

**INPE-5360-RPQ/655**

**UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO EM ESTUDOS  
SOBRE A TECTÔNICA DE FRATURAMENTO**

**Athos Ribeiro dos Santos  
Célio Eustáquio dos Anjos**

**INPE  
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
Março de 1991**

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5360-RPQ/655

UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO EM ESTUDOS  
SOBRE A TECTÔNICA DE FRATURAMENTO

Athos Ribeiro dos Santos  
Célio Eustáquio dos Anjos

INPE  
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS  
Março de 1991

5 28.711.7

Santos, A.R. dos; Anjos, C.E. dos  
Utilização de produtos de sensoria-  
mento remoto em estudos sobre tectônica  
de fraturamento. / A.R. dos Santos; C.E.  
dos Anjos: -- São José dos Campos; INPE,  
1991. 14p. -- (INPE-5360-RPQ/655)

1. Tectônica de fraturamento. 2.  
Quadrilátero Ferrífero. 3. Título

## RESUMO

O trabalho enfoca a utilização de procedimentos fotointerpretativos sistemáticos que permitiram um aumento significativo da efetividade do sensoriamento remoto, como ferramenta auxiliar em estudos tectônicos regionais, tanto em áreas sedimentares quanto em cristalinas antigas de evolução complexa. A associação de dados de sensores remotos com a análise morfoestrutural permite a caracterização de controles de sedimentação relacionados à dinâmica de fraturamento, com indicações sobre o comportamento do embasamento da bacia sedimentar (movimentação e basculamento de blocos) durante sua história evolutiva. A análise de densidade revela as relações mútuas entre conjuntos de lineamentos e permite interpretações sobre antigos cinturões de fraturas profundas, de papel controlador fundamental na evolução geológica, além de inferências sobre a idade relativa e dinâmica de falhamentos. Exemplos práticos desenvolvidos pelos autores são mostrados neste trabalho.

UTILIZATION OF REMOTE SENSING IN STUDIES ABOUT THE FRACTURE  
TECTONICS

ABSTRACT

The development of structural studies utilizing remote sensing data has provided systematic procedures of photointerpretation with the purpose of the extraction of structural and tectonic information in a regional scale. Some of these procedures are showed in this paper. The small scale remote sensing data are used associated with morphostructural analysis, indicating sedimentation controls related to dynamic activities of the lineaments. The density analysis reveals mutual relations among the lineaments and interpretations about ancient fracture belts and relative age, and different types of the fault movimentation can be deduced. Examples are showed in this paper.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2 <u>JUNTAS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS</u> .....	1
3 <u>REGIÃO LESTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA</u> .....	3
4 <u>REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (SE DO ESTADO DE MI NAS GERAIS)</u> .....	5
5 <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> .....	7
6 <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	8

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho exemplifica algumas aplicações de produtos de sensoriamento remoto de baixa resolução espacial em estudos de tectônica rúptil e rúptil-dúctil, com o intuito de sistematizar a utilização desses produtos em estudos tectônicos regionais, com especial enfoque nas estruturas rígidas (Anjos, 1986; Santos, 1986a).

Já no início do século, Hobbs (1912) observava a importância das fraturas na evolução das formas de relevo e a tendência de distribuição dessas estruturas em padrões regulares e com relações ortogonais. Diversos outros autores desenvolveram, a partir de então, estes e outros conceitos sobre fraturamento, em relação à sua distribuição regional (sistemática ou não) e ao seu significado tectônico (Sonder, 1947; Vening Meinesz, 1947; Moody e Hill, 1956; Kvet, 1974; Nickelsen, 1974; Plicka, 1974; Ramsay, 1980; Bryukhanov et al., 1982; etc.).

Com base principalmente na conceituação proposta por Plicka (1974) e corroborada por outros autores (p. ex. Nickelsen, 1974), o presente trabalho procura difundir - discutindo brevemente a base teórica e com exemplos práticos - a importância e o expressivo significado tectônico das feições linearmente estruturadas, passíveis de ser extraídas e analisadas a partir de produtos de sensores remotos de pequenas escalas.

## 2 JUNTAS: ALGUNS CONCEITOS BÁSICOS

As juntas podem ser classificadas tanto geométrica quanto geneticamente. As juntas sistemáticas formam conjuntos de feições paralelas a subparalelas, geralmente ortogonais às superfícies das unidades litológicas e com tendência a interceptar outras juntas. As juntas assistemáticas terminam contra os planos de foliação (acamamento, xistosidade) e não interceptam outras juntas. Com relação à estrutura regional, elas são classificadas em juntas longitudinais, transversais e diagonais, de acordo com sua relação geométrica com os eixos das dobras.

De maior interesse para o presente trabalho, a classificação de macrojuntas de Plicka (1974) identifica dois tipos fundamentais: as **juntas de acamamento**, de distribuição local, atitude variável e não-associadas diretamente à tectônica regional; e as **zonas de juntas**, que consistem em estruturas com alto ângulo de mergulho, de distribuição regional, profundas,

independentes do tipo e da atitude do corpo rochoso, e que estão diretamente relacionadas à tectônica regional. Estas estruturas, ainda segundo o autor, ocorrem repetidamente em sistemas (azimute), formando conjuntos de gênese uniforme, aos quais se associam linhas de falha. Por delinear as feições estruturais principais, estas juntas permitem determinar o padrão tectônico de uma dada região, através da análise de suas relações genéticas e geométricas.

Por outro lado, o estudo dos feixes de fraturamento extraídos de produtos de sensoriamento remoto revelou o estreito relacionamento destas feições fotográficas com concentrações de fraturas com espaçamentos regulares e altos ângulos de mergulho. Os estudos demonstraram, portanto, que estas feições de imagem representam conjuntos de zonas de juntas segundo classificação de Plicka (1974) (Mattos et al., 1982; Anjos, 1986; Santos, 1986a,b).

Os feixes de fraturas são feições mostradas por concentração de traços de fraturas com alto ângulo de mergulho, paralelas a subparalelas ao longo de uma determinada direção, as quais possuem um expressivo significado tectônico. Sua distribuição em sítios ígneos, metamórficos e/ou sedimentares sugere que a gênese destas estruturas independe do nível estratigráfico, embora haja um controle devido a fatores como a resistência à ruptura, pressão confinante, existência de fluidos, etc. Juntas cuja origem esteja associada a dobramentos, por serem de distribuição assistemática, não dão origem a feixes de fraturamento distinguíveis nos produtos de sensoriamento remoto de pequenas escalas.

Generalizando-se, as feições observadas em imagens e associadas a conjuntos de zonas de juntas, no sentido de Plicka (1974), são representativas da propagação vertical de descontinuidades antigas, profundas, reativadas em fases descompressivas, que afetam as rochas superiormente justapostas e que são, desta forma, registradas em superfície através de feições geomórficas estruturadas. Devido ao caráter persistente e cumulativo das fraturas (Nickelsen, 1974), a superfície de uma dada região exprime, através destas feições geomórficas, os principais eventos da tectônica rígida que a afetaram. Dois exemplos onde se procurou explorar este tipo de registro, com objetivos específicos e em áreas com características geológico-estruturais distintas, são resumidos nos itens subseqüentes.



### 3 REGIÃO LESTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA

A Figura 1 esboça as principais unidades tectônicas da área. Segundo a classificação proposta por Almeida et al. (1977), a área faz parte de duas províncias tectônicas: a Província Mantiqueira, constituída por rochas de graus metamórficos variáveis e com idades desde arqueanas a eopaleozóicas; e a Província Paraná, representada pelos sedimentos paleozóicos da Bacia do Paraná.

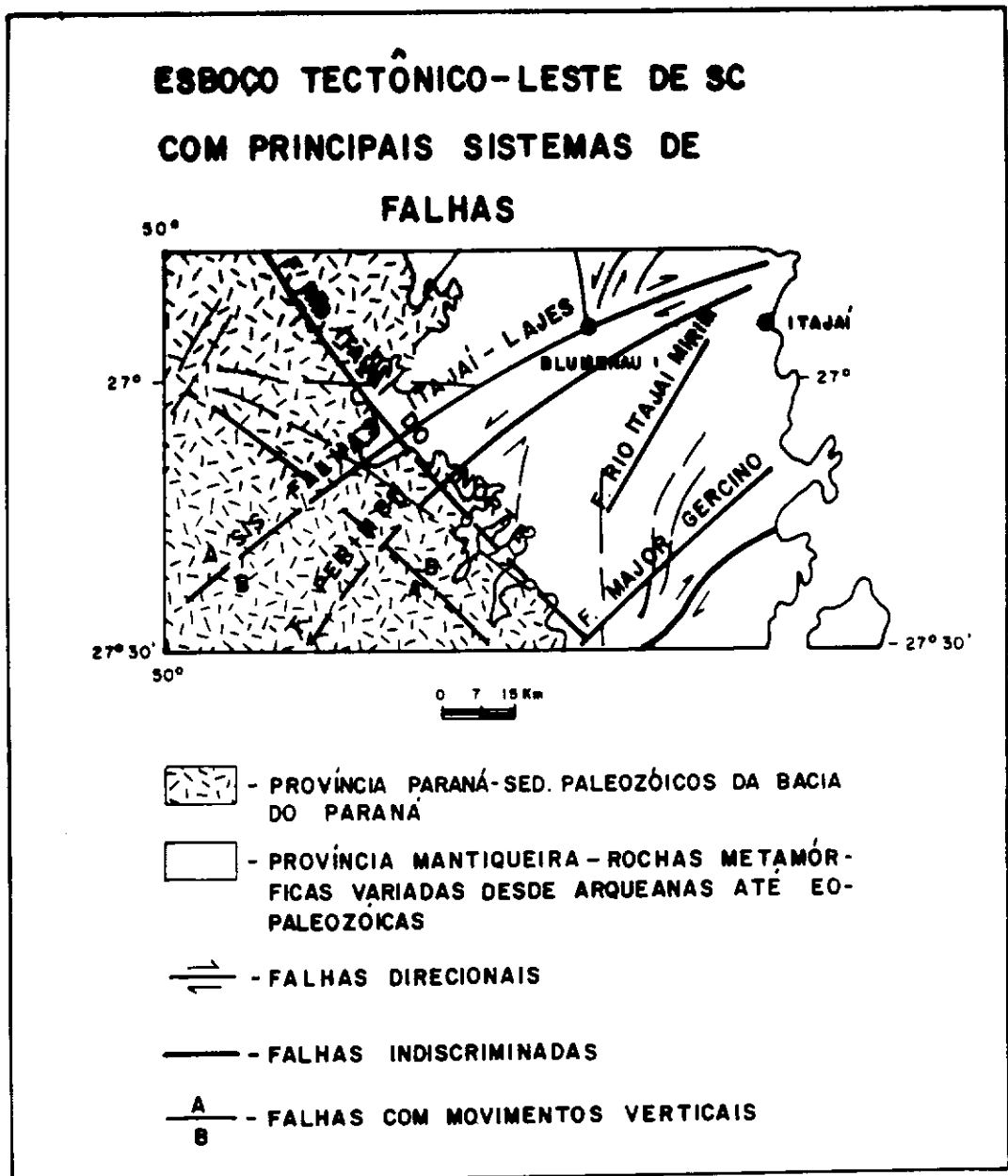


Fig. 1 - Esboço tectônico do leste de Santa Catarina com os principais sistemas de falhas da região.

Utilizando produtos de sensoriamento remoto de pequena escala (TM-MSS/LANDSAT e SLAR/RADAMBRASIL, escala 1:250.000), estudou-se a dinâmica dos falhamentos nesta região de Santa Catarina. Esta análise tectônica desenvolveu-se a partir da aplicação de técnicas de fotointerpretação, nas quais o relevo e a drenagem constituem-se em elementos fundamentais (Soares e Fiori, 1976 e Veneziani e Anjos, 1982). Esta análise permitiu a caracterização de cinco sistemas de fraturas: ENE-WSW, NNE-SSW, NNW-SSE, NW-SE e E-W (maiores detalhes em Anjos, 1986).

Os mapas de densidade de fraturas, construídos através de tratamento estatístico das feições linearmente estruturadas extraídas de imagens fotográficas, permitiram o estabelecimento de fatores de controle entre os diversos sistemas de fraturamento, bem como sua datação relativa (Aliyev, 1980).

Aos falhamentos ENE-WSW, juntamente com os E-W, atribuiu-se as idades mais antigas da região, correspondendo, provavelmente, a falhas regmáticas. A direção ENE-WSW corresponde ao principal fator de controle na distribuição de todos os outros sistemas de fraturamento. O sistema ENE-WSW (Sistema de Falhas Itajaí-Lajes) exibe um caráter poliativo, podendo ser reconhecidos movimentos transcorrentes dextrais, normais e inversos, ao longo de sua história.

A instalação do sistema NNW-SSE deu-se através da formação de um par conjugado de cisalhamento com as estruturas ENE-WSW, a partir de esforços compressivos ESE-WNW. A importância do sistema de falhamentos ENE-WSW é atestada, ainda, pela sua atuação em fases tectônicas posteriores, formando pares conjugados de cisalhamento com as direções NNE-SSW e NW-SE.

A persistência no tempo da atuação do sistema de fraturamento ENE-WSW estendeu-se até o eo-Paleozóico e Paleozóico. No eo-Paleozóico, este sistema atuou com movimentos normais e transcorrentes dextrais fracos, o que é atestado pela presença e deformação das rochas sedimentares do Grupo Itajaí. Já no Paleozóico, estas estruturas exibem indícios de movimentação normal e direcional fraco, marcados pelas maiores espessuras do pacote sedimentar da Bacia do Paraná e pelas suas flexuras em "echelon", ambas associadas a este sistema de rupturas.

#### 4 REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO (SE DO ESTADO DE MINAS GERAIS)

A Figura 2 esquematiza a distribuição regional das principais unidades pré-cambrianas. Em um arcabouço complexamente estruturado, a área inclui extensas exposições de rochas cristalinas antigas, de evolução policíclica e polimetamórficas; terrenos do tipo "granite-greenstone belt" arqueanos; além de metassedimentos proterozóicos de origem e interrelacionamento controversos (Santos, 1986a).

Os estudos desenvolvidos nesta área antiga e geologicamente complexa mostram a efetiva contribuição para o conhecimento de sua história evolutiva, através da análise dos eventos de tectônica rúptil e rúptil-dúctil, utilizando-se, especificamente, de procedimentos fotointerpretativos diversos. A partir de um mapa de fraturamentos da região (fotointerpretado de imagens TM-MSS/LANDSAT e SLAR/RADAMBRASIL, na escala 1:250.000), diversos tipos de análise foram realizados, em termos de distribuição, intensidade, relações de inteseção, além de procedimentos estatísticos a que foram submetidas estas feições de imagem (Santos, 1986a,b).

Cinco sistemas principais de fraturamento foram caracterizados para a área (NNE-SSW, E-W, NE-SW, NW-SE e NNW-SSE), todos de evolução poliativa e de importância fundamental na estruturação do atual arcabouço tectônico da região (Santos e Schorscher, 1984; Santos, 1986a). Os dados obtidos indicaram que sistemas de rupturas com direções aproximadas N-S, E-W e NW-SE definiam, já no Arqueano, um mosaico de blocos embasamentais. Estas direções antigas tiveram importantes atuações durante toda a evolução da área, em especial como controladoras da deposição e evolução do ciclo Minas-Espinhaço. Indicações obtida dos procedimentos fotointerpretativos e confirmadas por dados de campo e gravimétricos, caracterizam uma fase transcorrente com movimentação dextral e sinistral, respectivamente, para os sistemas NE-SW e NW-SE.

Padrões de fraturamento distintos reforçam a tese de aloctonia dos metassedimentos Minas no Quadrilátero Ferrífero (Schorscher et al., 1982), bem como caracterizam duas grandes províncias, a leste e a oeste da área, com características estruturais distintas.

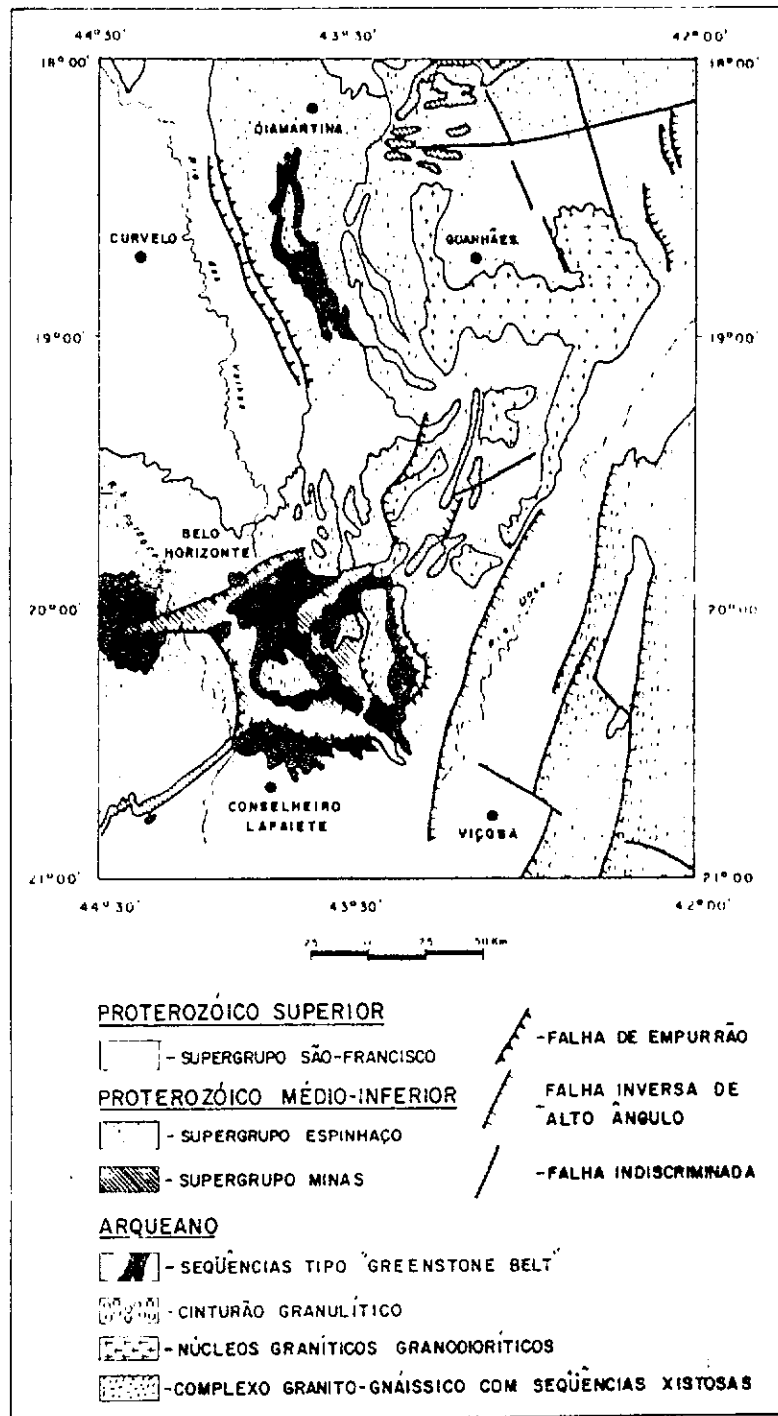


Fig. 2 - Distribuição regional das principais unidades pré-cambrianas.

FONTE: Modificado de Barbosa et al., (1989).

Resumindo, a evolução da área deu-se a partir da instalação de fraturas profundas, arqueanas, de direções aproximadas N-S (com variações para NNE-SSW e NNW-SSE), E-W e NW-SE, em um mosaico de blocos crustais, com papéis ativos e controladores tanto na evolução do "Greenstone Belt" Rio das Velhas como na deposição Minas-Espinhaço, onde a movimentação foi predominantemente vertical, controlando a formação da bacia, a paleogeografia e a sedimentação durante o Proterozóico Inferior. Com a orogênese Minas-Espinhaço, formaram-se os grandes cavalgamentos crustais em rochas do embasamento cristalino, aproveitando rupturas pré-existentes de direção 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 obducções crustais ao longo da borda do Espinhaço. Posterior aos grandes cavalgamentos crustais N-S, talvez ainda em uma fase compressiva E-W desta orogenia, ocorreram falhamentos direcionais NE-SW e NW-SE, dextrais e sinistrais, respectivamente. Posteriormente, todos estes sistemas foram reativados, principalmente no ciclo Brasileiro e no Mesozóico, onde predominaram movimentos verticais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da utilização de produtos sensores de baixa resolução, como exemplificado neste artigo, é possível obter indicações importantes sobre os eventos de tectônica rígida que se desenvolveram sobre uma determinada área, tanto em relação aos principais fatores de controle que condicionam a distribuição das fraturas de cada um destes eventos, como também sobre a dinâmica dos falhamentos que tiveram atuação relevante durante sua história geológica. Em suma, este trabalho procurou mostrar através de novas abordagens o importante potencial de contribuição do sensoriamento remoto para o conhecimento sobre a evolução tectono-geológica de áreas complexas e de conhecimento restrito, como é o caso de grande parte do território brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIYEV, A. Regional fracturing of the Pamirs and its metallogenic significance. *Doklady Akad. Nauk. SSSR*, 250:90-93, 1980.
- ALMEIDA, F.F.M. de; HASUI, Y.; NEVES, B.B. de B.; FUCK, R.A. Províncias estruturais brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, Campina Grande, nov. 1977. Boletim Especial, Campina Grande, S.B.G., 1977, p. 363-391.
- ANJOS, C.E. dos **Tectônica da Borda da Bacia do Paraná e de seu Embasamento na região de Itajaí-Lajes Santa Catarina - Uma abordagem com imagens fotográficas do Sistema LANDSAT e mosaicos de radar.** (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1986. 160 p.
- BARBOSA, M.P.; SANTOS, A.R. dos; VENEZIANI, P.; SCHORSCHER, H.D.; ALMEIDA ABREU, P.A. **Geologia do Espinhaço Meridional, incluindo o Quadrilátero Ferrífero: integração através de dados de sensoriamento remoto.** São José dos Campos, INPE, 1986. 16 p. (INPE-4904-PRE/1505).
- BRYUKHANOV, V.N.; BUSH, B.A.; YELOVICH, YE.L.; IKONNIKOV, YU.N.; KOZITSKAYA, M.T.; KOTELKOV, R.P.; LEBEDEV, S.P.; POSOSHKOVA, N.S. Linear and ring structures (as interpreted from satellite photographs). *Geotectonics*, 16(1):1-7, 1982.
- HOBBS, W.H. **Earth features and their meaning.** New York, MacMillan, 1912.
- KVET, R. Planetary equidistant rupture systems - A new concept based on the study of joint zones. In: International Conference on the New Basement Tectonics. 1., Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974. **Proceedings.** Utah, Geologic Association, 1974, p. 594-603.
- MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; MENESES, P.R.; CSORDAS, S.M. **Análise morfoestrutural com uso de imagens MSS-LANDSAT e RADAR para a pesquisa de hidrocarbonetos no Estado de São Paulo.** 3v., 211 pp., 40 mapas. São José dos Campos, INPE, 1982 (INPE-2445-RTR/015).
- MOODY, J.D.; HILL, M.J. Wrench Fault Tectonics. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 67: 1207-1248, 1956.

- NICKELSEN, R.P. Early jointing and cumulative fracture patterns. In: International Conference on the New Basement Tectonics, 1., Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974. **Proceedings**. Utah, Geologic Association, 1974, p. 193-199.
- PLICKA, M. Observation on joint zones in Moravia, Czechoslovakia. In: International Conference on the New Basement Tectonics. 1., Salt Lake City, Utah, June, 3-7, 1974. **Proceedings**. Utah, Geologic Association, 1974, p. 279-289.
- RAMSAY, J.G. Shear zone geometry: a review. **Journal of Structural Geology**, 2(12):83-89, 1980.
- SANTOS, A.R. dos **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)- Instituto de Geociências. USP, São Paulo, 1986a. 172 p.
- SANTOS, A.R. dos O sensoriamento remoto e a estrutura rúptil: exemplos de aplicações em estudos tectônicos. In: Simpósio Latino-Americano de Sensoriamento Remoto. Gramado, 10-15 ago. 1986b. **Anais**, São José dos Campos, INPE, 1986, v.1, p. 429-434.
- SANTOS, A.R. dos; SCHORSCHER, H.D. O padrão de fraturamento e o condicionamento tectônico na região do Quadrilátero Ferrífero e parte do Complexo Migmatito-Granulítico de Minas Gerais (Brasil). **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 3., Rio de Janeiro, 1984.
- SCHORSCHER, H.D.; SANTANA, F.C.; POLONIA, J.C.; MOREIRA, J.M.P. Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais State: Rio das Velhas Greenstone Belt and proterozoic rocks. **International Symposium Archean & Early Proterozoic Crustal Evolution & Metallogenic**. ISAP. Excursion Guide (Annex). Field Trip N. 3, 44 pp., CPM-SME, Salvador, 1982.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática em análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Not. Geomorfológicas**, 16(32):71-104, 1976.
- SONDER, R.A. Discussion of shear patterns of the earth's crust. **Am. Geophys. Union. Trans.**, 28:939-945, 1947.

VENEZIANI, P.; ANJOS, C.E. dos **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia.** São José dos Campos, INPE, nov. 1982. (INPE-2227-MD/014).

VENING MEINESZ, F.A. Shear patterns of the earth's crust. **Am. Geophys. Union Trans.**, 28:1-61, 1947.