

7.1 Resumo

O Complexo Alcalino de Juquiá foi tema de investigação gravimétrica detalhada por Slavec et al. (2001), que apresentaram uma interpretação 2.5 D, levando em consideração as variações litológicas. O enfoque aqui abordado, inclui o modelo homogêneo 3D, que permite analisar o alojamento do complexo alcalino, ou seja, suas relações estruturais. Em vista da anomalia de Juquiá apresentar uma forte componente interna devido a presença do carbonatito, no modelo 3D foi assumida a presença de dois corpos homogêneos, um para as litologias alcalinas e outro para sua associação alcalina, o carbonatito.

7.2 Introdução

O Complexo Alcalino de Juquiá localiza-se a SW da cidade de São Paulo, aproximadamente a 160 km pela Rodovia Régis Bittencourt (BR116). No Complexo, o levantamento gravimétrico de semidetalhe em correspondência a essa estrutura, cobre uma área de aproximadamente 13 km² (Slavec et al., 2001). Como o modelo 2.5D do complexo de Juquiá e as demais observações geofísicas-geológicas foram abordados por Slavec et al. (2001), o presente estudo do complexo, focalizou o modelo 3D, usando o programa IGMAS (Götze & Lahmeyer, 1988) para correlação estrutural e estimativa do volume do magma alcalino; este método é distinto daquele empregado anteriormente. Com diferente método de processamento daquele utilizado por Slavec et al. (2001) foi determinado o campo regional e o conseqüente residual que, no entanto, não apresentaram diferenças significativas com o anterior.

O modelo obtido, entretanto, difere um pouco daquele interpretado por Slavec et al. (2001), o que pode ser explicado pela geometria tridimensional do presente modelo, que leva em consideração o efeito gravitacional ao redor das estações de medidas. Além das observações anteriores, deve-se ressaltar o carácter subjetivo, seja referente aos modelos como da escolha do melhor método de processamento, que visa enriquecer o entendimento do fenômeno.

7.3 Geologia

O complexo alcalino de Juquiá está inserido no domínio Apiaí (Campanha & Sadowsky, 1999). A rocha encaixante é formada pelo complexo gnáissico-migmatítico desse domínio. O Complexo Alcalino de Juquiá intrudiu essa estrutura de forma que quase todo seu perímetro superficial se encontra em contato com os migmatitos de estruturas heterogêneas, com exceção da porção noroeste que encontra-se em contato com migmatitos de estruturas homogêneas, e ao sul onde foi observada a presença de migmatitos indiferenciados. Teixeira et al. (1987), atribuiu a migmatização observada na área próxima ao Complexo Alcalino a um evento metamórfico de alto grau, de fácies anfibolito, datado do Proterozóico Inferior.

O Complexo de Juquiá constitui uma intrusão circular zonada com cerca de 5 km de diâmetro; seu mapa geológico é observado na Figura 7.1. Cerca de 2,5 km² do complexo alcalino correspondem ao carbonatito. O carbonatito se situa num alto topográfico denominado de Morro do Serrote. Born (1971), classificou o carbonatito como sendo de composição ankerítica e dolomítica, pobre em apatita, na sua porção interna, e de apatita-beforsito, com altos teores de ferro e manganês, na sua porção externa. O mesmo ocorre na forma de um corpo

contínuo, contrariamente a outras associações de mesma composição, que geralmente ocorre na forma de diques e veios restritos.

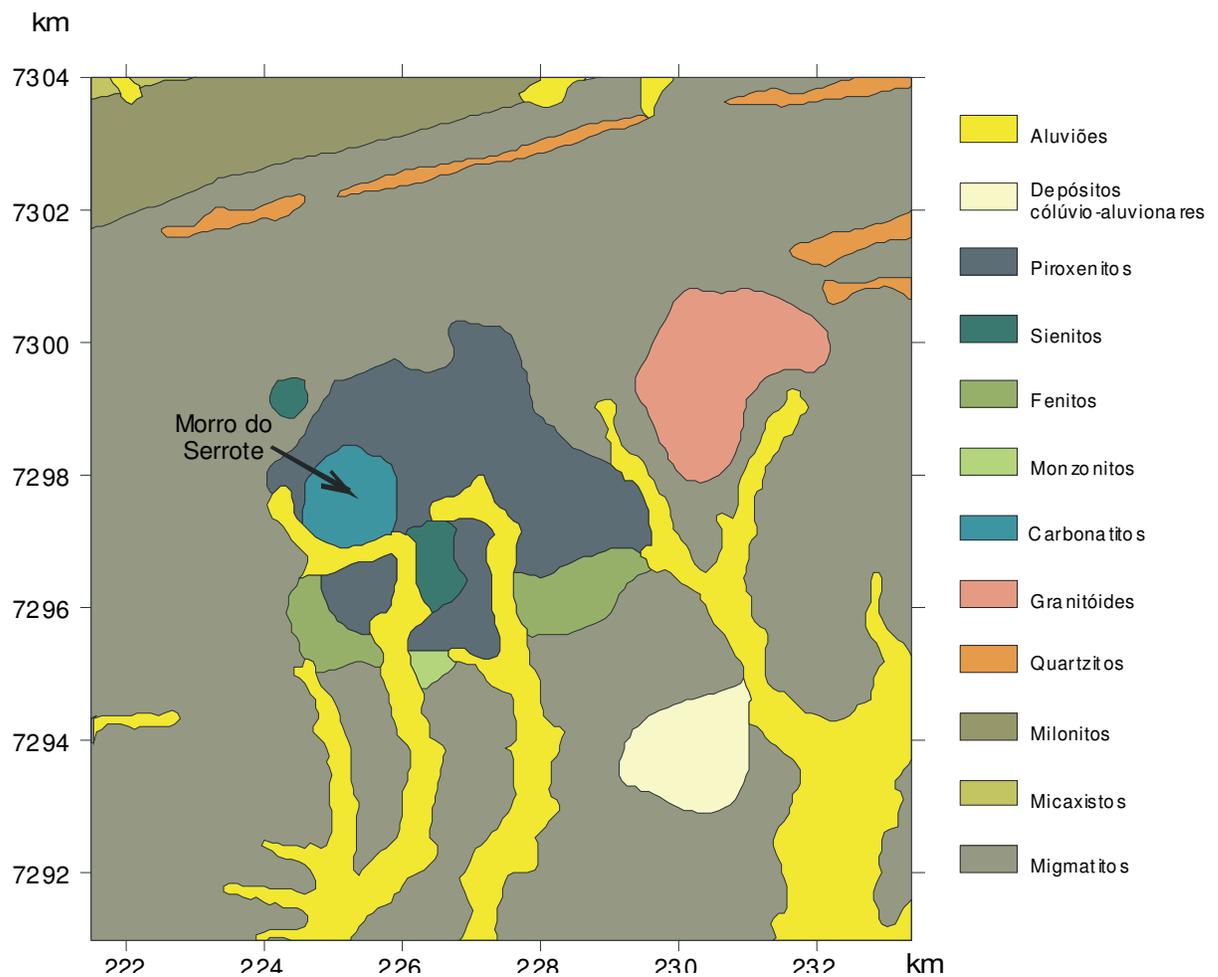


Figura 7.1. Mapa geológico (Slavec, 2000).

A associação de apatita ao carbonatito favoreceu o desenvolvimento de um perfil de alteração extremamente rico em P_2O_5 constituindo a concentração residual de apatita com maior teor em óxido de fósforo no Brasil (Alcover Neto & Toledo, 1993).

O Complexo tem estrutura anular assimétrica centrada no carbonatito, sendo o mergulho dos contatos entre o carbonatito e o anel de ijolitos aproximadamente vertical. O setor setentrional é dominado por olivina-clinopiroxenitos e lentes de olivina-gabro alcalino na porção mais ao norte dos afloramentos. Nefelina-sienitos afloram no corpo isolado do Morro da Casa de Pedra sendo que em sua porção oriental prevalecem aqueles de maior granulação. Essas rochas afloram também na porção sudoeste do complexo. Parcos eventos de essexitos e sienodioritos são observados no complexo. Diques de basanita a fonotefrito e fonolito, com largura de poucos centímetros até 2 m, afloram em várias localidades e cortam principalmente os piroxenitos e nefelina sienitos (Born, 1971; Beccaluva et al., 1992).

A fenitização do embasamento é evidente, principalmente ao redor das porções a noroeste e ao sul do complexo, onde se desenvolveram feldspatos alcalinos, biotitas e raros anfibólios sódicos (Born ,1971; Teixeira et al., 1987; Beccaluva et al., 1992).

A **interpretação geoquímica** do Complexo Alcalino de Juquiá atribui seu espectro mineralógico a processos de diferenciação fracionada combinados com a **imiscibilidade de líquidos de um único magma fonte circunscrito a um sistema fechado de baixa pressão, que pode ser representado por uma câmara magmática simples e rasa** (Beccaluva et al., 1992). Essa interpretação será comentada após a observação do modelo de distribuição de massa, obtido através do modelo gravimétrico e comparada com os dados do levantamento aerogeofísico São Paulo - Rio de Janeiro (CPRM, sub área 3).

7.4 Aquisição de dados

O levantamento gravimétrico foi realizado com um gravímetro LaCoste & Romberg modelo G, com realimentação eletrostática analógica e, as medidas, foram referidas à rede gravimétrica fundamental através da estação Ribeira-B. Cada medida foi corrigida dos efeitos de maré terrestre calculada através do modelo de Longman (1959). A correção topográfica não foi realizada já que as massas atrativas ao redor de Juquiá representam uma correção anômala pequena. O instrumento utilizado permite obter leituras com precisão de 0,05 mGal. A distância relativa entre as estações variou de 500 a 1000 m na porção central do complexo até cerca de 3000 m, próximo e além de sua borda. Ao todo foram implantadas 291 novas estações e, considerando as 75 estações já existentes contou-se com um total de 366 estações gravimétricas na área de interesse.

As medidas de altimetria utilizaram o método de barometria controlada através do registro contínuo com base fixa, centrada na área do levantamento (Fazenda Morro do Serrote). A aquisição é descrita no capítulo II da tese. Todas as medidas foram referidas às referências de nível de Juquiá (RN-2120V) e de Registro (RN- 2122J) da Rede de Nivelamento do IBGE.

7.5 Modelo 3D Gravimétrico

O modelo em planta é observado na Figura 7.2, sendo constituído por um complexo alcalino homogêneo, a não ser da existência do carbonatito que representa uma pequena porção heterogênea. As densidades envolvidas no modelo são de 2,8 g/cm³ para a rocha encaixante (gnaisse), de 3,3 g/cm³ para o complexo e de 2,58 g/cm³ para o carbonatito. Os volumes obtidos foram os

seguintes: carbonatito ($1,71 \text{ km}^3$) e alcalina ($95,18 \text{ km}^3$). A massa calculada para a alcalina resultou $0,48720 \times 10^{14} \text{ kg}$, sendo aquela do carbonatito de $0,36342 \times 10^{12} \text{ kg}$.

A análise estatística do modelo é verificada na Figura 7.3. O campo modelado apresenta desvio padrão de 1,08 mGal, sendo que apenas 5% dos dados possuem discrepâncias entre -3 e -4 m Gal . O coeficiente de correlação resultou em 99%, ou seja o modelo é representativo sendo o campo modelado ajustado ao observado na maioria das estações de medidas. Vale lembrar que nas regiões onde o ajuste não é ideal, a discrepância pode representar uma heterogeneidade local nas características geológicas.

Na Figura 7.4 apresenta-se o perfil que corta o complexo na direção NE, sendo também observado o resíduo gravitacional em planta entre o campo observado e modelado. A máxima profundidade obtida para a densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$ é de 14 km, sendo compatível para as profundidades da crosta superior e inferior na região, 37 km, obtidas através de dados sismológicos (Sand, 2003). A aparente “inconsistência” entre o campo observado e modelado no perfil 2.5 D, deve-se, sobretudo à dificuldade no ajuste tridimensional, sendo que no contexto geral o modelo é representativo.

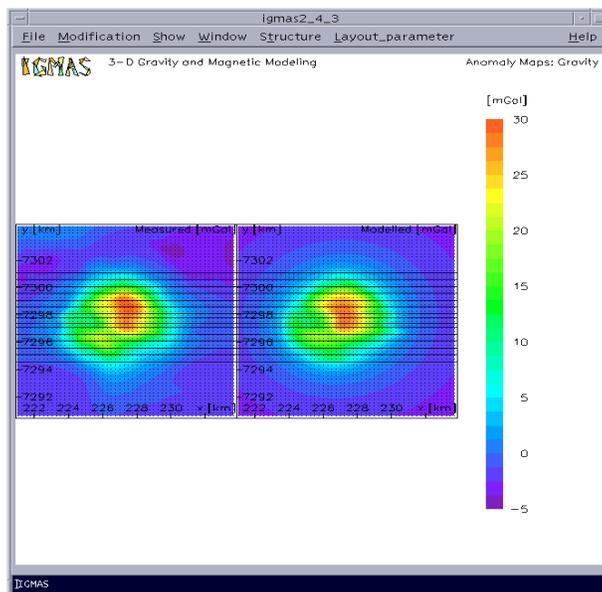


Figura 7.2. Modelo gravimétrico para o complexo de Juquiá, à esquerda observa-se o campo gravimétrico observado e à direita o modelado através do programa IGMAS (Götze & Lahmeyer, 1988).

O modelo 3D para o complexo é observado na Figura 7.5, tendo formato semelhante ao encontrado para o complexo de Pariquera Açú (Rugenski, 2001), com afinamento das secções horizontais para aumento da profundidade. No mesmo modelo observa-se a possibilidade do corpo estar fraturado na direção NW/SE, conseqüente da ação tectônica, talvez ocorrida pós o alojamento ou pela sua formação através da vários pulsos magmáticos no decorrer do tempo geológico. No entanto, às informações petrográficas e geoquímicas indicam que Juquiá foi formado num sistema quase fechado, combinando o processo de cristalização fracionada com a imiscibilidade do magma carbonatítico numa única câmara magmática, onde a seqüência plutônica se concretizou em níveis rasos de profundidade (Beccaluva et al., 1992). O alojamento final ocorreu através da

liberação quase contínua do magma através de pulsos, formando o corpo na atual posição em que se verifica hoje. Essa hipótese será comentada a seguir.

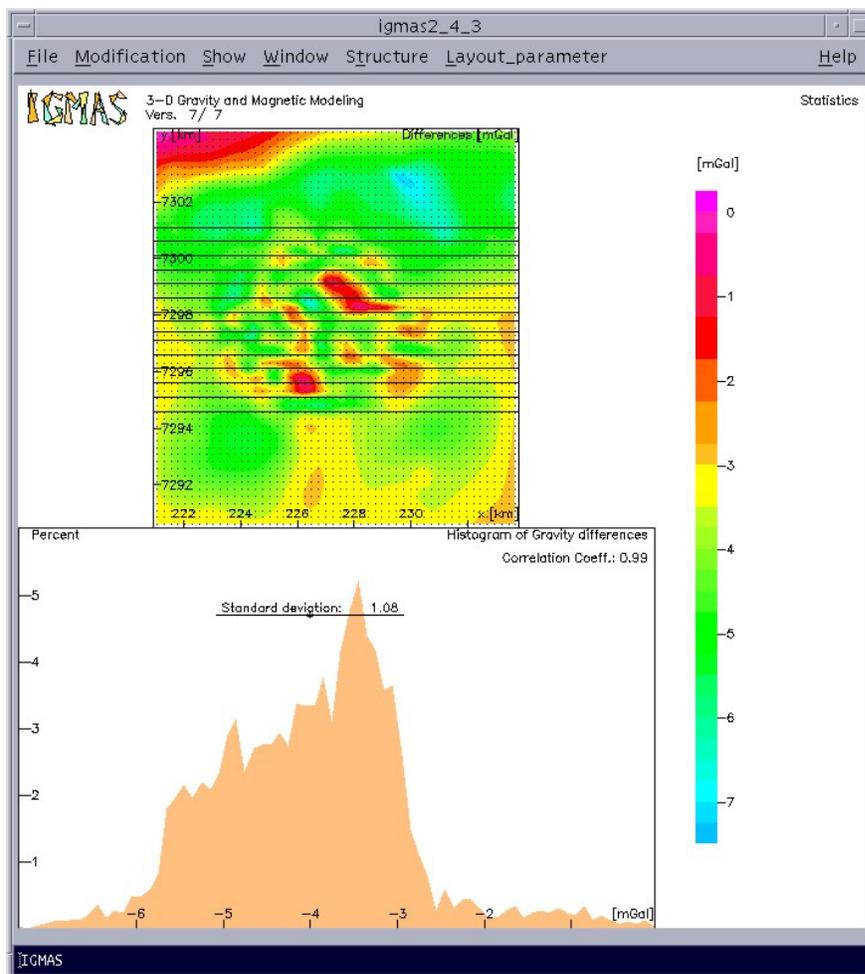


Figura 7.3. Análise estatística do modelo. O campo modelado apresenta correlação de 99% com os dados observados

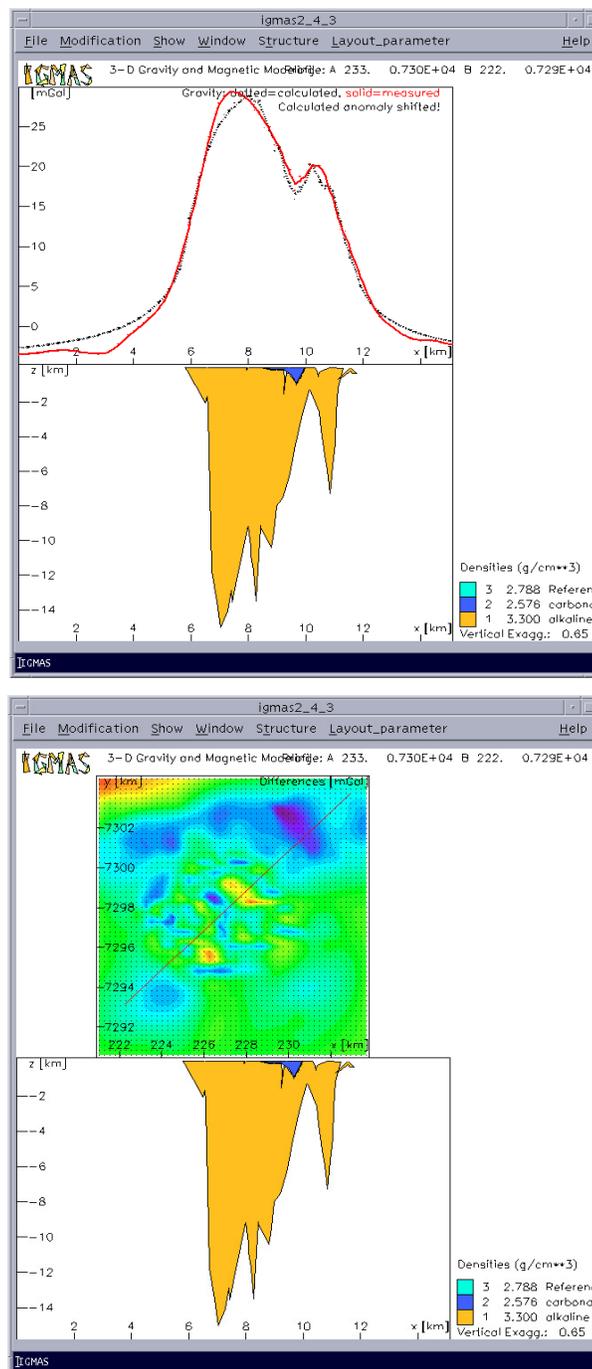


Figura 7.4. Perfil com direção NE que corta o complexo de Juquiá. Abaixo se observam as dimensões para o referido modelo com o resíduo (em planta) entre o campo observado e modelado. Acima, além do modelo no formato 2.5 D é apresentado o campo observado (em vermelho) e modelado (em preto) em perfil.

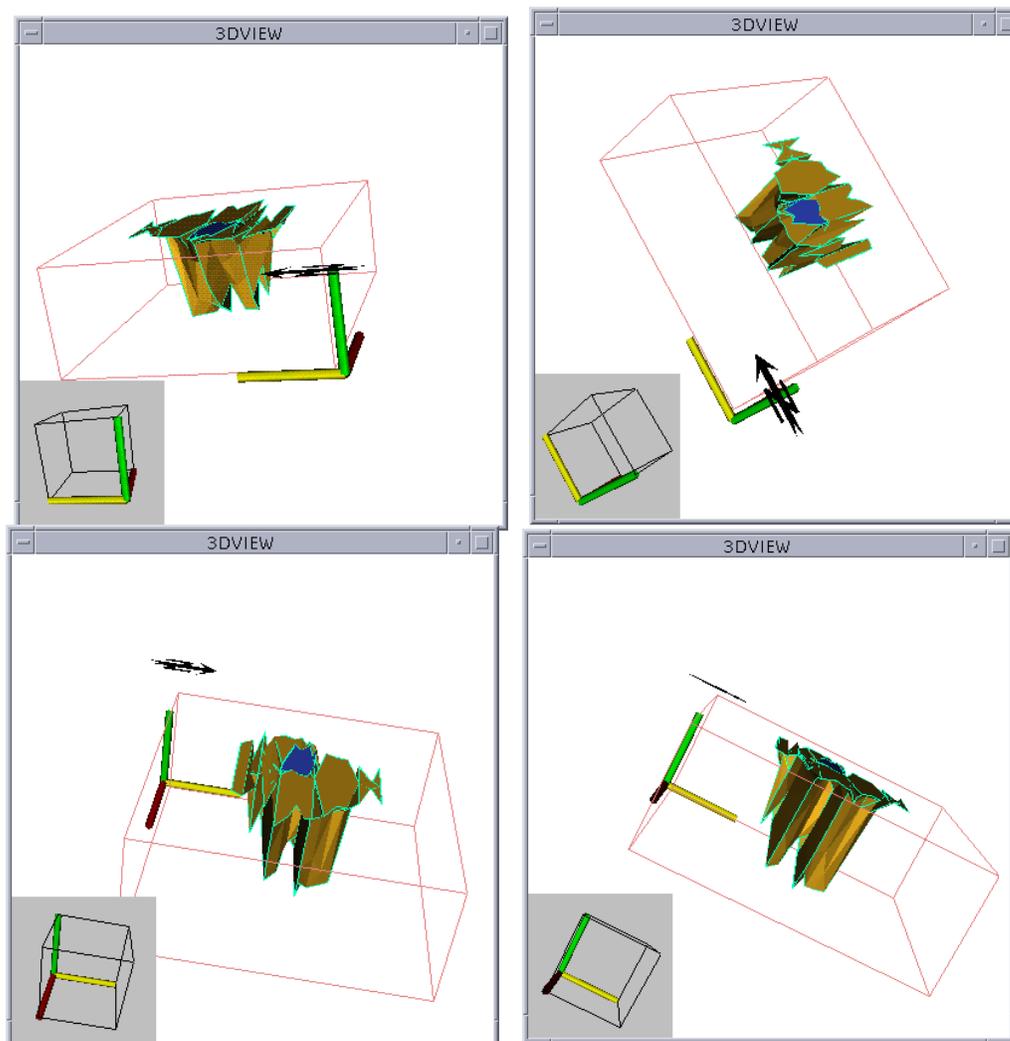


Figura 7.5. Modelo tridimensional do complexo de Juquiá. Em azul está representado o carbonatito.

O mapa de densidade superficial da massa (Figura 7.6) representa a projeção da distribuição de massa do corpo em superfície. O mesmo não indica a existência de um eixo de concentração de massa eminente como verificado para o complexo de Pariqueira Açu, apresentando-se em blocos com máximos global e local. O azimuth do lineamento Guapiara tem direção média voltada para NW/SE. Ao observar o máximo global, estrutura linear NW do centro de massa, pode-se associar o seu alinhamento ao lineamento Guapiara.

A separação do centro de massa em blocos pode ser considerada como uma ruptura estrutural do maciço após o seu alojamento pelo sistema de falhas geológicas. Os blocos podem ter sido rotacionados no espaço devido às falhas que possuem direção NW/SE e devido a própria falha Lancinha- Cubatão que está localizada nas proximidades de Juquiá. Reativações da mesma podem ter contribuído para o fraturamento do complexo em blocos e sua rotação no espaço.

Outra interpretação quanto ao alojamento pode ser inferida por blocos contemporâneos, pulsos magmáticos contemporâneos, que foram condicionados pelo sistema de falhas na direção NW/SE. O maior problema para essa teoria é aquele de explicar um alojamento realizado num sistema fechado, como sugerido pelos dados geoquímicos (Beccaluva et al., 1992).

Na Figura 7.7 são observados o mapa magnético em relevo sombreado (tons de cinza) e as isolinhas do mapa de distribuição de massa superficial sobreposta a esse (cor vermelha). Verifica-se que os blocos descritos pelo modelo são separados por lineamentos magnéticos, supostamente falhas geológicas na direção NW/SE, preenchidos por material rico em minerais ferrimagnéticos, diques mafico-ultramáficos. Esse mapa corrobora com uma interpretação de pulsos magmáticos dando origem ao complexo de Juquiá, ou do seu fraturamento pós-alojamento. Um fraturamento posterior ao alojamento estaria em concordância com a interpretação de Beccaluva et al., (1992). Nesse caso um único magma fonte circunscrito a um sistema fechado de baixa pressão, que pode ser representado por uma câmara magmática simples e rasa é suportado pelo modelo gravimétrico 3D. É importante notar que os dois máximos no mapa de distribuição

de massa poderiam estar em algum tempo geológico unidos, formando a “raiz” do conduto por onde o magma ascendeu. No caso de uma interpretação por pulsos, a existência do campo magnético terrestre (cmt), implicaria em que cada pulso deveria reter uma magnetização remanescente característica do campo presente na época de seu resfriamento. Diante das características magnéticas das litologias presentes, e admitindo-se a possibilidade de medir com suficiente acurácia essas variações, tratar-se-ia de um estudo específico, fora do âmbito do presente trabalho.

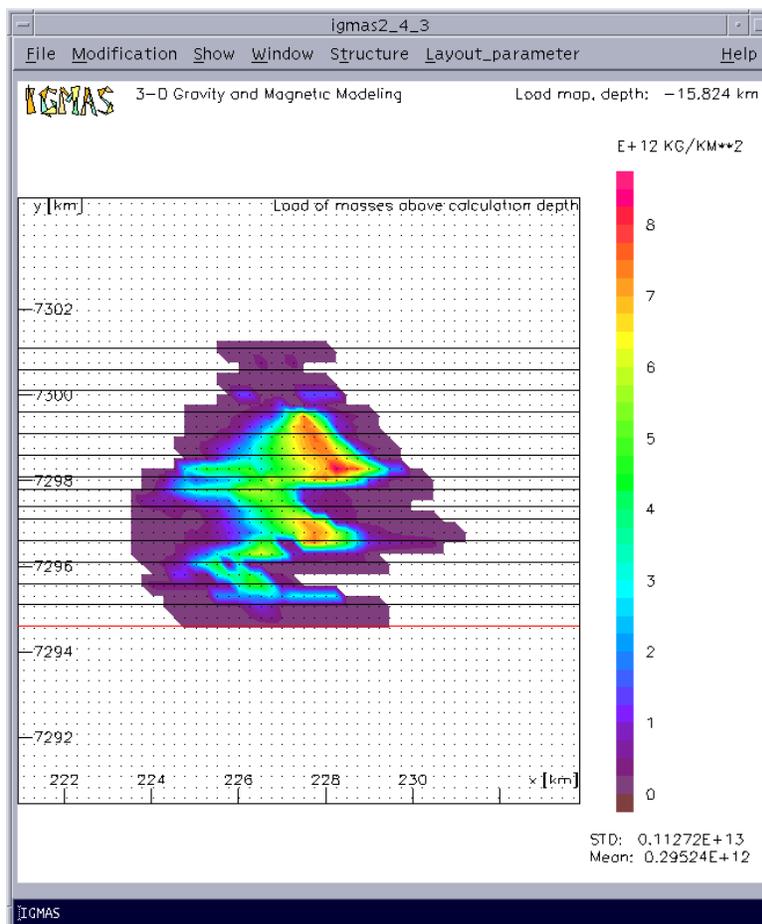


Figura 7.6. Mapa de distribuição superficial de massa para o complexo de Juquiá. A configuração da distribuição de massa combina com um alojamento condicionado ao sistema de falhas.

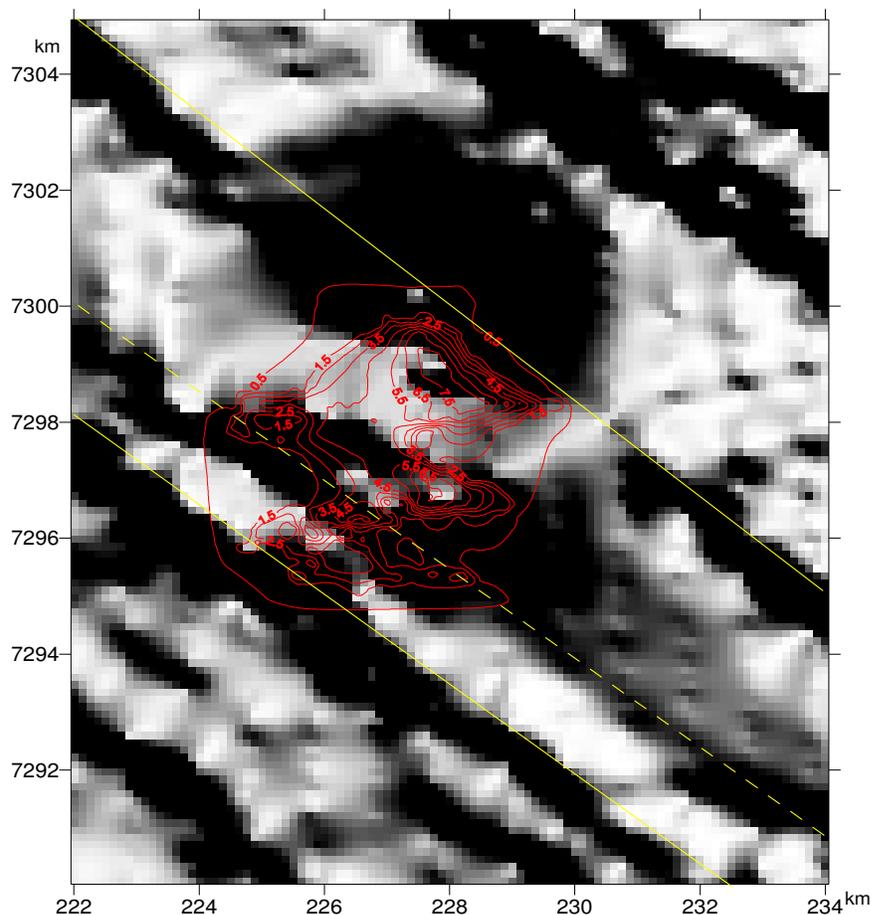


Figura 7.7. Mapa da distribuição de massa (linhas vermelhas) sobreposto ao mapa magnético (visualizado na forma de relevo sombreado onde a luz incide na direção 45° NE, com inclinação de 30°). As linhas na cor amarela representam os lineamentos magnéticos que configuram “falhas geológicas ou diques”.

7.6 Informações Adicionais

Os complexos alcalinos de Jacupiranga, Juquiá, Registro e Pariquera Açú apresentam altos gravimétricos com valores anômalos superiores a 8 mGal (Figura 7.8). Como todas apresentam uma resposta gravimétrica semelhante (densidade superior a 2,6 g/cm³), e anomalias magnéticas intensas indicando presença de grande concentração de minerais ferrimagnéticos, sugere-se que

foram originadas por pelo menos um magma com alta susceptibilidade para temperaturas abaixo do ponto de Curie.

Na Figura 7.9 são observados alinhamentos magnéticos radiais a Jacupiranga interligando os complexos de Pariquera Açú e Registro, esses alinhamentos podem ter sido no passado zonas de franqueza litosférica na qual houve intrusão do magma alcalino. Juquiá não apresenta nenhuma indicação de fratura ou falhamento ligando-se a Jacupiranga. Pode-se supor que Pariquera Açú e Registro tenham uma ligação com Jacupiranga, e se assim for, ao longo das zonas de fraturas radiais seria possível encontrar rochas alcalinas adicionais.

De outra forma, pode se interpretar também que o peso de Jacupiranga na litosfera pode ter ou estar gerando as fraturas radiais, indicando que a rocha está em movimento na litosfera. Logo, o peso da carga de massa de Jacupiranga não foi ou é suportado pela litosfera gerando assim as fraturas radiais. Esse movimento ao longo dos anos pode ser menor que 1 mm por milhão de anos, e o assunto será abordado nos últimos capítulos junto com a alcalina de Poços de Caldas.

Outra informação importante, é que os complexos alcalinos do vale do Ribeira possuem campo magnético normal, enquanto que o de Juquiá é reverso. Essa inversão pode ser resultante de uma de duas causas: (1) da intensa magnetização remanescente resultante da inversão magnética do pólo na época do resfriamento; como Jacupiranga e Juquiá foram alojados entre 130 e 127 Ma no Jurássico, deveriam ter a mesma polaridade do campo magnético, no entanto esse período teve uma intensa oscilação na inversão de polaridade do campo terrestre, resultando no mínimo em três inversões magnéticas (Figura 7.10); (2) da

baixa susceptibilidade das rochas de maior volume (piroxenito). Medidas paleomagnéticas indicam que a susceptibilidade do piroxenito varia entre 52,17 a 340,34 μ SI. A susceptibilidade do sienito é da ordem de 48.704,03 μ SI e do carbonatito 169,14 μ SI. Para o piroxenito verifica-se uma larga banda de variação na susceptibilidade que reflete uma magnetização induzida de 0,00112 a 0,00731 (A/m), sendo a magnetização remanescente de 0,0065 a 0,0156 (A/m). Já para o sienito e o carbonatito, a magnetização induzida é de 1,05 e 0,0036 (A/M), e a magnetização remanescente de 0,91 e 0,0014 (A/m), respectivamente.

A magnetização do sienito é muito maior do que a do piroxenito, isso ocorre porque o sienito de Juquiá é enriquecido em minerais de piroxênio (Beccaluva et al., 1992) e os mesmo conseguiram guardar o registro do campo magnético muito mais do que os minerais ferrimagnéticos do piroxenito. Um evento térmico ou mesmo uma alteração química dos minerais ferrimagnéticos podem ter proporcionado a perda da magnetização. Nesse sentido um modelo de pulsos magmáticos, quase simultâneos no tempo geológico, ou fraturamento somado a evento térmico, que alojou os diques, não podem ser testados e, portanto, descartados.

As informações geoquímicas e a hipótese de pulsos podem convergir para um único modelo desde que tenha existido uma sub-câmara magmática próxima da superfície. Assim juntando todos os dados (gravimétricos, magnéticos e geoquímicos) é possível hipotizar um modelo de pulsos magmáticos para a geração de Juquiá.

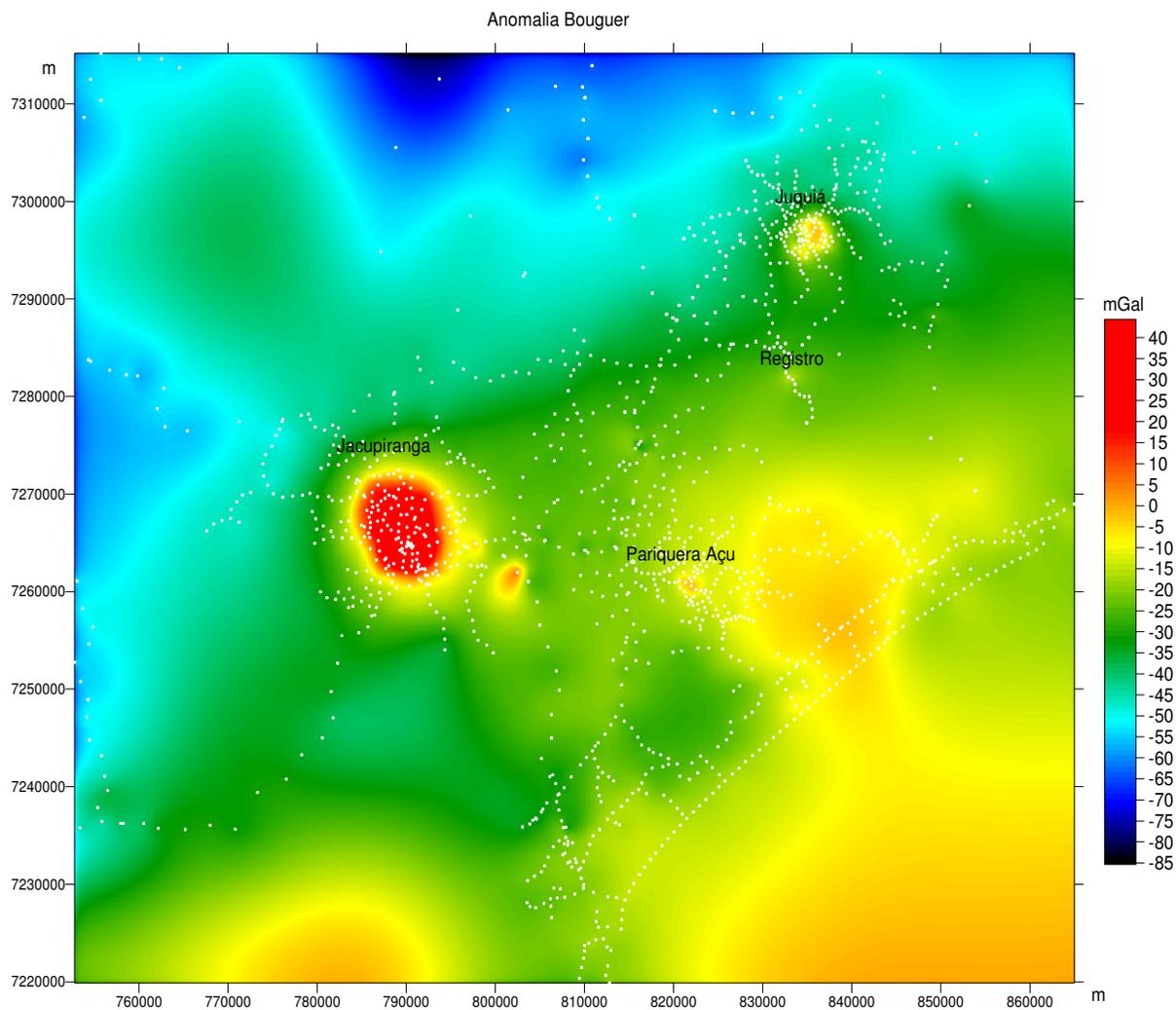


Figura 7.8. Anomalia Bouguer dos complexos alcalinos da vale do Ribeira. Os pontos na cor branca representam as estações gravimétricas.

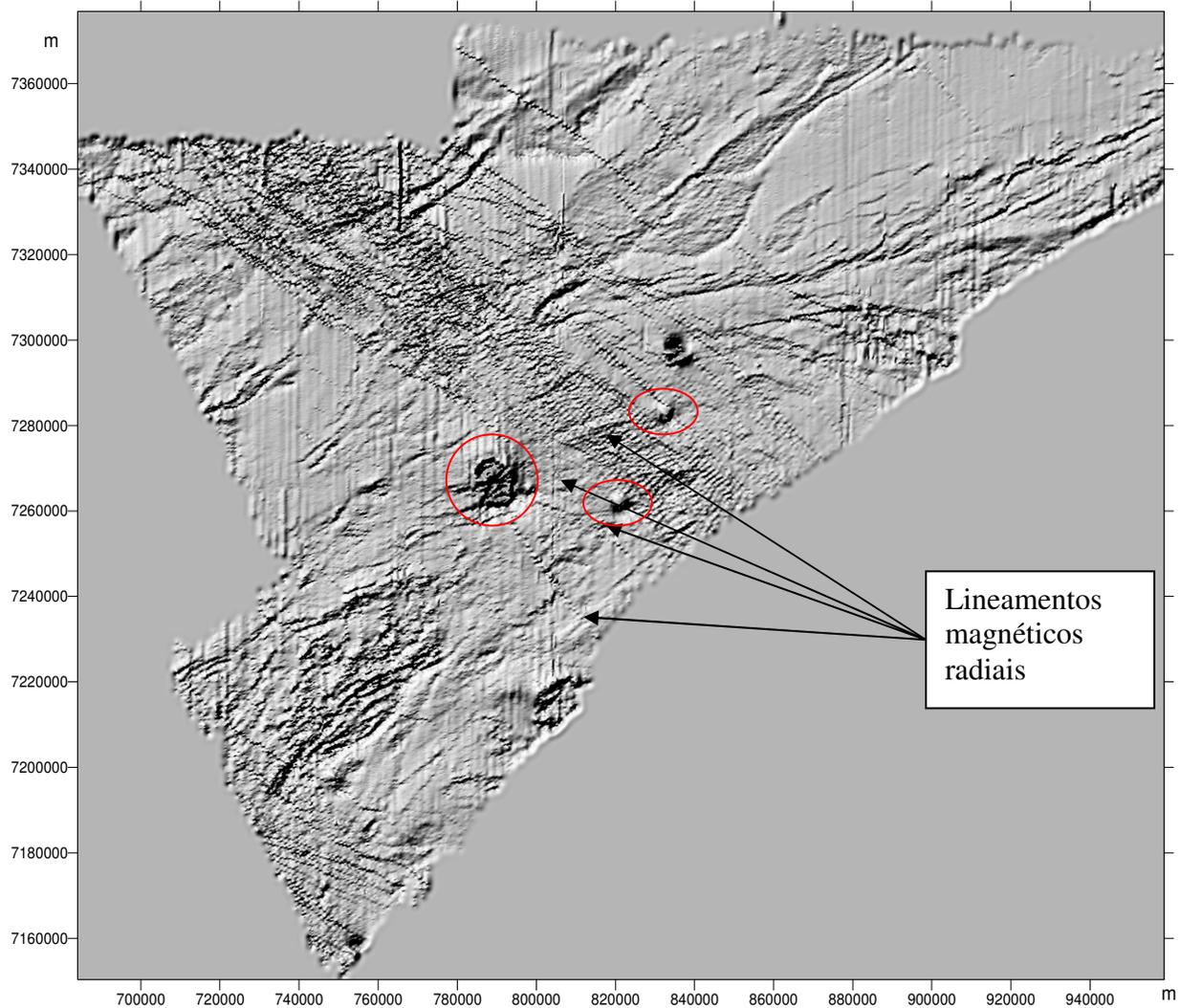


Figura 7.9. Levantamento aeromagnético da CPRM: os alinhamentos na direção NW são diques máficos a ultramáficos que compõem o lineamento Guapiara. As circunferências em vermelho indicam a posição das alcalinas de Jacupiranga, Registro e Pariquera Açu. As setas indicam a posição dos lineamentos radiais a Jacupiranga. (CPRM, 1995)

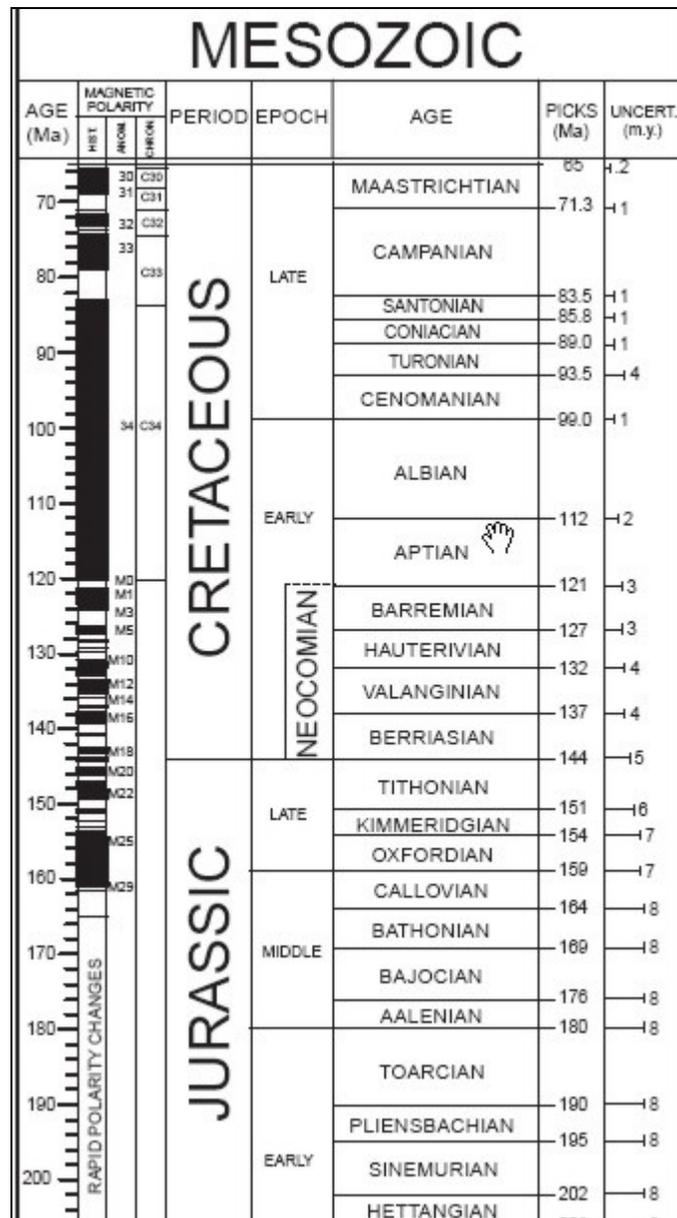


Figura 7.10. Escala de tempo geológico (fragmento) com as inversões magnéticas e seus respectivos períodos. (Palmer & Geissman, 1999)

7.7 Conclusão

Juquiá é quase contemporâneo aos diques do arco de Ponta Grossa e hoje sua disposição geométrica é apresentada por blocos (referente à sua distribuição de massa), delimitados por diques com direção NW - SE. Tudo indica que o fraturamento do corpo pós-alojamento pode ter ocorrido, sendo que esse evento de característica mecânica e térmica pode ter parcialmente desmagnetizado o campo magnético dos piroxenitos, devido à transferência de calor por condução térmica nos diques a uma temperatura próxima à de Curie.

Um modelo de alojamento por pulsos magmáticos também é possível, mesmo que Juquiá tenha sido gerado em baixas pressões dependendo da atuação dos paleo-esforços na região de alojamento.

Com uma densidade de $2,8 \text{ g/cm}^3$ para a rocha encaixante (gnaisse), e uma densidade de $3,3 \text{ g/cm}^3$ para o piroxenito (tipo litológico predominante), e de $2,58 \text{ g/cm}^3$ a densidade do carbonatito, os volumes obtidos foram os seguintes: carbonatito ($1,71 \text{ km}^3$), alcalina ($95,18 \text{ km}^3$). Somando os volumes obtemos cerca de 96 km^3 valor este superior ao encontrado por Slavec et al. (2001) de 48 km^3 . A massa é de $0,48720 \times 10^{14} \text{ kg}$ para a alcalina, e de $0,36342 \times 10^{12} \text{ kg}$ para o carbonatito. A máxima profundidade obtida no modelo 3D foi de 14 km, sendo que anteriormente Slavec et al. (2001) obtiveram 6 km. Portanto o valor da profundidade de Juquiá deve variar entre e 6 e 14 km.

7.8 Referência

Alcover Neto A. & Toledo M.C.M. 1993. Evolução Supérgena do Carbonatito de Juquiá, SP. Ver. IG, São Paulo, 14:31-43.

Beccaluva L., Barbieri M., Born H., Brotzu R, Coltorti M., Conte A., Garbarino C., Gomes C.B., Macciotta G., Morbidelli L., Ruberti E., Siena F., Traversa G. 1992. Fractional ChrySTALLIZATION and Liquid Immiscibility Processes in the Alkaline Carbonatite Complex of Juquiá (São Paulo, Brazil)./ *Petrol.*, 33:1371 - 1404.

Born H. 1971. O complexo alcalino de Juquiá. Tese de doutorado, Inst. Geociênc. USP, 176 pp., inédita.

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.

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.

Longman I.M. 1959. Formulas for computing the tidal accelerations due to the Moon and the Sun. *J. Geophys. Res.*, 64:2351-2355.

Palmer, A. R., & Geissman. John, 1999. The Geological Society of America. Product.

Sand, G.L. de A. F., 2003. Estrutura da Crosta no Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, usando função do receptor. 2003. Tese (Doutorado em Geofísica) - Universidade de São Paulo.

Slavec, G. B.; Mantovani, M. S. M; Shukowsky, W., (2001). Contribuição ao Estudo do Complexo de Juquiá. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(2):203-210.

Teixeira A.L., Dantas A.S.L., Gimenes Fº J.L.A.L., Nagata N., Fernandes L.A., Albuquerque P J.L. 1987. Geologia da Folha de Juquiá, Baixo Vale do Ribeira, SP. São Paulo (IPT, Relatório Técnico 25.371).