

UTILIZAÇÃO DE DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO
ESTRATIGRÁFICO E ESTRUTURAL DA FORMAÇÃO SERRA GERAL
(SUL DO BRASIL)

A. Paiva Fº e A. P. Crôsta
THEMAG ENGENHARIA LTDA.

Caixa Postal 1449 - 01415 - São Paulo - SP - Brasil

G. Amaral

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Caixa Postal 20899 - 01000 - São Paulo - SP - Brasil

RESUMO

O presente trabalho é parte de um programa desenvolvido para a PETROBRÁS, referente ao tratamento e interpretação de dados de sensoriamento remoto aplicados à pesquisa de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. São aqui apresentados os resultados obtidos no estudo litológico-estrutural da Formação Serra Geral, a qual tem se constituído em um dos maiores obstáculos à essa pesquisa. O programa constou da análise visual de imagens LANDSAT/MSS e de radar e da análise automática de fitas CCT no sistema I-100 do INPE, para a área abrangida pelas cenas 206 pontos 30 e 31 (SRB), nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O principal resultado obtido foi o mapeamento de três diferentes litofácies dentro da Formação Serra Geral, sendo a inferior e a superior constituídas predominantemente por basaltos toleíticos e a intermediária por diferenciados intermediários a ácidos, denominados respectivamente, riodacitos e granófiros. Essas rochas já haviam sido descritas anteriormente em pontos isolados, mas somente foram mapeadas com o auxílio das imagens LANDSAT/MSS. Os resultados estruturais mostram a grande diferença entre as informações obtidas de cada sistema, em virtude principalmente das direções de visada de cada um. A análise estrutural permitiu a identificação de feições de interesse à prospecção de hidrocarbonetos em megal e meso-escala.

ABSTRACT

The present paper is part of a larger program developed for PETROBRÁS, relative to the use of remote sensing data for hydrocarbon exploration in the Paraná Basin. The results here reported were obtained for the structural-lithological analysis of the Serra Geral Formation, which presents the main constraints for the exploration activities. Visual analysis of LANDSAT/MSS and SLAR data and automatic interpretation of CCT data resulted in a large amount of information for an area of 70000 sq km in the Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul States. The most important result was the recognition and mapping of three different lithofacies in the previously undivided Serra Geral Formation. The lower unit is composed mainly of tholeiitic basalts with minor sandstone interbeds; the middle one is composed of acidic to intermediate differentiates (rhyodacites and granophyres); the upper unit is composed of tholeiitic basalts. The acidic differentiations were reported locally but its importance as a guide-horizon was defined during image analysis and field control. Analysis of structural data demonstrates the differences among sensor products, particularly with reference to linear orientations. The structural information thus obtained, in conjunction with the lithological map, was used for the definition of target areas for hydrocarbon exploration.

1. INTRODUÇÃO

Os derrames basálticos da Formação Serra Geral cobrem cerca de 75% dos dois milhões de quilômetros quadrados da Bacia do Paraná, com uma espessura média de 400 metros, atingindo cerca de 1700 metros no vale do Rio Paraná.

Tais rochas foram consideradas até recentemente, como essencialmente básicas, pertencentes a derrames toleíticos. Não obstante, a identificação de derrames de natureza mais ácida na Formação Serra Geral tem sido relatada desde Leinz (1949) e Schneider (1964) até, mais recentemente, Sartori et al. (1975), Menegotto e Medeiros (1976) e Szubert et al. (1978), todos no Estado do Rio Grande do Sul. Contudo, a possibilidade de ocorrência de rochas similares em outros locais da Bacia do Paraná foi apontada por Szubert (1979). Também Garcia e Marinho (1980) referem-se a rochas ácidas encontradas entre São Francisco de Assis (RS) e São Joaquim (SC), além de ocorrências em Campos Novos (SC), Palmas (PR) e Hercílioópolis (PR).

A identificação de tais rochas em pontos bastante distintos entre si tem feito com que se pense em manifestações ácidas descontínuas, às vezes com pouca expressão em área. Esse fato levou Szubert (1979) a propor que essas rochas mais ácidas ocorressem em quatro faixas axiais de direção aproximada da leste-oeste, no Rio Grande do Sul, em Santa Catarina, no Paraná e em São Paulo.

Quanto às relações verticais dessas rochas com os basaltos toleíticos, alguns dos autores citados descrevem-nas, no Rio Grande do Sul, como sequências superiores aos basaltos, constituindo o topo da Formação Serra Geral. Estudos recentes, envolvendo análises isotópicas de estrôncio, (Cordani et al. 1980), indicam que essas rochas são basaltos toleíticos contaminados por material do embasamento da bacia. Este fenômeno somente seria possível em fases nas quais o magmatismo teria sido acompanhado por aumento do fluxo termal, permitindo a fusão e incorporação de material síalico aos magmas toleíticos. Este fato deveria ser analisado mais detalhadamente, pois ele seria de grande importância nos estudos sobre geração de hidrocarbonetos na bacia.

O objetivo deste trabalho foi a delimitação da área de ocorrência das rochas mais ácidas da Formação Serra Geral em parte da Região Sul do Brasil,

em particular de um derrame diferenciado de lavas de filiação ácida, denominada de riodacito pórfito ou quartzo latito pórfito (de boa resolução espectral nas imagens LANDSAT) de grande expressão regional, utilizando uma metodologia adequada de interpretação de dados de sensoriamento remoto.

Pretendeu-se, ainda, obter informações de cunho estrutural, com base em imagens LANDSAT e radar, que pudessem permitir a detecção de altos e baixos estruturais. Tais feições poderão ser de grande ajuda no estudo das potencialidades de acumulação e migração de hidrocarbonetos, bem como na análise de evolução estrutural daquela parte da bacia.

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um trabalho mais amplo, desenvolvido pela THEMAG ENGENHARIA LTDA. para a Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRÁS, e constam de três relatórios técnicos da THEMAG, respectivamente IMS-10, IMS-20 e IMS-30, de 1981.

2. METODOLOGIA

A delimitação da área de ocorrência das rochas mais ácidas da Formação Serra Geral e a extração de informações estruturais se restringiram à área de cerca de 69.000 km², abrangida por duas cenas LANDSAT, órbita 206 pontos 30 e 31 (SRB), nas porções sul do Paraná, central de Santa Catarina e norte do Rio Grande do Sul.

O procedimento para interpretação de imagens incluiu análise visual, análise automática, através do sistema I-100 do INPE, e controle de campo. Na análise visual foram utilizadas imagens MSS preto-e-branco dos canais 5 e 7, imagens MSS coloridas, todas na escala 1:500.000, além de mosaicos de radar de visada lateral do Projeto RADAMBRASIL, na escala 1:250.000. Para maior detalhe na análise visual, foram feitas ampliações realçadas no sistema I-100, nas escalas 1:250.000 e 1:100.000.

Na interpretação visual para extração de informação litológica a metodologia empregada foi a de delimitação de zonas homólogas caracterizadas por padrões texturais determinados, frutos da interação das informações fornecidas pelos tipos de solo, rocha, relevo, drenagem e cobertura vegetal, além de sombreamento e feições de ocupação humana. Para extração de informação estrutural baseou-se na interpretação de lineamentos em imagens de satélite e radar. O termo lineamento abrangeu todas as feições lineares, em geral de natureza geológica, observadas nas imagens.

Na análise automática de dados

MSS/LANDSAT foram selecionadas áreas em que a separação de zonas com textura homogênea não ficou bem evidenciada na análise visual. Nessas áreas foram aplicadas as técnicas de tratamento estatístico denominadas pré-processamento e classificação não-supervisionada.

A técnica de pré-processamento utilizada com mais sucesso na separação de rochas diferenciadas da Formação Serra Geral foi a das "Principais Componentes". Essa técnica resume-se em reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados através da minimização-maximização das variâncias segundo um sistema de coordenadas rotacionado em relação ao original. Dessa forma, novas variáveis são criadas a partir das que apresentam valores máximos de variância, ao passo que são eliminadas as variáveis como valores mínimos de variância. Esse processo implica na redução dos quatro canais originais do MSS a dois componentes principais, sempre com substancial da quantidade original de informação.

A classificação não-supervisionada foi feita através da técnica denominada "K-medias", a qual individualiza os K grupos ("clusters") principais e utiliza suas médias como critério para classificação dos demais "pixels" da cena (Hartigan, 1975).

O controle de campo teve por finalidades verificar os resultados da classificação automática, precisar os contatos entre os termos mais ácidos e os basaltos e caracterizar petrograficamente esses termos mais ácidos. Esse controle foi feito através de perfis regionais no âmbito das duas referidas cenas LANDSAT.

3. RESULTADOS

O principal resultado obtido neste trabalho foi a identificação e mapeamento em escala regional de derrames de rochas ígneas de composição intermediária a ácida, cobrindo extensas áreas nos Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. As áreas de ocorrência de tais rochas, bem como dos basaltos toleíticos, constam do mapa geológico apresentado na figura 1.

Dessa forma, foram individualizadas as duas unidades fotogeológicas, com feições características. Essas unidades apresentam, a nível de fotointerpretação, diferenças tanto entre si quanto em relação aos basaltos. Domesmo modo, na análise automática das imagens em questão, as rochas ácidas foram facilmente discriminadas através

do algoritmo K-medias. Os resultados da classificação automática foram utilizados para orientar a análise visual, especialmente naquelas áreas onde as texturas características não se apresentavam claramente. (foto 1).

A primeira unidade é constituída por um horizonte de espessura variável de 40 a mais de 100 metros e foi classificada como riocacito pórfiro ou quartzito latito pórfiro. Caracteriza-se fotogeologicamente por imprimir ao relevo um modelado plano, finamente entalhado, com recortes em ângulos retos no rebordo das Serras da Esperança e do Caldas, nos patamares e bordas do platô entalhado pelo Rio Iguazu próximo a Mangueirinha, no Estado do Paraná, e na borda de Serra de Chapecó, cujo platô se estende desde a cidade homônima até Irani, no Estado de Santa Catarina. Essa unidade apresenta ainda uma tonalidade cinza escura na imagem do canal 7 do sensor MSS. Estas rochas se estendem numa faixa praticamente contínua com 300 quilômetros de extensão, desde a região de Guarapuava (PR) até ao sul de Nonoai (RS), sendo interrompida apenas nos vales dos Rios Iguazú e Uruguai, e de afluentes de seus afluentes.

A segunda unidade é composta por um conjunto de rochas denominadas posteriormente de granófiros, que apresentam uma elevada resistência ao intemperismo. Esse fato, relacionado à alta porcentagem de quartzo em sua composição mineralógica, faz com que as formas de relevo sobre ela instaladas sejam bastante conspícuas. Tais formas compõem o quadro geomorfológico dos campos ondulados da região de Palmas e Horizonte (PR) e de Campos Novos (SC). Essa unidade é perfeitamente delineável nas imagens orbitais MSS devido ao profundo contraste entre as tonalidades claras apresentadas pela associação granófirosolo-vegetação em relação aos basaltos toleíticos e também ao derrame de riocacito ou quartzito latito pórfiro.

As observações de campo mostraram que essas duas unidades fotogeológicas correspondiam efetivamente a tipos diferentes de rochas ígneas intermediárias a ácidas.

As principais características do horizonte de rochas porfiríticas são a sua tonalidade cinza médio a claro, a presença de fenocristais subcentimétricos a centimétricos de plagioclásio e a alternância de bandas claras e escuras quando observadas em afloramentos amplos.

Os granófiros, por sua vez, são de cor cinza claro, não possuindo porém os

fenocristais de plagioclásio do riocacito pórfito, e constituídos apenas por uma matriz extremamente fina, o que lhes confere uma textura tipo "sal e pimenta". Em afloramentos extensos pode ser observado um diaclasamento sub-horizontal muito característico, enquanto que na base dos derrames granofíricos geralmente estão presentes estruturas fluido-dinâmicas, produtos de deslocamentos de lavas relativamente viscosas.

A nomenclatura dessas rochas é ainda uma questão que permanece aberta à discussão, uma vez que a determinação, ao microscópio, das quantidades relativas de quartzo, plagioclásio e feldspato potássico é dificultada pela granulação extremamente fina de matriz. Além disso, análises químicas dessas rochas não se encontram disponíveis.

Por essa razão, preferiu-se neste trabalho manter os termos de caráter petrográfico *riocacito pórfito* ou *quartzo latito pórfito* para as rochas com fenocristais de plagioclásio e o termo de caráter apenas textual *granofiro* para as rochas que apresentam uma textura extremamente fina, com intercrescimento de quartzo e feldspato potássico. Vale ressaltar, no entanto, que a composição mineralógica dos dois tipos, bem como as quantidades relativas de minerais constituintes são bastante semelhantes. Esse fato torna possível a utilização do termo *quartzo-latito*, segundo a definição de Streckeisen (1978), para designar ambas.

Quanto ao posicionamento vertical das rochas porfiríticas e granofíricas em relação aos basaltos toleíticos, tanto os dados obtidos por interpretação de produtos de sensoriamento remoto quanto as informações obtidas em campo, indicam que, na área estudada, os diferenciados se situam em posição intermediária no pacote basáltico. Dessa forma, na região aqui abordada, três sub-unidades podem ser identificadas na Formação Serra Geral, sendo a inferior e a superior constituídas por sucessivos derrames basálticos toleíticos e a intermediária constituída pelo extenso derrame de riocacito pórfito, juntamente com granofiros em determinados locais. Esse modelo exclui os granofiros da região de Campos Novos (SC) e Anita Garibaldi (RS) que, apesar de apresentarem características fotogeológicas e petrográficas absolutamente idênticas aos de Horizonte (PR), não estão ainda com sua posição estratigráfica bem definida.

Já para os granofiros de Horizonte e as rochas porfiríticas, os dados obtidos indicam que os granofiros estão em posição superior, sendo portanto posteriores aos riocacitos.

A análise dos lineamentos obtidos das imagens de sensoriamento remoto, assim como a própria disposição espacial regional da camada de riocacito pórfito, mostrada no mapa geológico da figura 1, permitiram a identificação de feições tectônicas regionais que afetaram as rochas da Formação Serra Geral. Ficou confirmado que toda a extensa camada riocacítica no âmbito da área estudada mostra-se ondulada desde a região de Guarapuava, situada no Paraná, até a sul do Rio Uruguai, na divisa entre os Estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Essa ondulação ficou bastante evidente através das medidas feitas nos perfis de campo que indicaram que essa camada margulha ora para noroeste, ora para sudoeste, configurando assim altos e baixos estruturais de âmbito regional (ver fig. 1).

Esses arqueamentos estão provavelmente relacionados à elevação das anteclasses de Ponta Grossa, a norte, e do Rio Grande do Sul, resultando em esforços compressoriais na região entre elas.

As anteclasses associam-se, inicialmente, esforços tensionais segundo N50E, dando origem a fraturas N50W, as quais serviram como principais condutos para o extravazamento do magma basáltico. Como aquelas feições são limitadas a NW e SE, esforços secundários resultaram em fraturas com orientação NE-SW. Como resultado desses movimentos em ambas anteclasses, a região objeto deste trabalho foi submetida a esforços compressoriais segundo NE-SW (principal) e NW-SE (secundário) e como decorrência disso formaram-se dois sistemas de fraturamento. O primeiro, com orientações em torno de N20E e N80E, e o segundo, com orientações próximas a N70W e N10W. Essas direções teóricas ajustam-se bastante bem às direções observadas durante a análise de imagens de radar e LANDSAT, bem como nos trabalhos de campo. Deste modo, além do fraturamento, as rochas da região sofreram flexuras, provavelmente ligadas a movimentos em blocos, com eixos orientados segundo NW-SE, paralelos às anteclasses acima mencionadas, e compatíveis com a forma da faixa de rochas ácidas.

É de se esperar ainda que a dinâmica de tais arqueamentos tenha gerado não só fraturas de cisalhamento, como também de distensão, acarretando a formação de estruturas do tipo "horsts" e "grabens".

Outra feição estrutural notável da área estudada é o Domo de Vargeão (figura 1, foto 2). Trata-se de uma estrutura circular com 12 quilômetros de diâmetro, definida por Paiva F^o et al. (1978) e que aparece de forma bastante conspícua nos produtos de sensoriamento remoto analisados.

A anomalia estrutural de Vargeão é objeto de discussão quanto à sua gênese. As hipóteses formuladas atribuem-na como sendo produto do impacto de um corpo celeste, o que configuraria um astroblema, ou como tendo sido gerada por escape explosivo de gases vulcânicos ou ainda como produto de plutonismo, talvez de filiação alcalina. Os dados geofísicos disponíveis, contudo, não indicam a presença de intrusão em profundidade. A hipótese que se coloca como mais plausível, devido às similaridades morfológicas e estruturais entre o Domo e outros astroblemas, é a de um fenômeno de impacto de corpo celeste no local, ressaltando, no entanto, que somente estudos específicos aprofundados, com objetivo de identificar feições de metamorfismo de impacto, poderiam elucidar o problema.

4. CONCLUSÕES

A metodologia aplicada à análise e interpretação de produtos de sensoriamento remoto, utilizada neste trabalho, apresentou bons resultados na delimitação, a nível regional, de derrames de composição diferente dos basaltos toleíticos da Formação Serra Geral.

Essas rochas de filiação ácida, mapeadas em superfície apenas no Rio Grande do Sul, puderam ter suas ocorrências estendidas para os estados de Santa Catarina e Paraná. Fica assim demonstrada a importância de estudos futuros visando um melhor conhecimento estratigráfico da Formação Serra Geral.

Os derrames de riódacito ou quartzo latito porfiro aqui apresentados não constituem a porção terminal da sequência de efusivas, conforme proposto para o Rio Grande do Sul. Na realidade, eles se situam em uma posição intermediária entre dois pacotes basálticos toleíticos, definindo desta maneira uma camada guia. Dessa forma, três sub-unidades da Formação Serra Geral podem ser definidas na região estudada.

A semelhança da camada porfirítica outros derrames guias poderão existir no pacote das efusivas, mostrando ser bastante viável uma estratigrafia pormenorizada nos derrames basálticos

da Formação Serra Geral. Os próprios derrames básicos, notadamente aqueles mais espessos, da ordem de 50 a mais de 100 m, também devem ter expressão regional a julgar pela sua maior fluidez em relação aqueles de filiação ácida, constituindo, conseqüentemente, derrames-guias.

O estudo do comportamento tectônico da Bacia do Paraná passa, por conseguinte, a ter mais uma fonte valiosa de informações uma vez que a camada de rocha porfirítica mapeada mostra-se ondulada, refletindo manifestações tectônicas posteriores ao vulcanismo Serra Geral.

5. BIBLIOGRAFIA

CORDANI, U.G.; SARTORI, P.L.; KAWASHITA, K. Geoquímica dos isótopos de estrôncio e a evolução da atividade vulcânica na Bacia do Paraná (Sul do Brasil) durante o Cretáceo. *Anais da Acad. Bras. Ciênc.*, 52(4):811-818, 1980.

GARCIA, P.F.; MARINHO, D.A. Aspectos genéticos das rochas ácidas da Formação Serra Geral nas Folhas Uruguiana (SH-21) e Porto Alegre (SH-22). In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Balneário de Camboriú, *Anais*, vol. 4, p. 41-65, 1978.

HARTIGAN, J.A. *Clustering Algorithms*. John Wiley & Sons, New York, 351pp., 1975.

LEINZ, V. Contribuição à geologia dos derrames basálticos do sul do Brasil. *BoL. FFCL-USP*. São Paulo, 5:1-61, 1949.

MENEGOTTO, E.; MEDEIROS, E.R. Contribuição ao estudo das rochas ígneas ácidas da Região da Serra de Tupanci, RS. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29. Ouro Preto. *Anais*, vol.2, p. 425-432, 1976.

PAIVA F^o, A; ANDRADE, C.A.V.; SCHEIBE, L.F. Uma janela estratigráfica no oeste de Santa Catarina: O Domo de Vargeão. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Recife, *Anais*, vol. 1, p. 408-412, 1978.

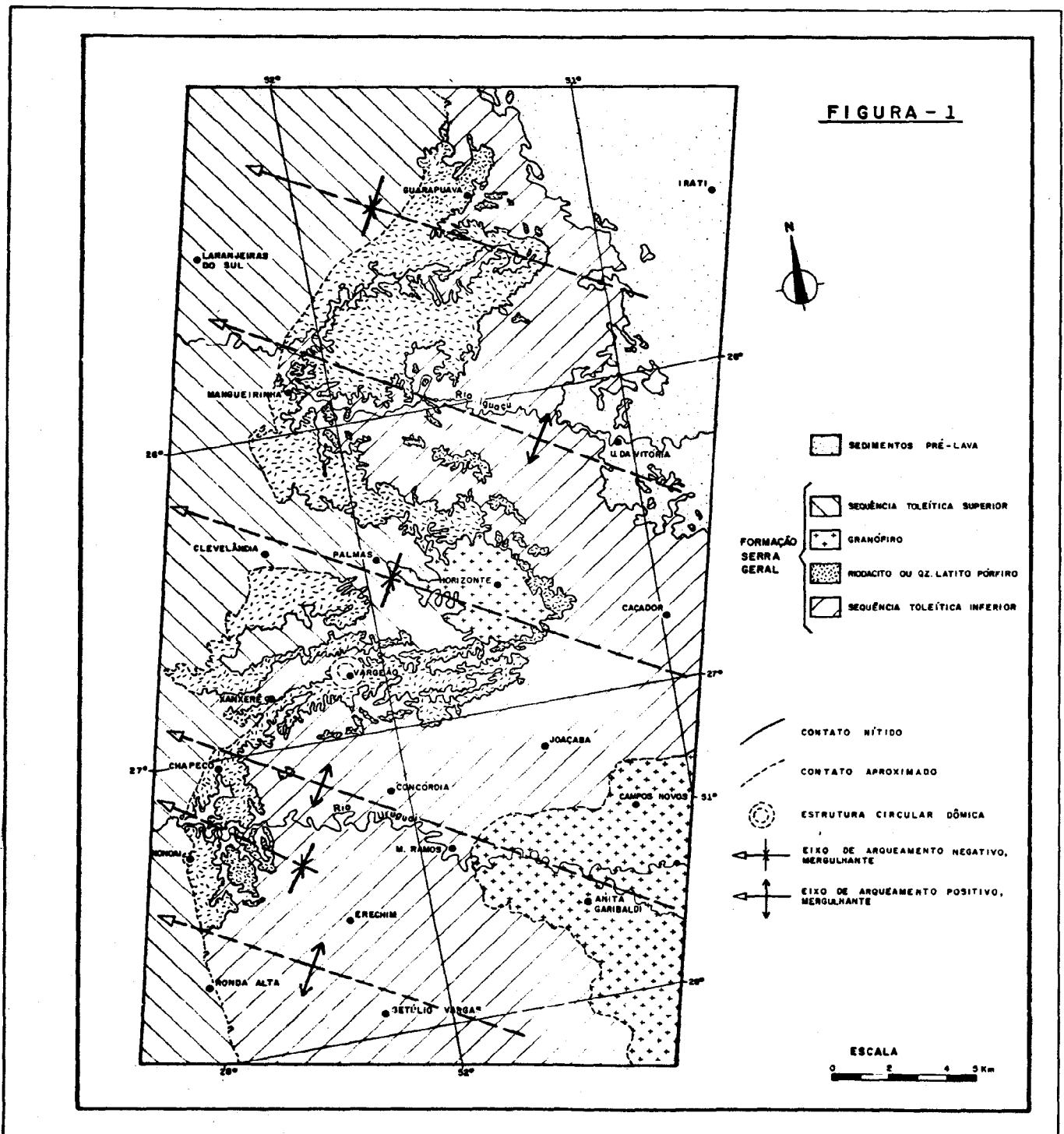
SARTORI, P.L.; MACIEL F^o, C.; MENEGOTTO, E. Contribuição ao estudo das rochas vulcânicas da Bacia do Paraná na Região de Santa Maria, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 5(3): :141-159, 1975.

SCHNEIDER, A.W. Contribuição à petrologia dos derrames basálticos da Bacia do Paraná. Universidade do Rio Grande do Sul, *Publicação Avulsa*. Porto Alegre, 1964.

STRECKEISEN, A. Classification and nomenclature of volcanic rocks, lamprophyres, carbonatites and melilitic rocks - *Neues Jahrbuch fur Mineral. und Petr.*, 1(134):1-14, 1978.

SZUBERT, E.C. Esquema interpretativo da evolução geológica das rochas vulcânicas mesozóicas da Bacia do Paraná. *Acta Geologica Leopoldensia*, 3(10):113-124, 1979.

SZUBERT, E.C.; KIRCHNER, C.A.; SHINTAKU, I. Vulcanismo ácido no planalto meridional do Rio Grande do Sul. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. Recife, *Anais*, v.3, p. 1350-1356, 1978.



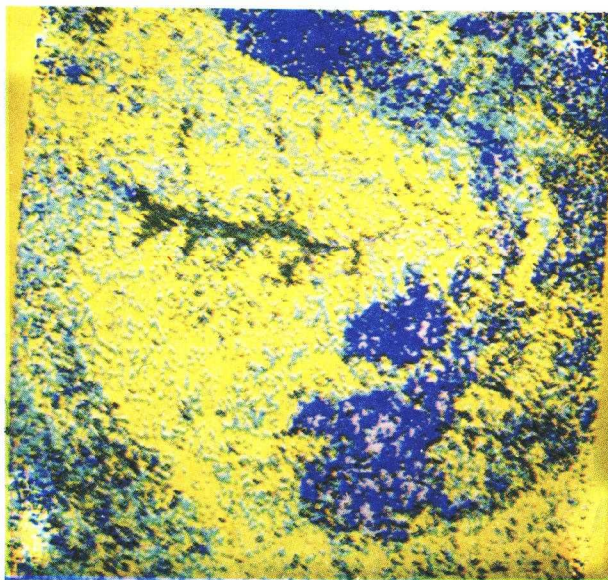


FOTO 1 - Resultados da classificação não supervisionada utilizando a técnica "K-medias" para a cena 206, ponto 30.

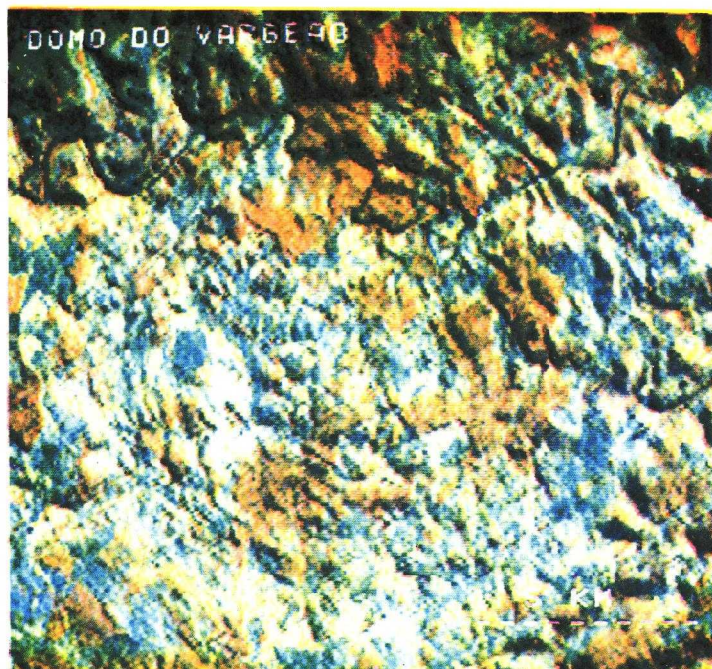


FOTO 2 - Domo de Vargeão. Porção da cena 206, ponto 31. Composição colorida ampliada, com "contrast stretch".

