



Inversão gravimétrica 3D e interpretação integrada dos métodos CSAMT, gravimétrico e magnetométrico no estudo do Kimberlito Régis, MG, Brasil.

Lis Rocha, UERJ; Emanuele La Terra, MCT-ON; Paulo de Tarso Menezes, UERJ.

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

Os diamantes são minerais raros e de alto valor econômico. Estes minerais se formam em condições mantélicas, numa profundidade aproximada de 150 a 200 km e ascendem à superfície em magmas alcalinos e carbonatíticos formando, respectivamente, kimberlitos e lamproitos que constituem os depósitos primários. No presente trabalho objetivou-se o estudo da geometria do Kimberlito Régis, através de inversão gravimétrica 3D e posterior modelagem 2D utilizando resultados magnetométricos e eletromagnéticos para reduzir a ambiguidade inerente ao processo de interpretação. Como resultado estimou-se um conduto vulcânico com cerca de 800 metros de profundidade e 200 metros de diâmetro na superfície. Este último diminui gradualmente em profundidade, o que confere ao kimberlito estudado uma típica configuração em cone invertido. Conforme esperado, a integração de métodos diferente métodos geofísicos mostra-se mais eficiente do que a interpretação isolada.

Palavras chave: Kimberlito. Gravimetria. Magnetometria. CSAMT

Introdução

Os diamantes são minerais raros compostos por átomos de carbono. Apresentam alto índice de refração, são transparentes e muito brilhantes, sendo uma das gemas mais valorizadas do mercado, aproveitados tanto pelas joalherias como pelas indústrias, devido sua alta dureza.

Estes minerais se formam no manto superior, a uma profundidade, que em geral, varia de 150 a 200 km e ascendem à superfície em magmas alcalinos, carbonatíticos e kimberlíticos dentre outros. Os kimberlitos ocorrem principalmente nas zonas de crátons, porções da crosta terrestre estáveis desde o período Pré-Cambriano. As gemas de alto valor no mercado ocorrem usualmente associadas a esses kimberlitos. Nas zonas pericratônicas (borda de crátons) os kimberlitos contém

principalmente microdiamantes industriais (Kaminsky et al, 2009).

A intrusão dos kimberlitos na crosta está associada a locais com zonas de fratura. A abertura continental do Atlântico Sul gerou uma série de falhas transformantes as quais se estenderam como zona de fratura até o interior continental. Por estas falhas, o magmatismo alcalino Cretáceo pôde extravasar, gerando uma série de kimberlitos e carbonatitos. O lineamento azimute 125° corresponde zona de fratura gerada com o rifteamento continental do Atlântico Sul, dando origem às intrusões kimberlíticas, como é o caso do kimberlito Régis, situado na província estrutural do Tocantins (Bardet, 1977) e estudada neste trabalho.

O kimberlito Régis (figura 1), objeto desse estudo, está situado próximo à porção central da Província do Alto do Paranaíba, na margem oeste do Cráton de São Francisco, região do Arco do Alto Paranaíba, cerca de 13 quilômetros na direção oeste da cidade de Carmo do Paranaíba, MG.

A delimitação da geometria do kimberlito Régis é importante para a exploração mineral na área. Como os diamantes geralmente se alojam no conduto vulcânico das rochas kimberlíticas (La Terra et al, 2010), o conhecimento da geometria em profundidade, pode indicar possíveis locações de perfuração de poços exploratórios. Dessa forma, o uso da geofísica se torna muito relevante, caracterizando os contrastes de propriedades físicas do subsolo, permitindo o conhecimento da geometria e posição deste conduto. Dentre esses métodos geofísicos, destacam-se a magnetometria, os métodos eletromagnéticos e a gravimetria.

O presente trabalho envolve o estudo gravimétrico do Kimberlito Régis. Em especial, pretende-se estimar sua forma e extensão em profundidade por gravimetria. Para tal, dados gravimétricos coletados especialmente para este fim foram interpretados via inversão 3D. Como forma de reduzir à inerente ambiguidade do processo de interpretação da inversão foi realizada uma modelagem 2D integrada, utilizando-se como vínculos informação a priori advinda dos estudos geofísicos independentes de magnetometria (Menezes e La Terra, 2011), e de eletromagnetometria (La Terra et al., 2010 e La Terra e Menezes, 2012).

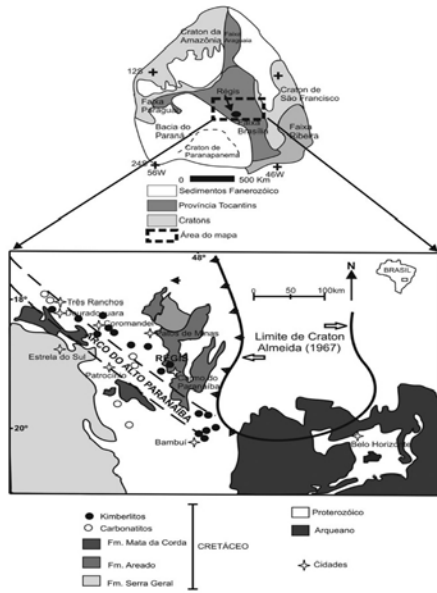


Figura 1: Mapa geológico com a localização do kimberlito Régis. Fonte: La Terra et al., 2010.

Metodologia

O método gravimétrico mede as variações do campo gravitacional terrestre, as quais são provocadas por contraste de densidade em diferentes corpos em subsuperfície (Telford et al., 1990).

O levantamento gravimétrico na área do kimberlito Régis foi distribuído numa malha radial, irregular. Foram adquiridas 63 estações utilizando o gravímetro relativo LaCoste e Romberg. Estas estações foram adquiridas com espaçamento de 50 metros na região próxima ao kimberlito, e à medida que ia se afastando aumentava-se esta distância que variou de 50 a 200 metros.

Assim, antes da análise dos dados é necessário corrigir todas as variações no campo gravitacional da Terra não decorrentes da variação de densidade das rochas. Este processo é conhecido como redução gravimétrica (Lafehr, 1991), sendo o nível do mar usualmente o Datum mais conveniente. A figura 2 representa o mapa de anomalia Bouguer residual, elaborado após as correções e remoção do trend regional, de modo a permitir a interpretação da anomalia.

Neste trabalho, primeiro realizou-se a inversão gravimétrica 3D, baseado no algoritmo de Li e Oldenburg, 1998. O problema inverso é formulado como um problema de otimização onde a função objetivo (equação 1), do modelo de densidade é minimizada para gerar dados sintéticos sujeitos às restrições de erros que correspondam à observação em um grau de desvio ou *misfit* (equação 2), conforme as estatísticas dos dados.

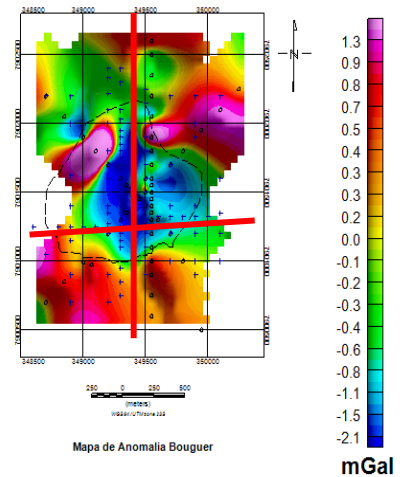


Figura 2: Mapa de anomalia Bouguer residual, em vermelhos, os perfis em que a modelagem foi realizada.

Os detalhes da função objetivo são problemas dependentes e podem variar de acordo com as informações a priori disponíveis, mas em geral a função objetivo deve ter a flexibilidade de construir um modelo próximo ao de referência ρ_0 e produzir um modelo suave nas três direções espaciais.

$$\phi_m(\rho) = \alpha_x \int_V w_x(z)(\rho - \rho_0)^2 dV + \alpha_y \int_V w_y(z)(\rho - \rho_0)^2 dV + \alpha_z \int_V w_z(z)(\rho - \rho_0)^2 dV + \alpha_s \int_V w_s(z)(\rho - \rho_0)^2 dV \quad (1)$$

Nesta equação, as funções w_s , w_x , w_y e w_z são espacialmente dependentes, enquanto, α_s , α_x , α_y e α_z são coeficientes que afetam com uma importância relativa os diferentes componentes da função objetivo.

Quanto maior a razão α_x/α_s e sucessivamente, mais suave é o modelo recuperado na direção do eixo.

$$\phi_d = \|W_d(d - d^{obs})\|^2 \quad (2)$$

Sendo d , o dado predito e d^{obs} o dado observado.

A inversão produziu um modelo 3D de contraste de densidade do kimberlito Régis a partir da anomalia Bouguer residual. Como os problemas inversos são problemas mal postos e apresenta solução não única, uma modelagem 2.5D foi elaborada.

A modelagem geofísica busca definir as características da geologia local baseado nos perfis de anomalia de gravimetria e de magnetometria. Neste caso, resultados CSAMT foram incorporados ao modelo, atribuindo informações a priori. Esta modelagem foi realizada em programa comercial que utiliza a metodologia de Talwani, et al, 1959.

Esta metodologia permite criação e a manipulação interativa de modelos geológicos bidimensionais, permitindo o ajuste das curvas calculadas e observadas dos dados de gravimetria e magnetometria.

Resultados

A inversão dos dados gravimétricos permitiu a obtenção do modelo de contraste de densidade do kimberlito Régis, representando este corpo tridimensionalmente. Esta inversão apresentou bons resultados, os quais serão apresentados a seguir.

A figura 3 representa um resultado da inversão. Como o kimberlito alterado apresenta densidade inferior à rocha encaixante, filito, as células que representam este corpo kimberlítico apresentam um contraste de densidade negativo. Nesta figura, o kimberlito pôde ser ressaltado, demonstrando sua geometria como um corpo em forma de cone invertido, alcançando a profundidade de 800 metros. A visualização do corpo kimberlítico, sem a resposta da rocha encaixante, se deve a delimitação dos valores de densidade para um *range* de contrastes de densidades negativos, variando então o *cutoff* entre -0.2 e -0.4.

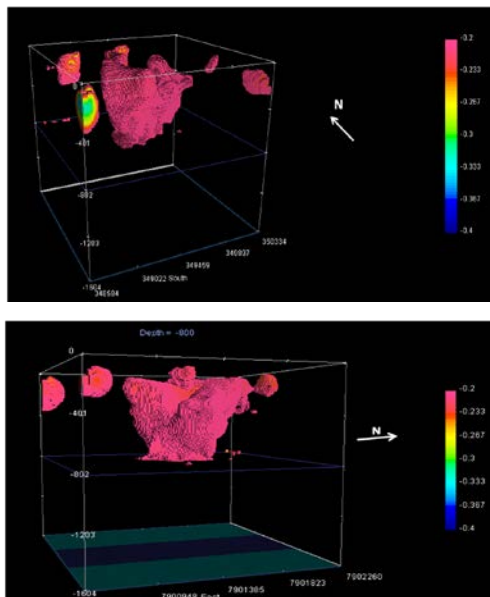


Figura 3: Resultado da inversão

A modelagem direta 2.5 D, apresentou resultados semelhantes ao modelo inverso, apresentando o Kimberlito Régis com morfologia de cone invertido que vai se afinando com a profundidade. A figura 4 representa o perfil Norte Sul, localizado na figura 2.

As densidades utilizadas para esta modelagem foi de 2.1 a 2.3 g/cm³ para os sedimentos da cratera, 2.4 g/cm³ para o kimberlito alterado, 2.79 g/cm³ para a diatrema e

2.6 g/cm³ para o filito, rocha encaixante. Já os valores de suscetibilidade magnética utilizados para esta modelagem foram 0.00056 SI para a cratera, 0.00018 SI para o kimberlito alterado, 0.0049 SI para o diatrema em profundidade e 0.00016 SI para o filito. Esses valores foram obtidos a partir de bibliografias que discutem estes valores para kimberlitos (Menezes et al, 2011; Hoover et al, 1993). Nesta modelagem, uma inversão 1D é aplicada, de modo que estes valores puderam ser modificados e ajustados para a área.

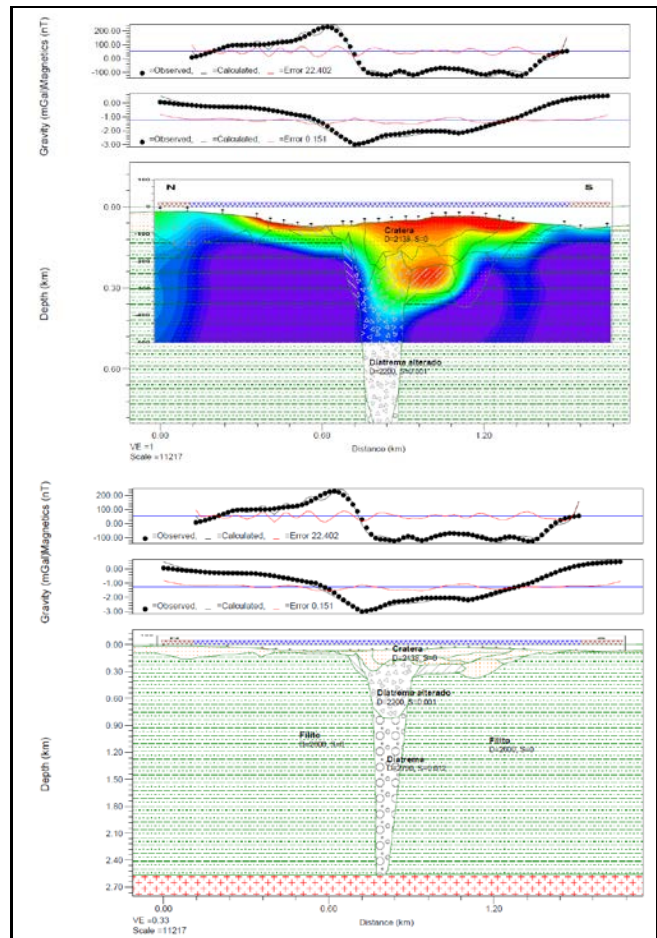


Figura 4: Modelagem do perfil norte-sul.

As imagens CSAMT são usadas como bases para esta interpretação dos perfis, já que estas imagens são utilizadas como plano de fundo e o ajuste dos dados de magnetometria e gravimetria foram modelados partindo desta informação de resistividade.

Por esta modelagem, este corpo é interpretado por uma cratera heterogênea de epiclásticos com lama cinza vulcanoclástica intercalada com finas camadas de areia (La Terra et al, 2010). Na figura 4, observa-se, que a fácies cratera apresenta densidade de 2.1 g/cm³ e se estende até a profundidade de 100 metros aproximadamente. Em algumas regiões esta profundidade pode ser um pouco maior, alcançando 160 metros. Os valores de densidade também variaram, o

que pode estar relacionado com a ocorrência dos Tufos de Lapilli (2.3 g/cm³), depositados no entorno da cratera demonstrando a heterogeneidade desta fácies.

Como o kimberlito apresenta variação de suas propriedades físicas em profundidade algumas camadas foram criadas para que o modelo pudesse se comportar da maneira mais próxima a realidade. A porção mais rasa apresenta maior alteração devido à reação com a água meteórica, aumentando a porosidade da rocha, diminuindo a densidade, por isto, valores baixos desta propriedade podem ser encontrados (Barbosa, 2006). Este diatrema é uma brecha que contém xenólitos do manto fazendo com que haja variação nas propriedades físicas. Este corpo apresenta largura de cerca de 220 metros, na profundidade de 100 metros e vai afinando até os 2800 metros de profundidade, onde apresenta 50 metros de largura, formando a geometria de um cone invertido (figura 4).

A figura 5 apresenta o perfil leste – oeste localizado na figura 2. A interpretação deste perfil foi semelhante ao perfil norte - sul.

A integração dos dados permitiu a análise com diferentes respostas físicas, amarrando assim os resultados e favorecendo a modelagem do corpo mais fidedigna. Como resultado, todos os métodos mapearam um corpo de forma cônica e assimétrico, sendo possível a modelagem do kimberlito com a metodologia adotada. A largura da cratera em superfície foi em média de 800 metros, enquanto que o conduto vulcânico apresentou próximo de 200 metros de largura o qual vai afinando e se estendendo até uma profundidade aproximada de 2800 metros, onde sua largura era de aproximadamente 50 metros.

Conclusões

Os métodos geofísicos utilizados neste estudo foram eficazes no mapeamento do kimberlito Régis. A modelagem integrada de diferentes ferramentas geofísicas vem sendo uma nova fronteira a ser investigada, visto que melhora a acurácia e a confiabilidade dos dados. Da mesma forma, a inversão tridimensional, proporciona um modelo mais realístico da geometria dos corpos em subsuperfície, já que estes são tridimensionais por natureza.

Dados de inversão 3D gravimétrica apresentaram resultados muito bons na definição tridimensional deste kimberlito, porém sem esta modelagem integrada o resultado não poderia ser confiável, já que os problemas inversos não apresentam solução única. Assim, esta modelagem permitiu a legitimação da inversão gravimétrica 3D, contribuindo para a definição da geometria do kimberlito Régis.

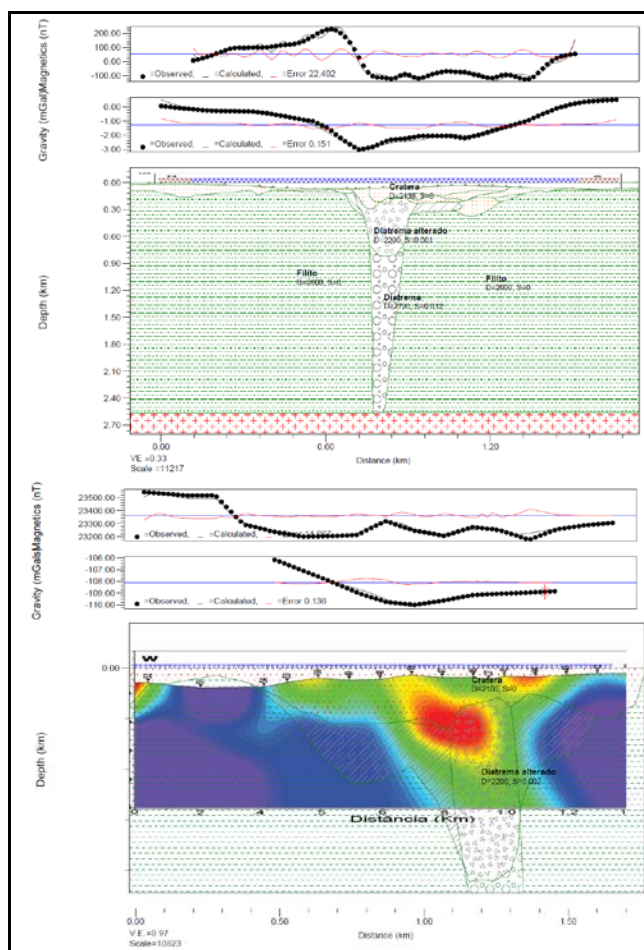


Figura 5: Modelagem do perfil leste-oeste.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Observatório Nacional e a UERJ pelo suporte e logística.

Referências Bibliográficas

Bardet, M.G., 1977, Géologie du diamant. Paris: BRGM, 236 p. (Memoires du BRGM, n. 83).

Barbosa, R.C., 2006, *Kimberlito*: Morfologia, Formação e Kimberlitos Diamantíferos em Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG.

Hoover D.P. Campbell, D.L., 1994, Geophysical Model of Diamond Pipes. In: Heran, W.D. (Ed.). *Codical to The Geophysical Expression of Selected Mineral Deposit Models*. Washington: United States Department of the Interior Geological Survey, Open-File Report 94-174.

Kaminsky, F.V., Noan, C.A., 2009, *Technical Report on the Juína Diamond Project*, Juína.

La Terra, E.F., Menezes, P.T.L., 2012, Audiomagnetotelluric 3D imaging of the Regis Kimberlite pipe, Minas Gerais, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, [S. l.], v.77 . p. 30–38.

La Terra, Menezes, P.T.L.; Fontes, S.L., 2010, Metodologia exploratória para delimitação de condutos vulcânicos kimberlíticos com o uso do método CSAMT, MG, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, [S. l.], v. 28, p. 1-14.

Lafehr, T.R., 1991, *An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction*. *Geophysics*, [S. l.], v. 56, n. 8, p. 1179-1184.

Li, Y., Oldenburg, D.W., 1998 3D inversion of gravity data. *Geophysics*, [S. l.], v. 63, p. 109–119.

Menezes, P.T.L, La Terra, E.F., 2011, 3D magnetic interpretation of the Regis kimberlite pipe, Minas Gerais, Brazil, *Near Surface Geophysics*, [S.l.] v. 9. p. 331-337.

Telford W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*, 2. ed., Cambridge: Cambridge University Press.