

**INPE-5321-PRE/1718**

**ALGUMAS INTERPRETAÇÕES SOBRE A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DE PARTE  
DO SUDESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS (BRASIL), COM BASE EM  
IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS GRAVIMÉTRICOS**

**Athos Ribeiro dos Santos**

**INPE  
São José dos Campos  
Agosto de 1991**

**SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-5321-PRE/1718**

**ALGUMAS INTERPRETAÇÕES SOBRE A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DE PARTE  
DO SUDESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS (BRASIL), COM BASE EM  
IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS GRAVIMÉTRICOS**

**Athos Ribeiro dos Santos**

**Aceito para apresentação no V Simpósio Latino Americano de  
Percepção Remota, Cuzco, Peru, 28 Oct. a 01 Nov., 1991**

**INPE  
São José dos Campos  
Agosto de 1991**

**ALGUMAS INTERPRETAÇÕES SOBRE A EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DE PARTE DO  
SUDESTE DO ESTADO DE MINAS GERAIS (BRASIL), COM BASE EM IMAGENS  
DE SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS GRAVIMÉTRICOS**

Athos Ribeiro dos Santos  
Secretaria da Ciência e Tecnologia  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758 - Caixa Postal 515  
12201 - São José dos Campos, SP - Brasil  
Tel: (0123)41-8977 Ramal 279 - Fax símile: (123)21-8743

**RESUMO**

Este trabalho discute algumas interpretações sobre a tectônica de fraturamento e a evolução geológica, em uma região do sudeste do Estado de Minas Gerais, utilizando-se produtos de sensoriamento remoto de pequena escala e dados gravimétricos. Esta área é caracterizada por uma evolução policíclica complexa e é composta de rochas metamórficas pré-cambrianas, de idades que variam do Arqueano ao Proterozóico Superior. A região engloba uma importante província produtora de minerais. Este estudo indicou a presença de antigas descontinuidades crustais, que tiveram um papel fundamental como controles estruturais durante a evolução geológica desta região. Foi possível inferir sobre atividades dinâmicas destas descontinuidades crustais profundas, inclusive sobre tipos de movimentação de falhas e suas idades relativas.

**ABSTRACT**

This paper discusses some interpretations about fault tectonics and geologic evolution in the southeastern part of the Minas Gerais State based on the small scale remote sensing products and gravimetric data. This area is composed of Archean to upper Proterozoic metamorphic rocks which exhibit a complex polycyclic evolution. An important productive mineral province is situated in this region. This study reveals several ancient crustal discontinuities which had a fundamental role of structural control during the geologic evolution of this region. These deep crustal discontinuities may give a clue for deducing the different types of the fault movements and their relative ages.

**INTRODUÇÃO**

A utilização de produtos sensores de pequena escala no estudo da tectônica de fraturamento, buscando individualizar, caracterizar e hierarquizar os diversos eventos de fraturamento, bem como

estabelecer o seu papel ao longo da história geológica, permitiu interpretações evolutivas compatíveis com o atual conhecimento da área de estudo. A utilização de dados e interpretações gravimétricas, de caráter também regional, resultou numa maior confiabilidade no estudo, através de uma significativa convergência de evidências.

Este trabalho propõe e discute algumas interpretações tectono-evolutivas em uma área de grande complexidade geológica, baseadas em imagens de sensoriamento remoto nas escalas de 1:250.000 e 1:100.000 (TM do Landsat e mosaicos de Radar SLAR do RADAMBRASIL) e dados gravimétricos disponíveis. A área inclui uma das mais importantes províncias minerais do Brasil: o Quadrilátero Ferrífero. Apesar de constituir uma das regiões mais intensamente pesquisadas do país, devido ao interesse econômico, é, ainda hoje, palco de posicionamentos extremamente controversos.

### BASE CIENTÍFICA

As estruturas rúpteis representam, dentro dos estudos geológicos, as feições mais conspícuas na visão sinóptica dos sensores orbitais. A extração, análise e interpretação destas feições fotográficas tem sido uma preocupação constante dos estudiosos (Veneziani e Anjos, 1982; Santos e Schorsch, 1984; Anjos, 1986; Santos, 1986a,b; Crepani, 1987; Veneziani, 1987; entre outros). Os resultados obtidos tem demonstrado a validade da pesquisa como mais uma ferramenta para o conhecimento e o entendimento do arcabouço tectônico de determinada região.

A associação dos elementos de imagem fotográfica de pequena escala ao seu significado geológico no terreno foi o ponto inicial desses estudos fotogeológicos. No caso específico das estruturas rúpteis, a consideração da escala de observação é fundamental para se entender a representatividade das estruturas geológicas a nível de superfície do terreno.

Os pesquisadores do leste europeu tem sido os que mais se dedicam ao estudo da distribuição regional e mesmo global de juntas e fraturas. Com o intuito de distinguir entre aquelas estruturas de caráter local e aquelas de distribuição regional e sistemática, Plicka (1974) propôs dois tipos fundamentais de macrojuntas: de acamamento e zonas de juntas.

As juntas de acamamento referem-se a aquelas confinadas a um estrato, são aproximadamente perpendiculares ao plano de acamamento e, portanto, dependentes da atitude da camada rochosa onde instalaram-se.

As zonas de juntas constituem grupos de estruturas com alto ângulo de mergulho, espaçadas regularmente, sub-paralelas, estendendo-se por amplas áreas e grandes distâncias, e com profundidades consideráveis. As zonas de juntas de um dado sistema (azimute) ocorrem repetidamente, formando conjuntos de zonas de juntas de gênese uniforme, e associam-se a linhas de falhas. Estas zonas de juntas independem da atitude e do tipo de rocha. As zonas de juntas estendem-se ao longo de grandes falhas da crosta terrestre.

Plicka (1974) e outros autores (Kutina, 1974; Nickelsen, 1974; Kvet, 1974; Bryukhanov et al., 1982; entre outros) observaram, ainda que:

- . as zonas de juntas são, normalmente, antigas e poliativas, os falhamentos desenvolvem-se a partir delas;
- . os padrões de fraturas são cumulativos e as zonas de juntas podem propagar-se verticalmente para as rochas sobrejacentes mais jovens;
- . os padrões de fraturas repetem-se em todas as escalas, desde microscópica até a nível de imagem de satélite;
- . conjuntos de zonas de juntas podem ser diretamente indicados por feições geomórficas;
- . zonas de juntas podem indicar tectônica profunda.

As zonas de juntas, segundo esses estudos, são, portanto, as estruturas cuja distribuição sistemática torna-as representativas a nível da escala dos produtos de sensoriamento remoto de baixa resolução espacial, e são, desta forma, instrumentos hábeis a interpretações tectono-estruturais regionais. Estudos posteriores (Santos, 1986a; Anjos, 1986; Veneziani, 1987; Crepani, 1987; entre outros), comprovaram estas assertivas.

#### CONTEXTO REGIONAL

Regionalmente, a área situa-se no Craton de São Francisco (Almeida, 1977), predominando amplamente rochas metamórficas precambrianas de evolução policíclica complexa (Figura 1). Dentro desse quadro, sobressaem extensas áreas de rochas-gnáissicas e granulíticas arqueanas, parcialmente retrabalhadas nos ciclos Transamazônico e Brasileiro. Restos de sequências "greenstone belt" arqueanas encontram-se encrustados neste embasamento granito-gnáissico. Completam o quadro precambriano regional, os depósitos sedimentares e localmente vulcânicos, de graus deformacionais variáveis e metamórficos em geral baixos,

caracterizando coberturas plataformais e de margem continental, de idades Proterozóico Médio a Superior (Supergrupos Minas, Espinhaço e São Francisco).

## RESULTADOS

### SÍNTESE GEOLÓGICA

Apesar de algumas considerações mais regionais, o estudo enfoca, principalmente, a porção da Figura 1 ao sul do paralelo 20<sup>o</sup>.

A área de estudo é constituída, principalmente, por extensas áreas de ocorrência de rochas gnáissicas, graníticas e granulíticas, conhecidas na literatura, entre outros nomes, como Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais (Inda et al., 1984). Este complexo, na área de estudo, é constituído, a oeste por predominância de gnaisses e migmatitos diversos e, a leste por gnaisses, migmatitos complexos, granulitos, granitóides progressivos e polimetamórficos de alto grau. Pelo menos 4 gerações distintas de rochas metabásicas e básicas estão presentes neste complexo (Schorscher et al., 1982). São comuns, ainda, corpos quartzíticos, rochas calcossilicatadas, lentes de mármore, mica-xistos, xistos grafitosos, etc.

As sequências supracrustais arqueanas do "Greenstone Belt" Rio das Velhas ocorrem no extremo sul da Serra do Espinhaço, na área do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2). Representam unidades vulcano-sedimentares que incluem em sua base, lavas ultramáficas, com komatiitos peridotíticos, com textura "spinifex" (Schorscher et al., 1982).

As rochas do Supergrupo Minas distribuem-se no Quadrilátero Ferrífero em dobras isoclinais recumbentes (Figura 2), em contato tectônico por falhamentos de empurrão com todas as outras unidades precambrianas (Dorr, 1969; Schorscher et al., 1982). Baseados em suas feições deformacionais, diversos autores (Fleischer, 1977; Schorscher et al., 1982; entre outros) interpretaram como alóctones as unidades Minas no Quadrilátero Ferrífero.

O Supergrupo Espinhaço tem ocorrência restrita na área de estudo (Figura 2) e é constituído predominantemente por rochas quartzíticas. As relações entre os supergrupos Minas e Espinhaço são ainda muito controversas.

## ANÁLISE DOS FRATURAMENTOS

A análise dos fraturamentos desenvolveu-se a partir de um mapeamento na escala de 1:250.000, das feições de imagem relacionadas a estas estruturas geológicas. Este mapeamento permitiu a caracterização de 5 sistemas principais de fraturamentos: NNE-SSW, NE-SW, E-W, NW-SE e NNW-SSE. Estes sistemas foram analisados quanto a distribuição e frequência de fraturas (Aliyev, 1980; Santos, 1986a). A análise estatística de frequência de fraturas possibilitou o estabelecimento de zonas de densidade máxima de rupturas por sistema e a construção de um mapa com linhas de maior concentração de fraturas (Figura 3). Através deste mapa, foi possível caracterizar as principais zonas de fraqueza que tiveram um papel fundamental como controlador no desenvolvimento e distribuição das fraturas na região. Possibilitou, também, esboçar uma cronologia relativa dos principais eventos de tectônica rúptil e rúptil-dúctil que se desenvolveram na área.

A análise dos fraturamentos permitiu as seguintes interpretações principais:

- a) Uma direção aproximadamente N-S, com variações para NNW-SSE e NNE-SSW, e outra E-W constituem os dois principais e mais antigos sistemas de rupturas, ativos desde o Arqueano, que atuaram como fortes controladores no desenvolvimento e distribuição dos outros sistemas de fraturas. A natureza antiga e poliativa dessas fraturas pode ser comprovada na região do Quadrilátero Ferrífero, pela foliação NNW-SSE das rochas do embasamento gnáissico-migmatítico indicando esforços compressivos e, também, pelos efeitos generativos (portanto, esforços distensivos) durante a instalação do "Greenstone Belt" Rio das Velhas, cujas ocorrências distribuem-se, preferencialmente, segundo essa direção (NNW-SSE). Diversas gerações de diques básicos, de idades desde pré-metamorfismo Minas-Espinhaço até Mesozóico, orientados segundos a direção E-W (Inda et al., 1984), atestam o caráter poliativo e antigo deste sistema de fraturas.
- b) Os sistemas de fraturas que se desenvolveram com direções NE-SW e NW-SE são mais jovens que os anteriores e, provavelmente, contemporâneos. São também poliativos, com uma importante fase de movimentação direcional dextral e sinistral, respectivamente.
- c) Os padrões anômalos de distribuição e concentração de fraturas observados na área do Quadrilátero Ferrífero, são interpretados como mais uma evidência do caráter alóctone das sequências Minas, nesta região.

## INTERPRETAÇÕES GRAVIMÉTRICAS

A partir dos dados gravimétricos existentes sobre a área de estudo (Banco de Dados IAG-USP), foram construídos dois perfis, como mostrado nas Figuras 4 e 5 (localização dos perfis na Figura 1). Baseando-se na análise e interpretação desses perfis, em conjunto com os dados obtidos de trabalhos pré-existentes sobre interpretação gravimétrica na área de estudo, destacam-se:

- a) As fraturas de direção NNE-SSW, as quais se associam os grandes falhamentos inversos de alto ângulo (Figura 1), correspondem as principais anomalias gravimétricas de distribuição regional, longilíneas e de alto gradiente lateral (tipo A de Almeida et al., 1980; tipo I de Inda et al., 1984 e Haralyi et al., 1985), que representam descontinuidades profundas da crosta que delimitam grandes blocos embasamentais, com caráter poliativo desde o Arqueano e com considerável movimentação vertical (Lesquer et al., 1981; Inda et al., 1984; Haralyi et al., 1985).
- b) Os sistemas de fraturamentos com direções NW-SE e NE-SW (e talvez E-W), dentro da área de estudo, correspondem, também, a anomalias gravimétricas lineares (do tipo 3, segundo Haralyi et al., 1985), que truncam e deslocam as anomalias gravimétricas lineares do tipo descrito no item anterior, e por isto consideradas mais jovens e com importante rejeito horizontal. Haralyi et al., (1985) associaram um movimento sinistral para as anomalias com orientação NW-SE e dextral para as anomalias ENE-WSW.
- c) O perfil da Figura 4 mostra uma acentuada anomalia negativa na área de ocorrência do Complexo de Bação, com forte gradiente gravimétrico que caracteriza o limite entre as rochas deste complexo e as dos supergrupos Rio das Velhas e Minas. Isto pode indicar a presença de descontinuidades que representariam as falhas delimitantes do "uplift" do Bação.
- d) A análise do perfil da Figura 5, juntamente com os mapas gravimétricos regionais existentes (Haralyi et al., 1985) indica que o espessamento crustal observado por Blitakow et al., (1979) entre Itabira e Guanhões, associado a uma proeminente anomalia gravimétrica negativa, pode ser estendido para sul até a altura do paralelo 21.



## CONCLUSÕES

Este estudo permitiu que se interpretasse o papel das grandes linhas de descontinuidade na evolução geológica da região, como resumido a seguir.

No Arqueano, fraturas profundas, com direções aproximadas N-S (com variações para NNE-SSW e NNW-SSE) e E-W, delimitavam grandes blocos crustais. Na época de deposição e da tectônica Rio das Velhas, as fraturas NNW-SSE a NW-SE tiveram uma importante atuação. No Proterozóico Inferior as fraturas N-S e E-W foram ativas, provavelmente com movimentação predominante vertical, controlando a formação da bacia, a paleogeografia e a sedimentação Espinhaço. Com a orogênese Minas-Espinhaço formaram-se os grandes cavalgamentos crustais em rochas do complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, aproveitando as rupturas pre-existentes de disposição sub-meridional. A continuidade desta tectônica provocou prolongado soerguimento da parte oriental da região e culminou com a colocação das "nappes" Minas no Quadrilátero Ferrífero, e com obduções crustais ao longo da borda do Espinhaço, estendendo-se, provavelmente, também para sul. Posteriormente aos grandes cavalgamentos de direção aproximada N-S, talvez em uma das fases compressivas E-W desta mesma orogenia Minas-Espinhaço, formaram-se as falhas NE-SW e NW-SE com movimentação dextral e sinistral, respectivamente. Todos esses sistemas foram reativados posteriormente, principalmente no ciclo Brasileiro e no Mesozóico, onde predominaram movimentos verticais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliyev, A. 1980. Regional fracturing of the Pamirs and its metallogenic significance. Doklady Akad. Nauk SSSR, 250:90-93.
- Almeida, F.F.M. de. 1977. O Craton do São Francisco. Rev. Bras. Geoc., 7(4):349-364.
- Almeida, F.F.M. de; Hasui, Y.; Davino, A.; Haralyi, N.L.E. 1980. Informações geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geotectônico. An. Acad. Bras. Ciênc., 52(1):49-60.
- Anjos, C.E. dos. 1986. Tectônica da borda da Bacia do Paraná e seu embasamento na região de Itajaí-Lages-SC. Uma abordagem com imagens fotográficas do sistema Landsat e Mosaicos de Radar. Tese de Doutorado (inédito), USP, 160 p.
- Barbosa, M.P.; Santos, A.R. dos; Veneziani, P.; Schorscher, H.D.; Almeida Abreu, P.A. 1989. Geologia do Espinhaço Meridional, incluindo o Quadrilátero Ferrífero: integração através de dados de sensoriamento remoto. 16 p., INPE - 4904-PRE/1505. São José dos Campos.

- Blitzkow, D.; Gasparini, P.; Sá, N.C. de; Mantovani, M.S.M. 1979. Structure of Southeastern Minas Gerais, Brazil, deduced from gravity measurements. *Rev. Bras. Geoc.*, 9(1):39-42.
- Bryukhanov, V.N.; Bush, B.A.; Yelovich, Ye. L.; Ikonnikov, Yu. N.; Kozitskaya, M.T.; Kotelkov, R.P.; Lebedev, S.P.; Pososhkova, N.S. 1982. Linear and ring structures (as interpreted from satellite photographs). *Geotectonics*, 16(1):1-7.
- Crepani, E. 1987. Análise de fraturas através de imagens fotográficas de baixa resolução espacial: uma contribuição ao estudo da evolução tectônica da região da Chapada do Araripe-NE do Brasil. Tese de Doutorado (inédito), USP, 39 p.
- Dorr, J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S.G.S. Prof. Pap. 641-A, 110 p., Washington.
- Fleischer, R. 1977. Le gisement aurifere a tourmaline de Passagem de Mariana, Minas Gerais, Brésil et son cadre, influence de l'évolution structurale e du metamorphisme sur une mineralization syngénétique familière. Tese de Doutorado. Université de Paris, 110 p.
- Haralyi, N.L.E.; Hasui, Y.; Mioto, J.A.; Hamza, V.M.; Rodrigues, C.R.V. 1985. Ensaio sobre a estruturação crustal no Estado de Minas Gerais com base na informação geofísica. p. 71-94. Contribuição a Geologia e Petrologia. Bol. Esp., Núcleo Minas Gerais, S.B.G., Belo Horizonte.
- Inda, H.A.V.; Schorscher, H.D.; Dardenne, M.A.; Schobbenhaus, C.; Haralyi, N.L.E.; Branco, P.C. de A.; Ramalho, R. 1984. O Craton do São Francisco e a Faixa de Dobramentos Araçuaí. Cap. V, p. 193-248. In: Schobbenhaus, C. et al. (coords.) 1984. Texto Explicativo do Mapa Geológico do Brasil e da Área Oceânica Adjacente Incluindo Depósitos Mineraiis, 501 p., escala 1:2.500.000, M.M.E., DNPM, Brasília, DF.
- Kutina, J. 1974. Relationship between the distribution of big endogenic deposits and basement fracture pattern - examples from four continents. p. 565-593. Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics. Salt Lake city Utah, June, 3-7, 1974.
- Kvet, R. 1974. Planetary equidistant rupture systems. A new concept based on the study of joint zones. p.594-603. Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.

- Lesquer, A.; Almeida, F.F.M. de; Davino, A.; Lachaud, J.C.; Mailard, P. 1981. Signification structurale des anomalies gravimétriques de la partie sud du Craton de São Francisco (Brésil). *Tectonoph.*, 76:273-293.
- Nickelsen, R.P. 1974. Early jointing and cumulative fracture patterns, p. 193-199. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- Plicka, M. 1974. Observations on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. p. 2,79-289. *Proceedings of the First International Conference on the New Basement Tectonics*. Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974.
- Santos, A.R. dos. 1986a. Estudos sobre a tectônica de fraturamento na região do Quadrilátero Ferrífero e em partes do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais, com base em Sensoriamento Remoto. Tese de Doutorado (inédito), USP, 172 p.
- Santos, A.R. dos. 1986b. O sensoriamento remoto e a estrutura rúptil: exemplos de aplicações em estudos tectônicos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4. Anais, v.1., p. 429-434, Gramado, 1986.
- Santos, A.R. dos; Schorscher, H.D. 1984. O padrão de fraturamento e o condicionamento tectônico na região do Quadrilátero Ferrífero e parte do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais (Brasil). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 3, Rio de Janeiro, 1984.
- Schorscher, H.D.; Santana, F.C.; Polonia, J.C.; Moreira, J.M.P. 1982. Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais State: Rio das Velhas Greenstone Belt and proterozoic rocks. *Intern. Symp. Archaean & Early Proterozoic Crustal Evol. & Metall.* ISAP. Excursion Guide (Annex) - Field Trip nº 3, 44p. CPM-SME, Salvador.
- Veneziani, P. 1987. Análise de movimentos da tectônica rúptil e rúptil dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG): uma correlação com processos evolutivos. Tese de Doutorado (inédito). USP, 186 p.
- Veneziani, P.; Anjos, C.E. dos. 1982. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em Geologia. 61 p., INPE-2227-MD/014. São José dos Campos.

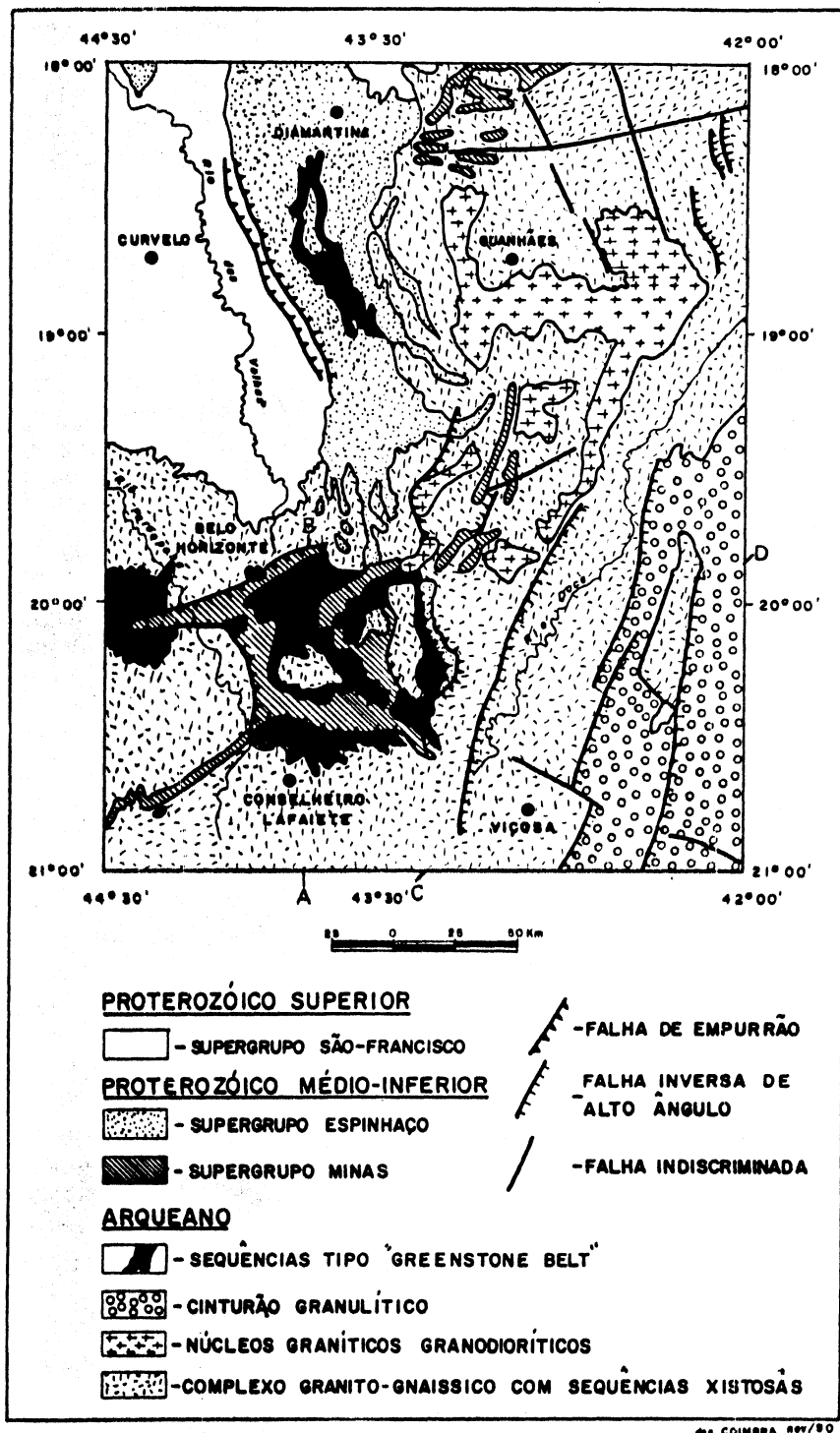


Fig. 1 - Distribuição regional das principais unidades pré-cambrianas (Modificado de Barbosa et al., 1989).

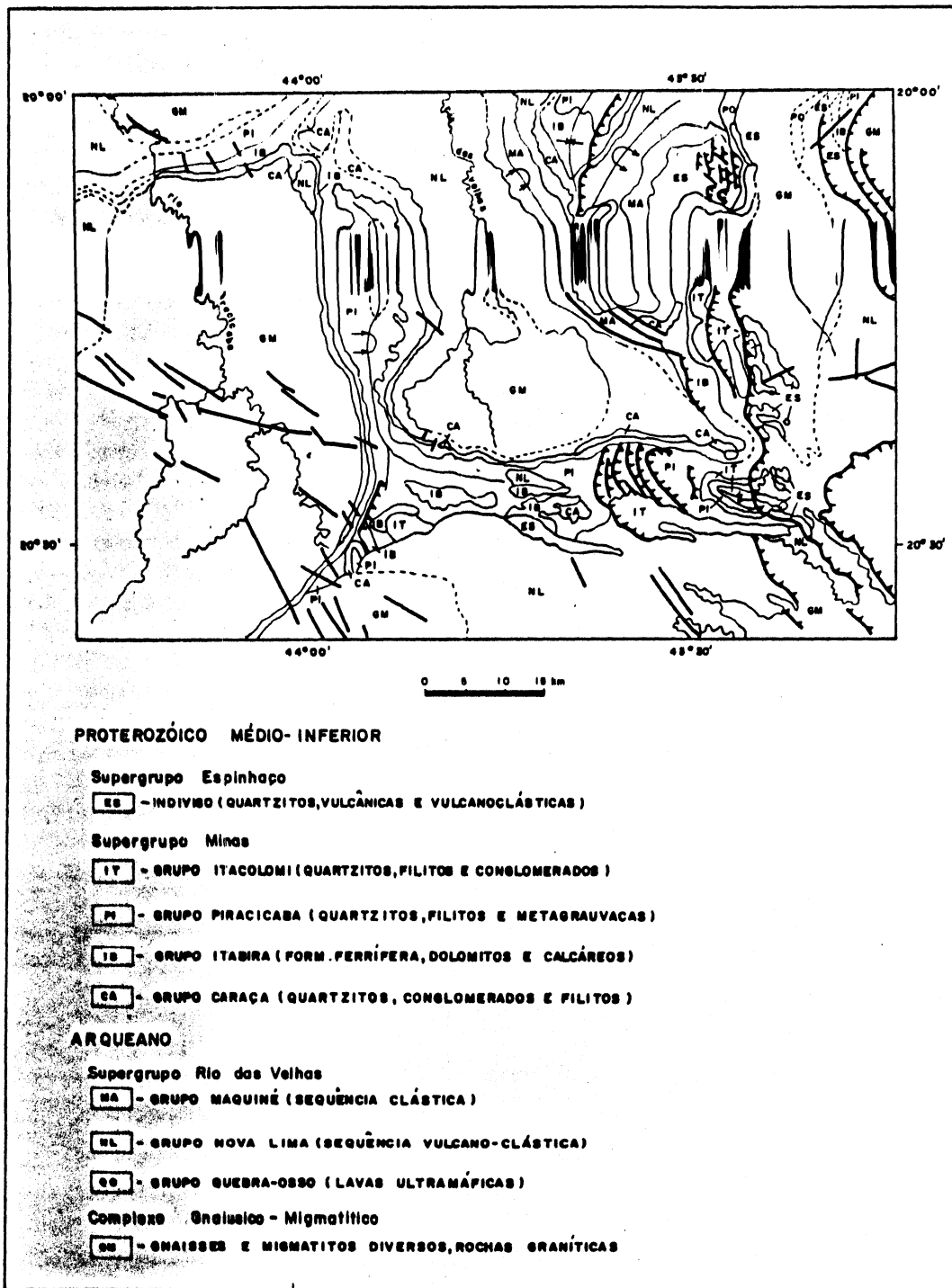


Fig. 2 - Geologia simplificada da Região do Quadrilátero Ferrífero.  
 FONTE: Santos (1986a).

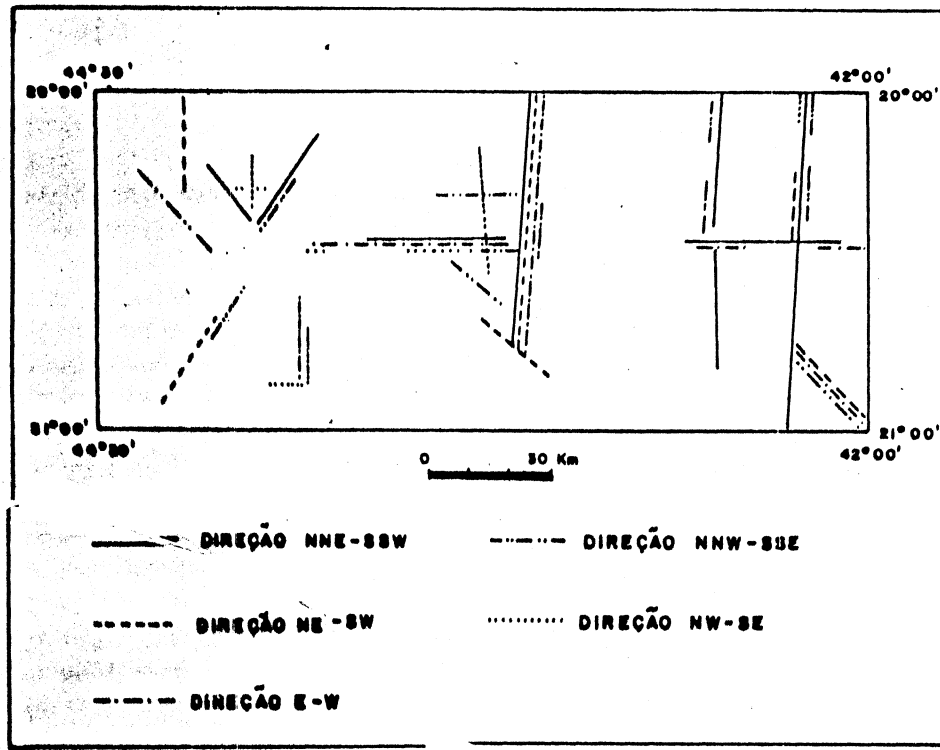
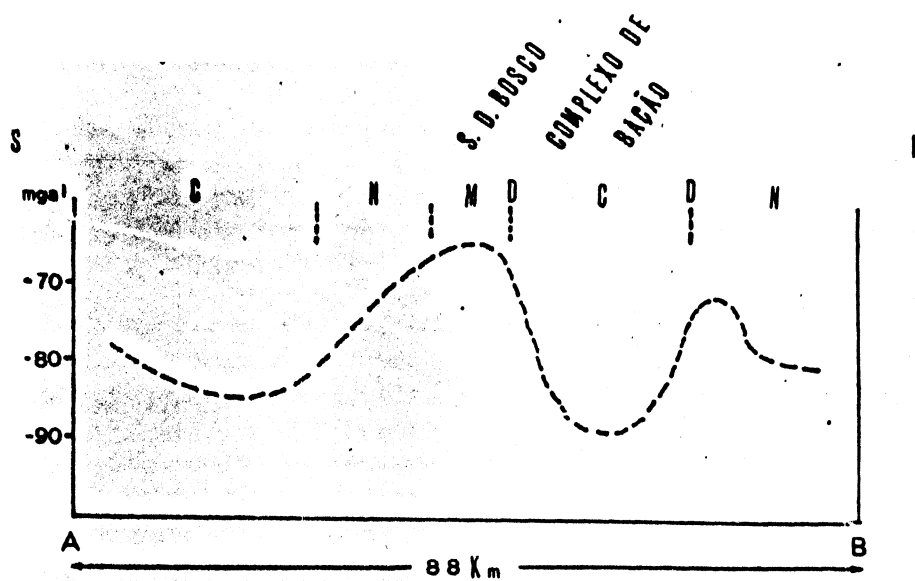


Fig. 3 - Linhas de máximo de frequência de fraturas por direção.

FONTE: Santos (1986a).



- C - Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais
- N - Grupo Nova Lima
- M - Supergrupo Minas
- D - Descontinuidade

Fig. 4 - Perfil gravimétrico A-B da Figura 1.

FONTE: Santos (1986a).

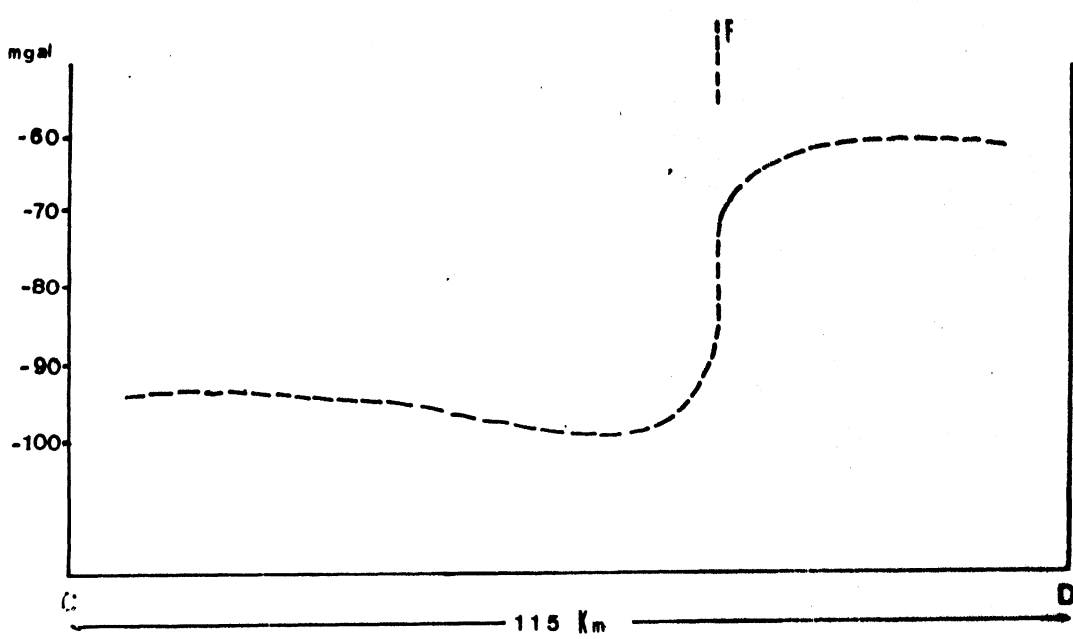


Fig. 5 - Perfil gravimétrico C-D da Figura 1.

FONTE: Santos (1986a).