

## **Avaliação dos Dados Radar (SAR) ERS-1 no Mapeamento Geológico da Região de Salobo, Província Mineral de Carajás**

Bignelli, Pedro Alberto

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas, 1758 São José dos Campos S.P. Brasil  
CEP 12227-010 CX. Postal 515  
(0123) 256438 FAX. (0123)218743  
bignelli@ltd.inpe.br

**Abstract.** This work has focussed on the evaluation of the orbital (ERS-1) SAR data in the geological mapping of the Salobo area, Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). The main objectives of the investigation have encompassed visual and digital analysis of the SAR data in the lithological discrimination and structural mapping taking into account distinct sensor parameters and acquisition data geometry (polarization, resolution, incidence and azimuth angles and look direction). The research has also aimed at providing insights for the geological knowledge of the Salobo area. The test-site is inserted in the Itacaiúnas Belt, a wide shear zone with probable Archean age and copper deposits, located in the northwest border of the Carajás Mineral Province. The results have shown that the most important radar parameters were incidence and azimuth angles and look direction. ERS-1 data has presented distortion problems related to “layover” and “foreshortening” affects in the high relief area. However, geological information could be extracted in the low relief regions. Digital enhancement techniques proved to be important in the extraction of information with geological meaning from SAR dataset.

**Keywords:** ERS-1, Salobo, Carajás.

### **1- Introdução**

Os sensores imageadores radar têm demonstrado ser uma importante ferramenta na aquisição de informações na região Amazônica (Silva et al. 1974; Paradella et al. 1993 e outros). Dentre estes trabalhos com sensores microondas, o mais recente se trata do Projeto SAREX ("South American Radar Experiment"), que tratou da simulação dos sistemas RADARSAT e ERS-2, através de um SAR aeroportado, com diversas geometrias de aquisição de dados sobre a Floresta Tropical Úmida na Amazônia (Wooding e Attema, 1992). Simultaneamente ao referido projeto, em 1992 foram coletadas imagens do radar orbital ERS-1 ("Earth Remote Sensing Satellite-1"), que apesar de direcionado a estudos oceanográficos, possibilitou a aquisição de imagens dos continentes com interessantes resultados. Escassas são as referências sobre este tipo de imageamento, podendo ser citado um estudo preliminar de Singhroy et al. 1993, na Bacia de Sudbury no Canadá, o qual reporta bom desempenho no mapeamento geoestrutural daquela região.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho do sensor radar a bordo ERS-1 quanto ao mapeamento geológico,

de área da Província Mineral de Carajás, que se trata de uma região mundialmente conhecida por suas reservas minerais.

Deve ser salientado que a área teste, dentro da Província, teve seu centro na jazida cuprífera Salobo, assim escolhida, devido à sua importância geológica e pelo volume atualizado de dados de campo disponíveis.

Desta forma, são apresentados os resultados de análise visual das imagens geradas pelo recobrimento do sensor citado, na data de 22 de abril de 1992, assim como, uma avaliação dos processamentos digitais efetuados nestes produtos, com vistas à melhora na extração de dados geológicos. São, conjuntamente avaliados, os parâmetros funcionais e de visada do sensor radar, para alvos em floresta tropical úmida.

Finalmente, com base na fotointerpretação dos produtos radar, procurar-se a contribuir para o conhecimento geológico do Distrito de Salobo.

### **2- Características da Área de Estudo**

O presente trabalho focaliza uma área com aproximadamente 2.300 km<sup>2</sup> situada na região sudeste do Estado do Pará. O polígono limitante da região, tem forma regular e está inserido entre as coordenadas

geográficas 05°43'14" e 06°00'00" de latitude sul e 50°18'45" a 50°45'00" de longitude oeste, Figura 1.

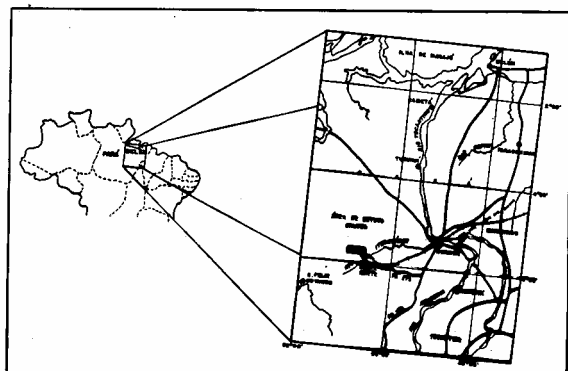


Fig. 1- Localização da área de estudo.

## 2-1 Contexto Geológico Regional

Ao norte da Serra de Carajás, Siqueira e Costa (1991), caracterizaram o Sistema Transcorrente Cinzento como sendo formado por vários feixes de cisalhamento sinistrais, constituindo uma fração da evolução do Cinturão Itacaiúnas (Cordani e Neves, 1982), no final do Arqueano. Ao longo deste sistema reconhece-se duplex compressivos e distensivos, além de estruturas em rabo de cavalo, que experimentaram transtensão seguida de transpressão e deslocamentos transcorrentes durante a deformação. Tais estruturas são identificadas como: duplex distensivo Salobo-Mirim, duplex compressivo Cururu e rabo de cavalo compressivo Serra Pelada.

O duplex distensivo Salobo-Mirim, (Siqueira, 1990), encontra-se na extremidade oeste do Sistema Transcorrente Cinzento e é composto por faixas e lentes de gnaisses e rochas supracrustais diversas, orientadas preferencialmente na direção WNW-ESE e seus contatos são, em geral, definidos por zonas de cisalhamento. Ao longo destas zonas há registros de transformações mineralógicas em fácies anfibólito, superpostas por assembléias mineralógicas da fácies xisto-verde. O padrão de distribuição das unidades rochosas é decorrente da deformação não coaxial dominante, a qual impôs forte transposição e conseqüentemente, a imbricação generalizada dos corpos geológicos.

A forma geral do duplex Salobo (Siqueira, 1990) assemelha-se a uma estrutura elíptica assimétrica, orientada na direção E-W e definida por uma zona de cisalhamento transcorrente sinistral e por uma zona de cisalhamento normal oblíqua curvilínea, que converge para a zona de transcorrência. Internamente, a estrutura é composta por zonas de cisalhamento normais

secundárias, orientadas na direção NW-SE, que se ligam às zonas principais normal e transcorrente em direção a NW e SE, respectivamente. As zonas de cisalhamento são caracterizadas internamente por uma foliação milonítica penetrativa que se assemelha à foliação de transposição ou bandamento composicional. Essa geometria é localmente modificada por zonas de cisalhamento secundárias dextrais e sinistrais, com direções NNE-SSW e NW-SE, respectivamente.

Os principais conjuntos petrográficos que compõem o duplex Salobo estão descritos por Farias e Meyer, 1982; Siqueira, 1990; Lindenmayer, 1991, entre outros, sendo apresentados sucintamente na seqüência:

### Complexo Xingu

As rochas gnáissicas têm ampla distribuição na área estudada, ocupando as regiões imediatamente a norte e a sul das faixas de rochas supracrustais, ocupam áreas morfológicamente arrasadas, e é composta petrograficamente por gnaisses granodioríticos, graníticos, dioríticos e tonalíticos, migmatizados, metassedimentos e anfibólitos. Estas rochas são bandadas, com arranjos texturais granoblásticos e granolepidoblásticos dominantes, gradando nas faixas de deformação para feições protomiloníticas a miloníticas. A associação mineral mais comum é definida por quartzo-plagioclásio-hornblenda-biotita, indicando estabilidade em condições térmicas na fácies anfibólito.

### Grupo Salobo

As rochas supracrustais do referido Grupo são representadas por xistos (biotíticos), formações ferríferas bandadas, anfibólito xistos, gnaisses anfibolíticos, quartzitos e clorita-quartzo xistos.

Morfológicamente os clorita-quartzo xistos, formações ferríferas bandadas e os xistos (biotíticos) apresentam-se com relevo movimentado formando serras alinhadas, em função do controle estrutural.

Os anfibólito xistos, gnaisses anfibolíticos e metabásicas são em geral bastante alterados no clima tropical, assumindo os níveis topográficos mais baixos ou sendo preservados em meia encosta, quando protegidos por unidades mais resistentes à ação intempérica (Siqueira, 1990).

Finalmente, os pacotes quartzíticos destacam-se nas faixas protomiloníticas e miloníticas, organizando serras alinhadas, com escarpas íngremes em função da forte inclinação das estruturas planares impressas, Siqueira (op. cit).

Ocorrem ainda, intrusivas ácidas correlatas ao Granito Central Carajás sob forma de pequenos corpos circulares e intrusivas básicas em forma de diques direcionados SW-NE datados de 580 Ma.

### 3- Caracterização do Sistema Sensor ERS-1

O satélite SAR ERS-1, têm suas principais características listadas na Tabela 1.

A despeito das limitações causadas pela geometria de aquisição, especialmente o ângulo de incidência de 23°, considerado muito agudo para estudos geológicos em áreas de relevo movimentado, Ford (1980), foi tomada uma imagem da região de Salobo, através da qual puderam ser extraídas significativas informações geológicas.

Tabela 1. - Sistema radar de abertura sintética ERS-1

CARACTERES	VALORES
Inclinação orbital	98,5°
Altitude	785 km
Comprimento onda	5,6 cm Banda C
Resolução espacial	25X25 m
Faixa recoberta	100 km
Ângulo depressão	65 a 70°
Polarização	VV
Intervalo dinâmico	21 dB
Ângulo azimute	N78°E

Fonte: ESA, (1992).

Especificamente para este trabalho foi analisada a imagem obtida pelo sensor radar a bordo do ERS-1 em sua órbita 4048 (descendente), datada de 24 de abril de 1992. Este produto foi processado nos laboratórios do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), de onde foi gerada uma imagem georreferenciada em projeção "ground range". Radiometricamente, o dado digital original encontra-se em 16 bits, a sete "look", ou seja, com resolução espacial de 25m nas direções em "range" e azimute.

### 4- Discussão

#### Análise visual dos dados do SAR ERS-1

Com base na extração, análise e interpretação dos elementos fotográficos (lineamentos de relevo e drenagem), da imagem ilustrada pela Figura 2; a discussão foi gerada sobre o desempenho do radar do ERS-1 dentro dos objetivos propostos.

Como visto nos trabalhos desenvolvidos durante o Projeto SAREX, (Liu et al. 1994; Paradella et al. 1994; Bignelli, 1994; entre outros), os produtos de radares aeroportados, têm na alta resolução espacial (6m) um dos fatores que determinam a capacidade de detecção das feições do terreno. Sendo assim a resolução de 25m do ERS-1 limita a visualização de alguns detalhes da rede de drenagem, vias de acesso e áreas desmatadas.

Nas áreas de ocorrência do Complexo Xingu, onde o relevo é mais arrasado, pode-se distinguir duas situações:-a primeira nas sub regiões de relevo movimentado, próximo ao "near range", onde se pode visualizar com clareza a rede de drenagem; e a segunda nas faixas mais planas do terreno, onde a ocorrência de "speckle" torna impraticável a fotoleitura dos segmentos de drenagem.

Quanto à discriminação litológica, foram separadas no produto radar, 9 (nove) zonas homólogas, ilustradas na Figura 3, que de certa forma são correlatas às unidades previamente mapeadas por DOCEGEO, (1988) e CPRM, (1991).

Uma contribuição ao conhecimento geológico da região, encontra-se na capacidade de discriminação de duas subunidades fisiograficamente distintas, nas áreas genericamente atribuídas ao Complexo Xingu.

Os caracteres texturais da Associação Xingu 1, (Bignelli, op. cit.) são visualmente mais grosseiros e portanto devem ser interpretados como pertencentes a uma unidade mais resistente à erosão. Por outro lado, o aspecto homogêneo dos elementos texturais de relevo da Associação Xingu 2 levam à interpretação de uma área arrasada, sustentada por rochas metassedimentares e metavulcânicas, pouco resistentes à erosão.

Na região de ocorrência das rochas supracrustais do Grupo Salobo, (Siqueira et Costa, 1991) foram diferenciadas 4 unidades, em contrapartida às 7 unidades discriminadas no produto do radar aeroportado.

Os fatos que explicam esta pior performance passam pela influência dos parâmetros resolução e direção de visada, além dos efeitos distorcivos devidos ao baixo ângulo de incidência.

Foram também mapeadas estruturas circulares atribuídas às possíveis ocorrências de rochas intrusivas, correlacionáveis ao Granito Central de Carajás.

As coberturas lateríticas foram diferenciadas pelo formato irregular e isotropia, assim como pela tonalidade escura devido à alta densidade de cobertura vegetal nestes platôs.

Finalmente, a unidade Quaternária que aparece associada às drenagens atuais, é caracterizada por terrenos planos, onde mais se visualiza o ruído "speckle". Este fato prejudica a individualização de subfácies e torna problemática a discriminação entre esta unidade e a fração mais arrasada do embasamento.

No que se refere à tectônica, foi feita uma análise estatística dos elementos estruturais (Bignelli op. cit.), que demonstrou a boa capacidade do sensor de microondas a bordo do ERS-1 para o delineamento das zonas de cisalhamento, descritas por Siqueira, (1990).

Destacam-se as estruturas orientadas para NNW (foliação milonítica, falhamentos sinistrais e zona de cisalhamento curvilínea a norte do Duplex). Em segundo plano encontram-se as feições para NE e NNE-SSW, e finalmente a direção EW, representativa da zona de cisalhamento retilínea, que tem pouquíssima expressão nas imagens ERS-1.

Como se pode notar, as feições mais distintas estão sub ortogonais à direção de visada do sensor, enquanto que as menos visíveis encontram-se paralelas.

### **Processamentos digitais preliminares dos produtos ERS-1**

O produto digital deste sensor, oriundo dos pré processamentos nos laboratórios do INPE, se apresentam georreferenciados e convertidos à projeção "ground range", sendo entregue em formato de 16 bits, com uma ampliação linear de contraste aplicada.

Para maior rapidez nos processamentos e por limitações de espaço, estas imagens foram convertidas a 8 bits, que se trata de uma compressão a 256 níveis de cinza, fato que acarreta perda de contraste (Lowman et al. 1987).

Desta forma, as primeiras correções radiométricas efetivadas no produto em 8 bits foram a aplicação de filtros do tipo adaptativo a dados de radar, dos quais o que demonstrou melhor resultado na redução do "speckle" foi o filtro denominado FGAMMA (Lopes et al. 1990), com janela de abertura de 3X3 pixels.

Na sequência, o dado digital teve seu contraste ampliado através da aplicação de uma LUT não linear denominada Método Driemman, a qual restabeleceu a qualidade do produto como exposto na Figura 2.

### **5- Conclusões**

Os dados apresentados e as discussões precedentes possibilitam as conclusões a seguir, as quais devem se restringir ao ambiente estudado, já que não se dispõem de suficiente conhecimento para que seja permitida extrapolações para outras áreas.

O produto obtido pelo radar, a bordo do satélite ERS-1, em sua órbita descendente de 24 de abril de 1992, na escala 1:100.000, mostrou boa correspondência às publicações prévias analisadas.

A fotointerpretação das imagens permitiu a separação de 9 (nove) unidades litológicas, deixando para as áreas de relevo mais elevado, as principais dúvidas, especialmente quanto à subdivisão estratigráfica do Grupo Salobo. Tal fato explica-se parcialmente pelo efeito "layover" e ruído "speckle", atribuídos ao conjunto de parâmetros que caracteriza o recobrimento ERS-1.

Os traços estruturais regionais foram bem definidos, exceção feita à direção N75-85°W correspondente à zona de cisalhamento retilínea posicionada a sul do Duplex Salobo Mirim. Tal fato deve-se ao sub-paralelismo desta orientação estrutural em relação à direção de visada do sensor.

Os atributos gerais (estradas, desmatamentos etc.), tiveram sua interpretação prejudicada, pela baixa resolução espacial, efeito "layover" e, pela ocorrência de "speckle". Ainda assim, as drenagens maiores foram discriminadas por suas características de sinuosidade e reflexão especular. Os canais menores foram mapeados, ainda que, com distorção, devido ao aspecto em rede bastante característico. Ficou muito prejudicada a visualização das estradas e áreas desmatadas, facilmente mapeadas no produto radar aerotransportado.

O processamento digital na imagem ERS-1 é claramente notado, principalmente quanto à ampliação de contraste e diminuição do ruído "speckle".

A utilização do filtro adaptativo FGAMMA na imagem orbital é evidenciada através de uma ampliação nos contrastes texturais, o que proporciona, nas áreas de relevo arrasado, uma maior discriminação de unidades fotolitológicas, dentre elas a separação de duas sub-unidades no Complexo Xingu e a individualização dos termos Quaternários correspondentes aos aluviões da área de estudo (Figura 3).

Os parâmetros radar foram individualmente analisados conforme exposto na sequência:

- Comprimento de Onda (Frequência): pode-se afirmar que a banda C, apesar de pouco penetrar além do dossel da floresta, adapta-se aos objetivos pretendidos, principalmente, por ser sensível às ondulações do relevo.

- Polarização VV: dentro dos limites da área de estudo pode-se afirmar que o resultado obtido pela polarização paralela vertical, foi satisfatório, não notando-se nenhum prejuízo no delineamento das feições do terreno.

- Ângulo de Incidência: o ângulo incidente médio igual a 23°, apresentou boa performance quanto à extração de informações nas áreas arrasadas, em especial nos 2/3 da imagem correspondentes aos "near e middle range", onde o ângulo agudo proporciona grandes oscilações no retrobrilho conforme às variações das facetas do relevo. Em contrapartida, nas regiões montanhosas o ângulo agudo dá origem à expressiva ocorrência dos efeitos "layover" e "foreshortening", com perda de dados, em especial, de caráter estrutural.

- Direção de Visada: a interpretabilidade da imagem radar está intimamente relacionada à direção de visada ("look direction") e sua respectiva relação com a direção do "trend" estrutural ou alinhamento das feições

morfológicas da região alvo. O recobrimento ERS-1 em órbita descendente, orientada com visada para N78°E negligência quase que completamente a feição estrutural da zona de cisalhamento retilínea, por esta se orientar sub paralelamente à referida direção.

- Resolução: a resolução de 25m do ERS-1, associada aos aspectos de ocorrência de "speckle", prejudica muito a extração de detalhes na área alvo, porém para o objetivo do trabalho na escala de reconhecimento, ela é satisfatória.

### Referências

Siqueira, J. B.-1990- **Organização lito-estrutural do Duplex Salobo-Mirim, Serra de Carajás**. Belém, Universidade do Pará, 125p. (tese de Mestrado em Geociências).

Wooding, M. G.; Attema, E. P.-1992- SAREX'92 (South American Radar Experiment). Noordwijk, Netherlands, ESA, 49p. **Experimenters Handbook**.

ESA.-1992- **ERS-1 System**. Noordwijk, Netherlands, Pam Vass & Bruce Battrick ed., 85p. (ESA SP-1146).

Bignelli, P.A.-1994- **Avaliação dos dados de radar (SAR) do Projeto SAREX'92 e ERS-1 em mapeamento geológico na região de Salobo, Província Mineral de Carajás**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 124p., (tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto).

DOCEGEO.-1988- Revisão lito-estratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: **Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia**, Belém, Brasil, Sociedade Brasileira de Geologia, p. 11-54.

CPRM.-1991- **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Serra dos Carajás, Folha SB. 22-Z-A Estado do Pará**. Brasília, NUTEC-CPRM, 70p.

Lowman Jr, P. D.; Harris, J.; Masuoka, P. M.; Singhroy, V. H.; Slaney, V. R.-1987- Shuttle Imaging Radar (SIR-B) investigations of the Canadian Shield: Initial Report. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing GE25** (1):55-6

Siqueira, J. B.; Costa, J. B. S.-1991- Evolução geológica do Duplex Salobo-Mirim. In: **Anais do III Simpósio de Geologia da Amazônia**, Belém, Brasil, Sociedade Brasileira de Geologia, p.232-243.

Cordani, U. G.; Brito Neves, B. B., 1982. The Geologic Evolution of South America During the Archean and

Early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, 12 (1-3): 78-88.

Liu, C.C.; Paradella, W.R.; Veneziani, P.; Santos, A.R.; Bignelli, P.A.; Dias, R.R. SAREX imagery for lineament study in the Salobo area, Carajás Mineral Province (Brazil). In: ISPRS Comission VII Symposium. Resource and Environmental Monitoring, Rio de Janeiro, 1994. **Proceedings**, Rio de Janeiro, 1994, pp. 426-433

Farias, N.F.; Meyer, D.J.K. O depósito de cobre Salobo 3 Alfa Serra de Carajás, Brasil. In: Symposium Amazônico, 1. Caracas, Venezuela, 1982. **Anais**, Brasília, Departamento Nacional de Produção Mineral, p. 529-537.

Silva, A. C. et al. **Folha SB-22 Araguaia e parte da Folha SC-22 Tocantins**. Rio de Janeiro, Departamento Nacional de Produção Mineral, 1974. (levantamento de recursos naturais, 4) 728 p.

Ford, J.P. Seasat orbital radar imagery for geologic mapping: Tennessee Kentucky Virginia. **The American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 64 (12): 2064-2094, Dec. 1980.

Paradella, W. R.; Liu, C. C.; Veneziani, P.; Santos, A. R.; Bignelli, P. A.; Dias, R. R. e Singhroy, V. H. First results from a SAR investigation (SAREX data) in the Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). In: Workshop SAREX'92 South American Radar Experiment., 1., Paris, 1993. **Proceedings**. Paris, ESA, p. 101-111. (ESA WPP-76).

Singhroy, V.H.; Lowman, P.D.; Morasse, C.R. Preliminary analysis of ERS-1 SAR for structural and surficial mapping in the Sudbury Basin, Canadá. In: Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 19., Pasadena, CA, 8-11, Feb, 1993. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1993.

Lindenmayer, Z. G.; Fyfe, W. S. Metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão no depósito de Cu do Salobo: evidência de rift continental Arqueano. **Anais do Amazon Geologic Symposium**, 3, 1991, p 36-48.

Lopes, A.; et al. Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images. In: IGARSS'90, **Proceedings**, Washington, USA, 1990, p 2409-2412.

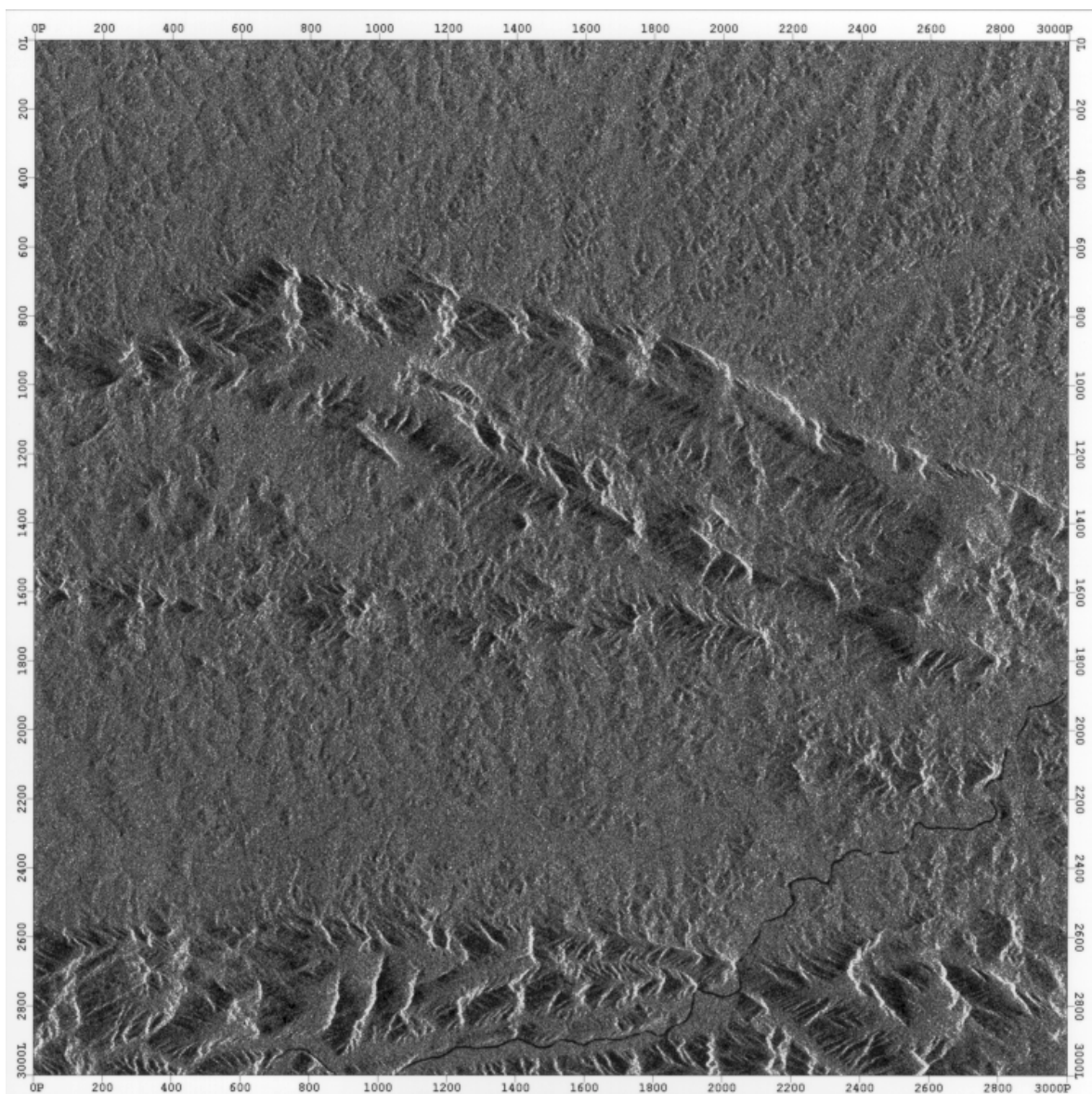


Fig. 2- Imagem do radar ERS-1 sobre a área de Salobo.

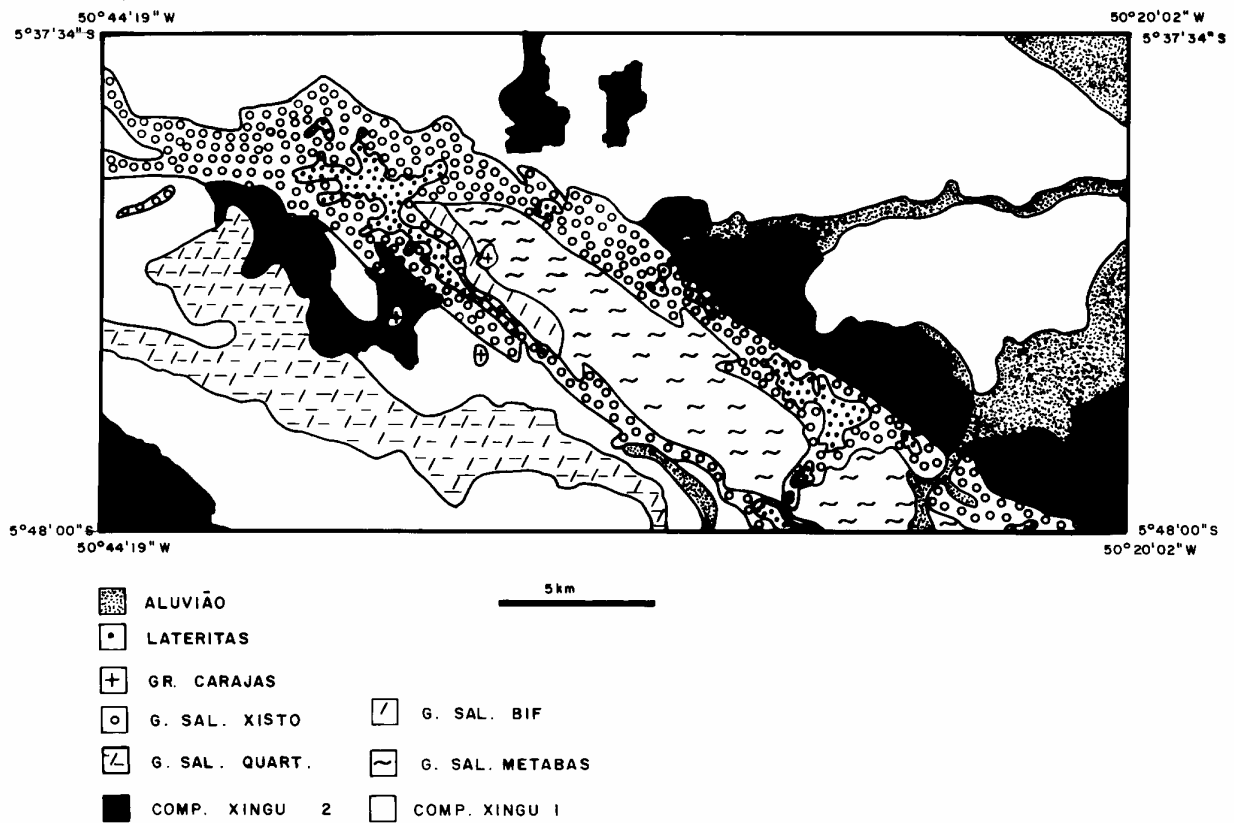


Fig. 3- Mapa fotogeológico da imagem ERS-1 sobre Salobo.