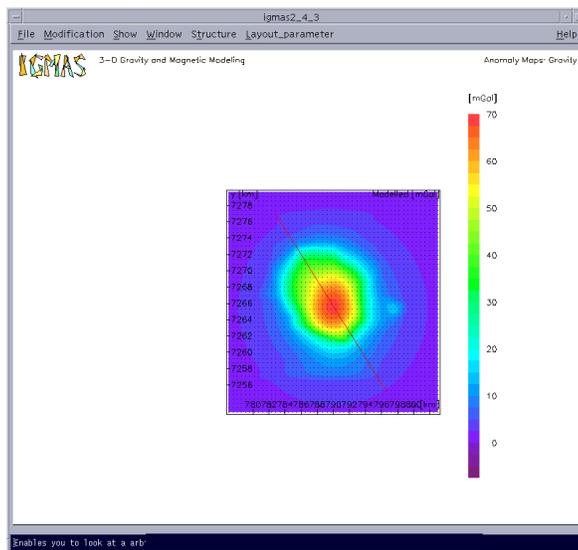


Figura 8.6. Mapa de distribuição de massa por unidade de área, ou seja, a densidade superficial de massa de Jacupiranga obtida através do modelo 3D. A seta representa a direção do alinhamento dos máximos valores.

O perfil e a sua disposição espacial, que atravessa o modelo na direção NW está na Figura 8.7, nele constata-se a diminuição das secções de área em planta com a profundidade, semelhante aos demais complexos alcalinos.

a)



b)

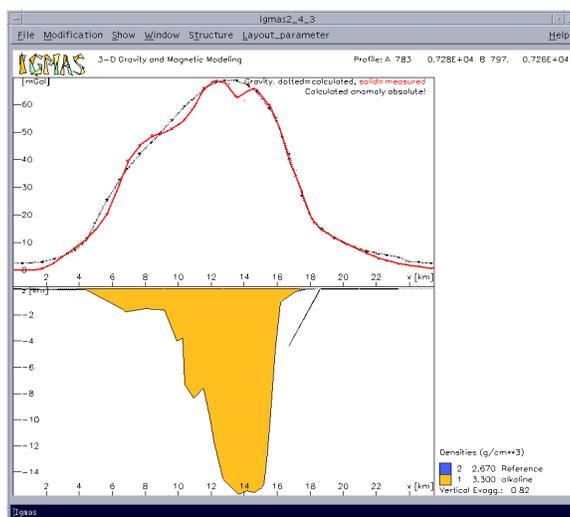


Figura 8.7. a) disposição espacial do perfil que corta o modelo de geometria 3D de Jacupiranga. b) modelo em perfil com o campo observado na cor vermelha e modelado na cor preta. A falha geológica é observada na posição $x = 18$ km do perfil.

O resultado final da modelagem 3D é apresentado na Figura 8.8 em duas posições distintas. O modelo suporta, na sua secção superficial, uma

descontinuidade com direção aproximada NEE que corta a intrusão na porção sul, correspondente à presença de uma falha geológica.

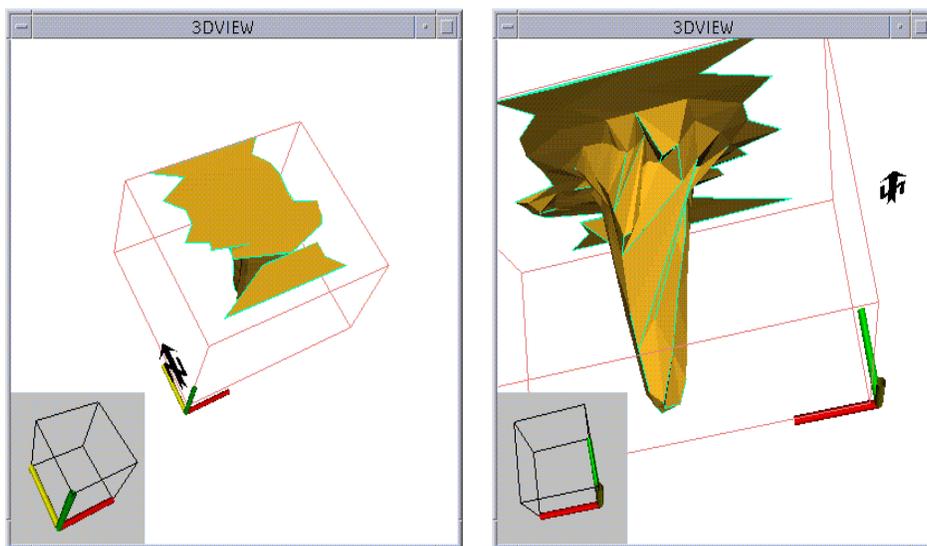


Figura 8.8. Resultado do modelo 3D para Jacupiranga em duas posições distintas.

8.5 Análise Hidrostática

Após obter o modelo 3D e a distribuição de massa é possível realizar uma análise dinâmica do corpo alcalino. Como se trata de uma anomalia gravitacional, que nesse caso também é de densidade volumétrica, e sendo que o corpo está inserido dentro de uma massa de alta viscosidade e baixa densidade (crosta), é possível determinar as forças atuantes no corpo na direção vertical.

A primeira etapa do cálculo é determinar uma malha que represente a distribuição de unidades de massa. Como o modelo 3D disponibiliza a distribuição de massa por unidade de área é, portanto, necessário determinar unidades de área, na malha de dados. Na malha original da distribuição de massa/área cada

célula é formada por 500 x 500 m, que gera uma área de $2,5 \times 10^{-1} \text{ km}^2$. Esse valor é multiplicado aos dados da malha obtendo-se a Figura 8.10.

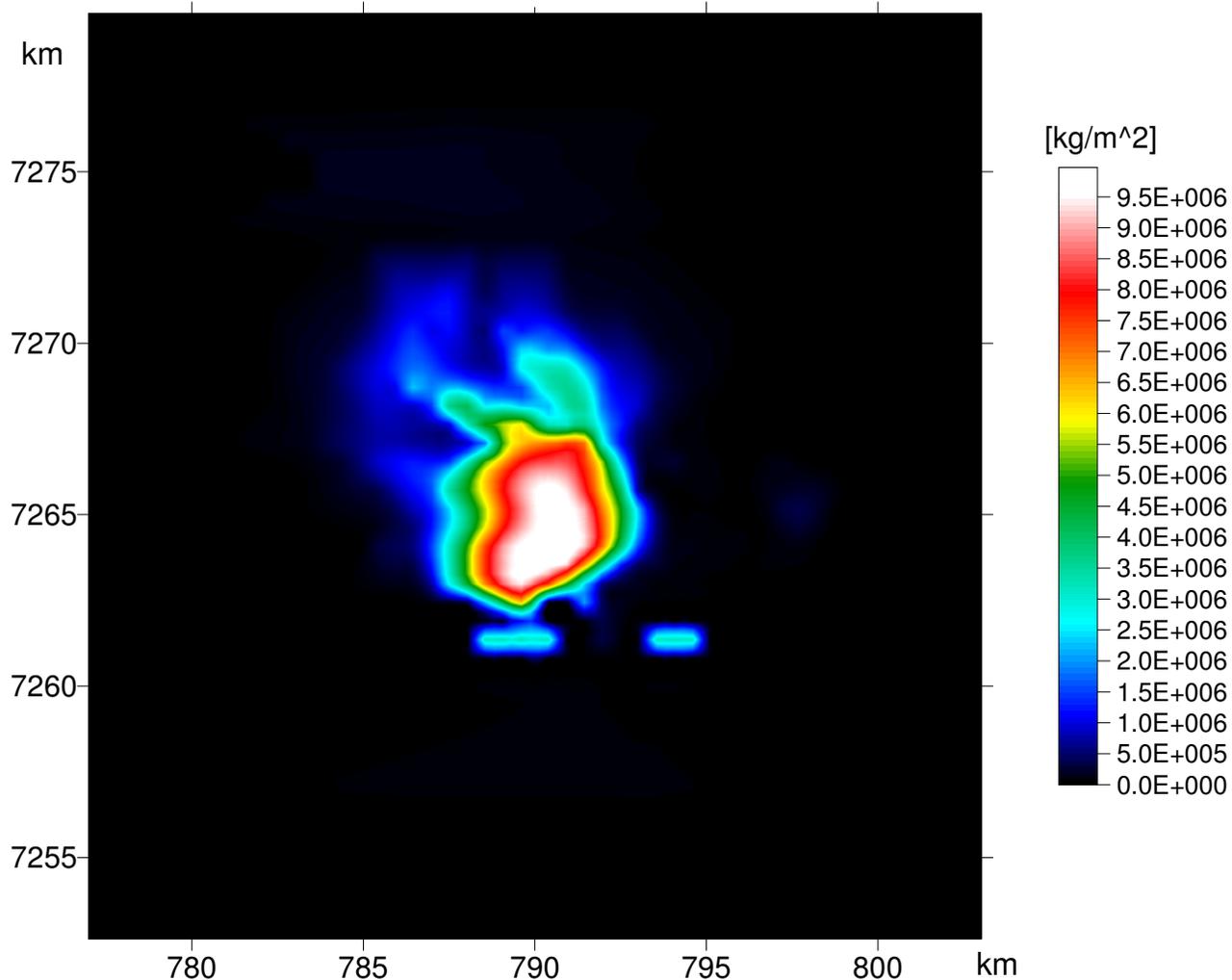


Figura 8.9. Distribuição de massa obtida pelo modelo 3D, no formato de malha regular.

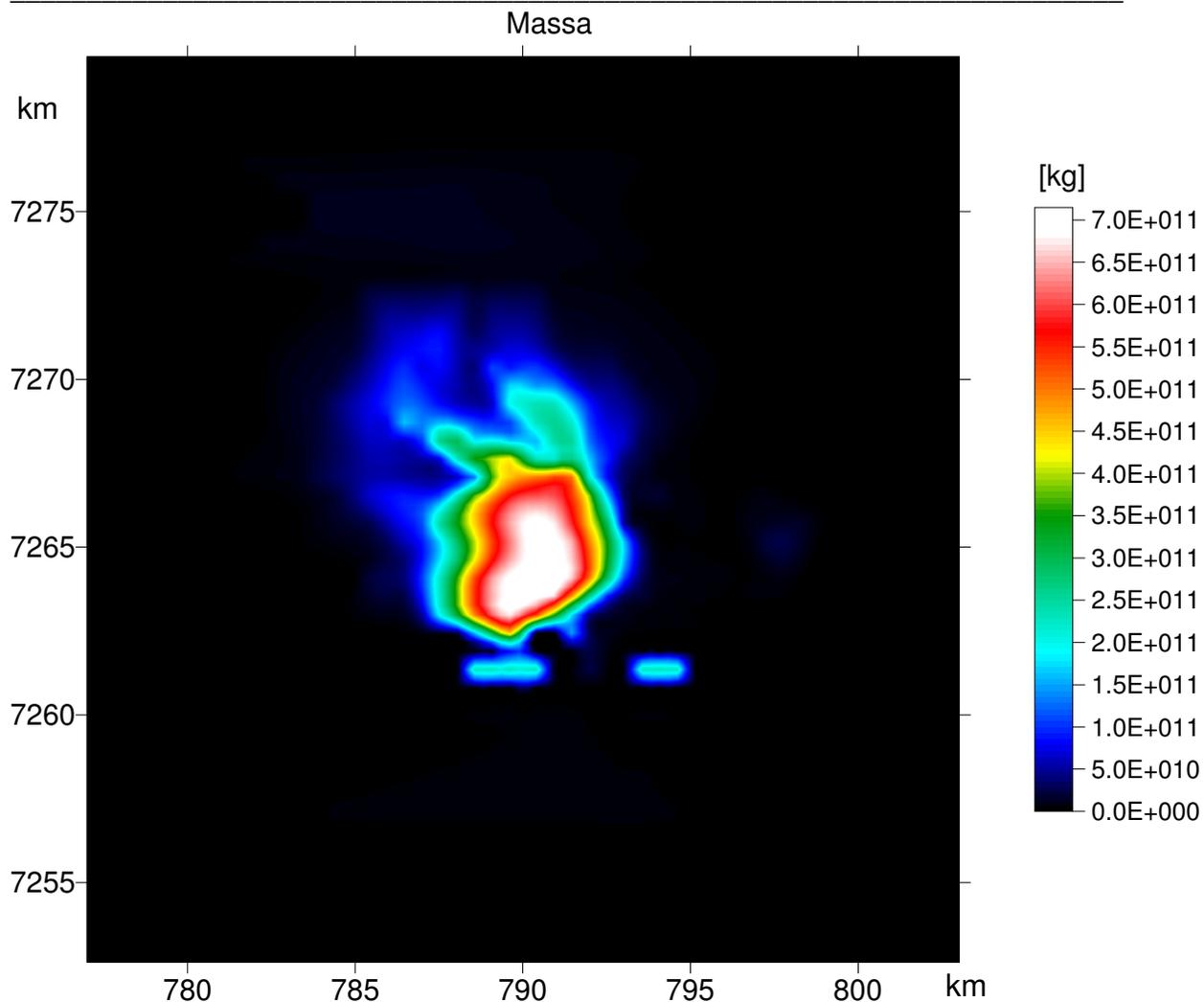


Figura 8.10. Massa obtida da distribuição de massa multiplicada a unidade de área da malha.

Na segunda etapa determinou-se uma malha com as mesmas dimensões da malha das unidades de massa e com o mesmo numero de células. Na Figura 8.11 observa-se o mapa de distribuição das profundidades para o modelo 3D de Jacupiranga.

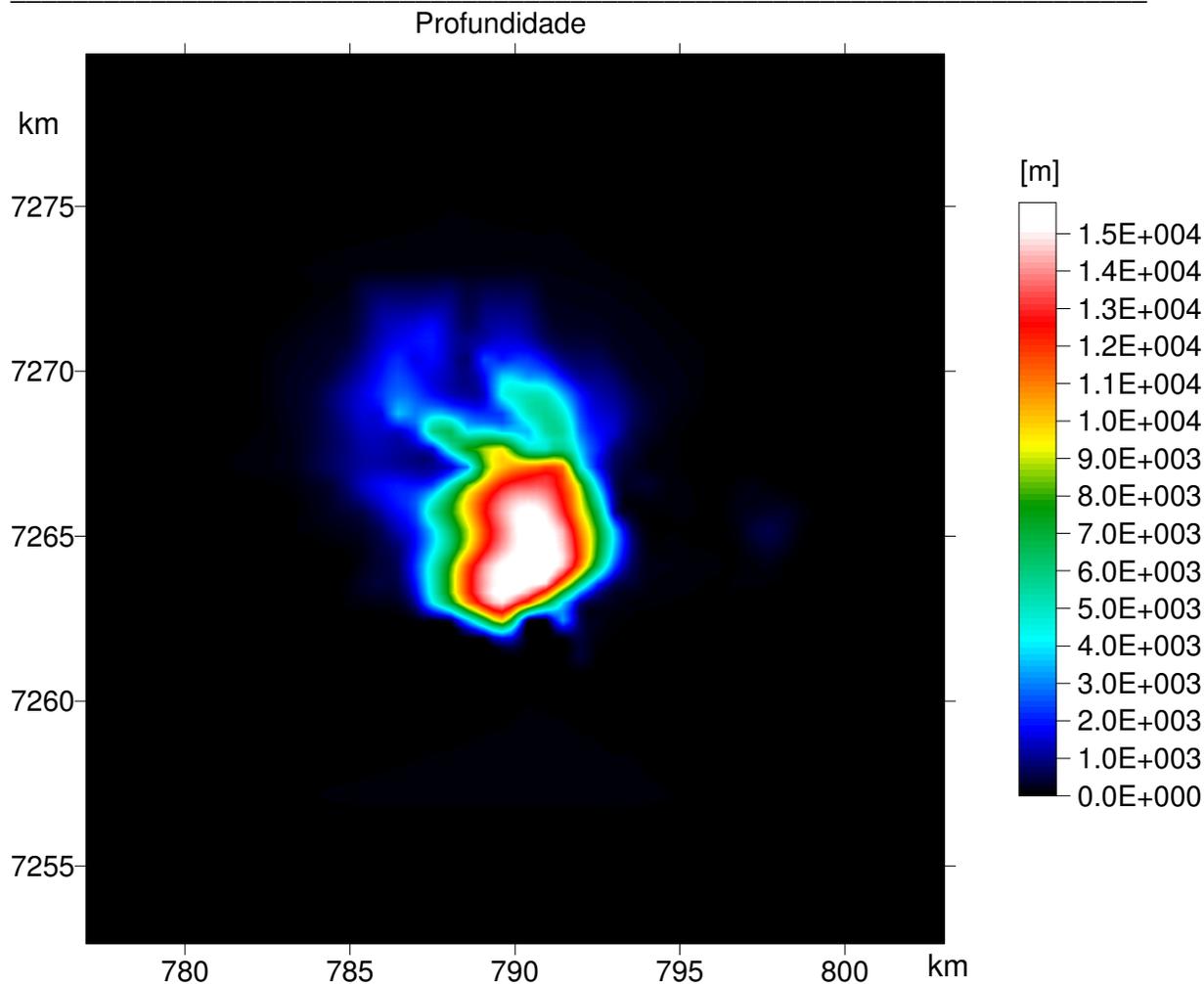


Figura 8.11. Isópacas de contorno dos limites do modelo 3D em profundidade.

Conhecendo a massa e a profundidade é possível calcular o peso e o empuxo sobre o corpo devido à interação com a crosta. O empuxo é calculado por prismas, com dimensões superficiais iguais ao tamanho das células da malha e a variação da profundidade do modelo, para cada ponto superficial (Figura 8.13). Já o peso é calculado multiplicando-se a massa pelo valor de **g** para cada célula da malha.

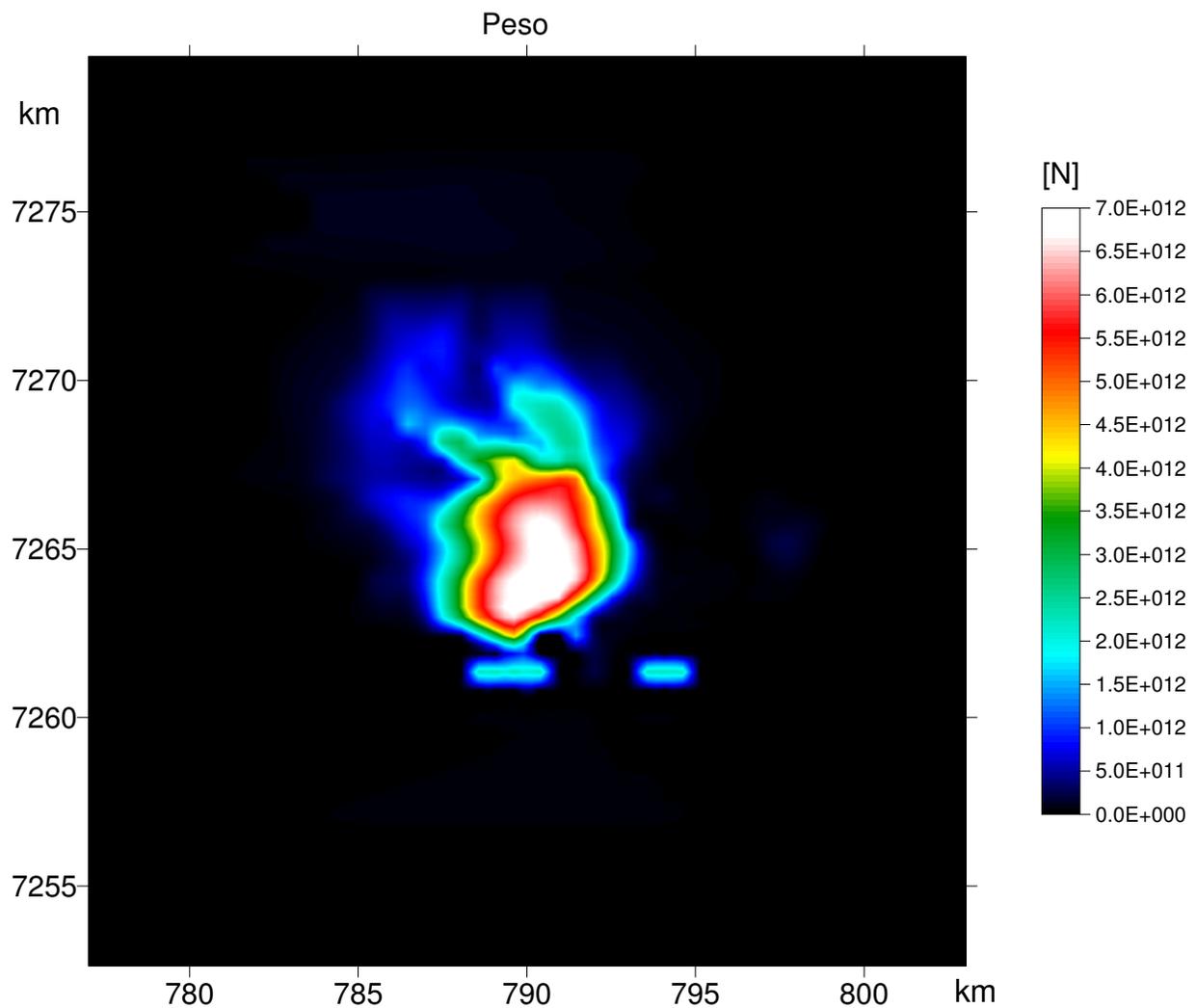


Figura 8.12. Distribuição da força peso em Jacupiranga.

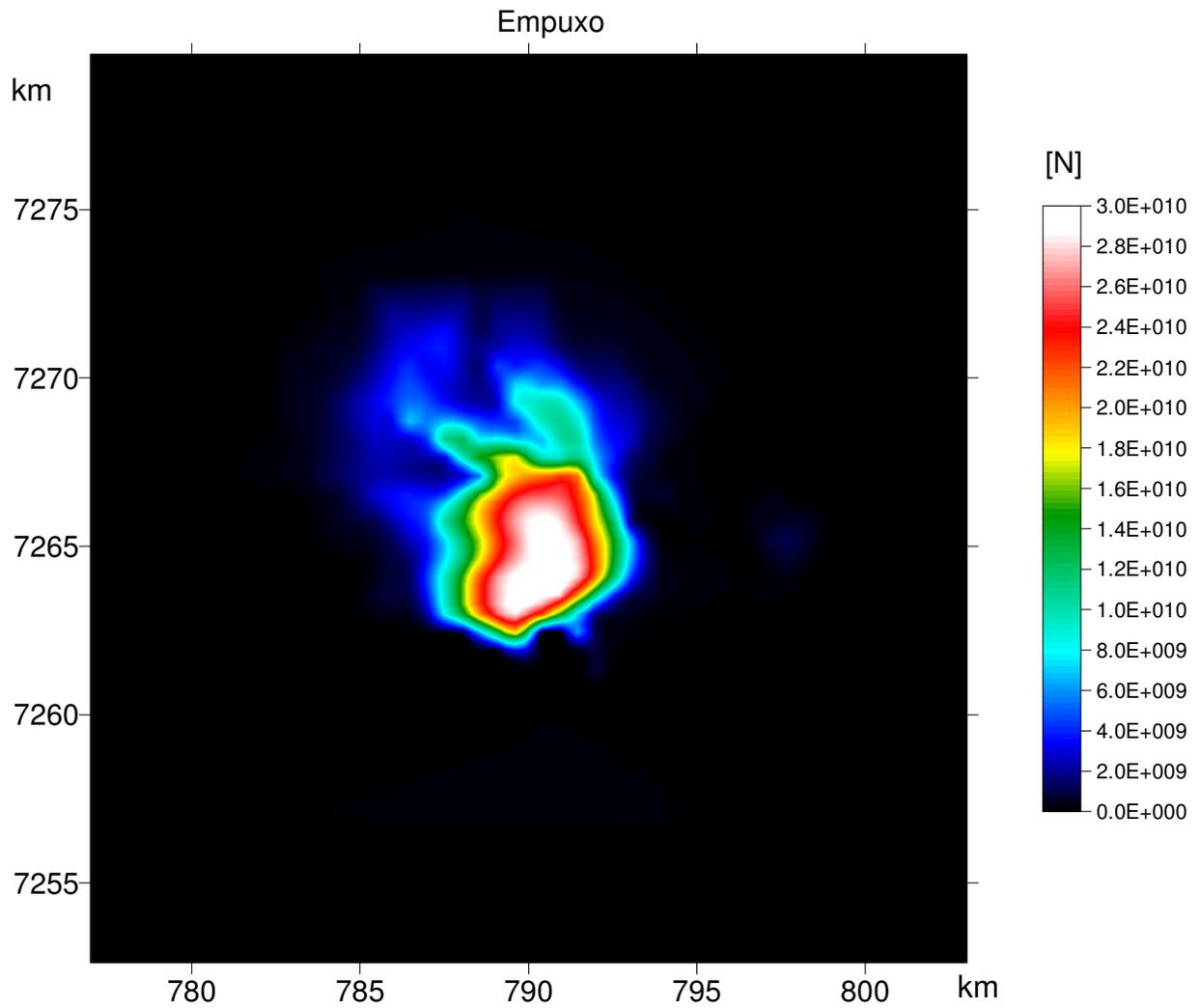


Figura 8.13. Distribuição da força empuxo para cada célula da malha.

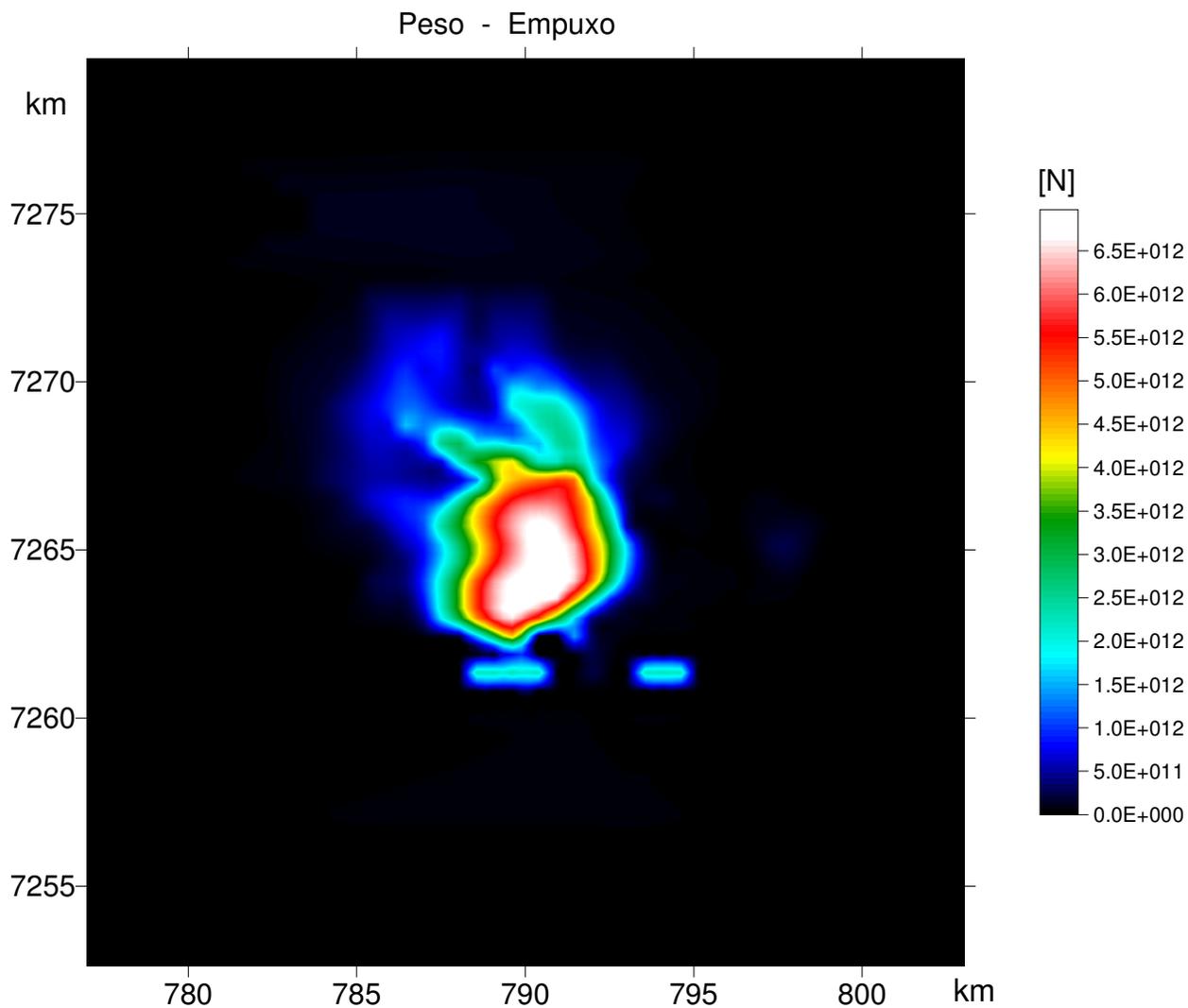


Figura 8.14. Força resultante, sem forças conservadoras.

Considerando a relação [Peso (\vec{P}) – Empuxo (\vec{E})] obtém-se a força resultante sobre o corpo de Jacupiranga, excluída a força de atrito entre o corpo e a litosfera. A força resulta de $2,46 \times 10^{15}$ N, e sendo o peso maior do que o empuxo resulta que Jacupiranga se encontra em movimento e se desloca para baixo. Supondo que o movimento seja uniforme, e assumindo a existência de uma

força restauradora de atrito viscoso (\vec{F}_{at}) contrária ao movimento do corpo tem-se que:

$$\vec{F}_r = \vec{P} - \vec{E} - \vec{F}_{at} \quad \text{equação 8.1}$$

e, sendo $\vec{F}_r = \vec{0}$ temos:

$$\vec{P} - \vec{E} = \vec{F}_{at} \quad \text{equação 8.2}$$

sendo $\vec{F}_{at} = 6\pi n r \vec{v}$, para n a viscosidade, r um parâmetro geométrico que indica o raio de uma esfera em movimento, \vec{v} a velocidade de deslocamento.

Com essa relação pode-se calcular o deslocamento de Jacupiranga na crosta. Supondo $n = 1 \times 10^{22}$ (Pa s) temos que calcular apenas o parâmetro

$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V}{4 \cdot \pi}}$ (equação 8.3), onde V é o volume do corpo. O volume é dado pelo

modelo 3D gravimétrico, assim sendo, para Jacupiranga temos:

$$V = 361,7 \text{ km}^3;$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot (361,7 \times 10^9 \text{ m}^3)}{4 \cdot \pi}} = 4419,97 \text{ m.}$$

logo tem-se:

$$\vec{P} - \vec{E} = \vec{F}_{at} \quad \text{equação 8.4}$$

$$\vec{P} - \vec{E} = 6\pi \cdot (4419,97) \cdot \vec{v}$$

ou seja para

$\vec{P} - \vec{E} = 2,46 \times 10^{15}$, tem-se uma velocidade $\vec{v} = 2,95 \times 10^{-22}$ m/s ou 0,92 mm/ano (~ 1 mm/ano).

Então Jacupiranga desloca com uma taxa inferior a 1mm/ano. Essa possibilidade vem ao encontro de um possível fraturamento da crosta. No mapa do levantamento aeromagnético verificam-se alinhamentos radiais ao corpo de Jacupiranga os quais podem ser representativos de fraturas na crosta devido ao

movimento vertical. Esse “fraturamento”, como já citado, interliga outros corpos alcalinos: Registro e Pariquera Açú. Nesse caso ou as fraturas convergiram para os corpos, já que os mesmos constituem corpos mais densos do que a crosta, ou as “fraturas” facilitou a ascensão de magma alcalino que originou esses corpos.

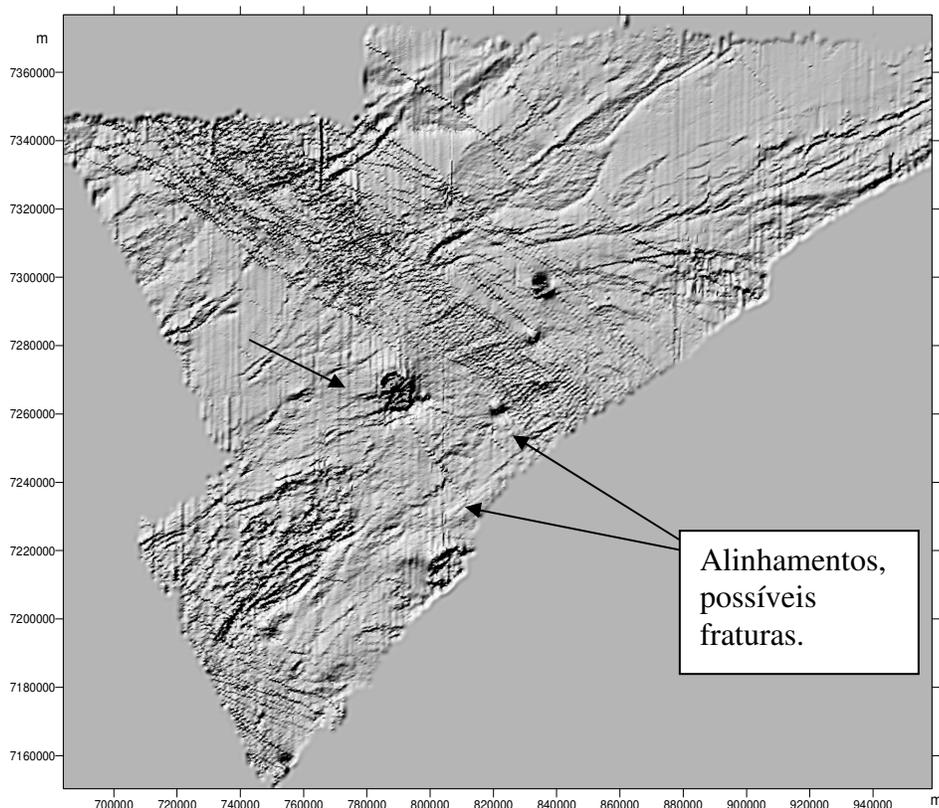


Figura 8.15. Levantamento aeromagnético da CPRM, os alinhamentos na direção NW são diques máficos a ultramáficos que compõem o lineamento Guapiara. As setas indicam a posição dos lineamentos radiais a Jacupiranga. (CPRM, 1995)

Deve ser comentado também, que a rigidez flexural da litosfera pode estar sobre um regime dúctil na porção da alcalina de Jacupiranga, sendo deformada devido ao seu possível movimento vertical, no entanto não há indícios de

deformação da crosta nas proximidades de Jacupiranga, apenas as fraturas radiais são observáveis, compondo-se num sistema rúptil. Estudos posteriores utilizando-se GPS diferencial podem corroborar para a análise.

8.6 Conclusão

No caso de Jacupiranga, pode-se inferir suave alinhamento dos máximos valores de distribuição na direção NW. Pariquera Açú e Juquiá possuem condicionamentos tectônicos mais severos. No geral, a maior concentração de massa ocorre na região central do complexo, formando uma geometria aproximadamente circular, isso deve ser resultante da posição de Jacupiranga no Arco de Guapiara.

Os parâmetros obtidos através do modelo 3D, para uma densidade uniforme do complexo alcalino de $3,3 \text{ g/cm}^3$, foram: uma máxima profundidade da raiz de 16 km; massa de $0,22791 \times 10^{15} \text{ kg}$; e volume de $0,36176 \times 10^3 \text{ km}^3$.

Jacupiranga pode estar em movimento na crosta, devido ao desequilíbrio nas forças hidrostáticas. É esperada a atuação de uma força restauradora, equivalente à força de atrito viscoso, de forma a atenuar o movimento do corpo, já que a força peso é superior ao empuxo do volume. A existência de fraturas radiais a Jacupiranga corrobora com a tese de movimento vertical, que resulta no fraturamento da crosta. A anomalia gravimétrica positiva indica que o corpo possui densidade superior à da crosta, apresentando um desequilíbrio hidrostático. Para uma viscosidade da crosta de $1 \times 10^{22} \text{ (Pa s)}$ o movimento resulta inferior a 1 mm/ano. Viscosidades superiores a essa representam movimentos menores.

8.7 Referência

Campanha G. A. da C. & Sadowsky G. R. 1999. Tectonics of the Southern portion of the Ribeira belt (Apiaí domain). Elsevier Science B. V. *Pré Cambrian Research*, 98:31-51

CPRM. 1995. Catálogo geral de produtos e serviços. Geologia. Levantamentos aerogeofísicos. Base de dados AERO. 2ª Ed. - Rio de Janeiro: Diretoria de Geologia e Recursos Hídricos.

COMIN-CHIARAMONTI & GOMES, C.B., 1995. Alakaline magmatism in central eastern Paraguay: Relationships with coeval magmatism in Brazil. Edusp, São Paulo, 1-458p..

Machado, D de L. J., 2000. Condicionantes estruturais e contexto tectônico do "alinhamento de Guapiara". INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – USP. Teses, 143 p.

GASPAR, J.C, 1989. Geologie et mineralogie du complexe carbonatitique de Jacupiranga, Bresil. Unpublished PhD thesis, Universite d'Orleans.

Götze, H.-J. and B. Lahmeyer, 1988: Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics, *Geophysics* Vol. 53, No. 8, p. 1096 – 1108.

Huang, Y. M; Hawkesworth, C. J.; Calsteren P. van; McDermott F. 1994. Geochemical characteristics and origin of the Jacupiranga carbonatites, Brazil. *Chemical Geology*, 119, 79-99.

PRICE, N.J., and COSGROVE, J.W., 1990. Analysis of geological structures. Cambridge University Press, London. Pag. 60-88.

Rosales, Mario Jesus Tomas, 1999. Caracterização geofísica do complexo intrusivo ultrabásico-alcálico de Jacupiranga, (SP). IAG - INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS. 120p.

SORENSEN, H., 1974. The alkaline rocks. Printed John Wiley & Sons, 1-622p..

ULBRICH, H.H.G.J., GOMES, C.B., 1981. Alkaline Rocks From Continental Brazil. *Eath-Science Reviews*, 17, p. 135-154.