

SENSORIAMENTO REMOTO NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO: UMA AVANÇADA  
CORRELAÇÃO DE DADOS DE DIFERENTES TIPOS DE SENSORES

C.C. LIU, P.R. MENESES, W.R. PARADELLA  
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS  
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO  
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP - BRASIL

RESUMO

Quatro diferentes tipos de produtos de sensores, imagens LANDSAT, Radar e fotografias coloridas infravermelho e ektachrome, foram utilizadas para o estudo geológico da parte norte do Quadrilátero Ferrífero, M.G., objetivando avaliar suas diferentes potencialidades, com maior ênfase na pesquisa dos depósitos ferríferos, presentes na área. As imagens LANDSAT, em comparação com as de Radar, mostraram maior capacidade de mapeamento das unidades geológicas, em razão dos melhores contrastes tonais destas imagens. Além disso, a alta diferença espectral na região do infravermelho, entre rochas ricas e pobres em ferro, tornaram as imagens LANDSAT, canal 7, (região do infravermelho), as mais úteis para a delimitação das formações ferríferas. As fotografias aéreas infravermelho e colorida normal permitiram a subdivisão dos grupos, nas suas várias formações e o reconhecimento parcial das formações e cangas ferríferas. Os lineamentos estruturais foram particularmente mais evidenciados pelas imagens de Radar, possibilitando a classificação de quatro diferentes grupos de lineamentos, os quais foram relacionados a sistemas de fraturas, falhas, foliações, diques, etc. Um mapeamento geral da distribuição das formações ferríferas foi realizada através de classificações automáticas dos dados das imagens LANDSAT no analisador I-100, mostrando os resultados com o uso desta técnica, uma perfeita concordância com os mapeamentos geológicos da área.

## ABSTRACT

Four kinds of remote sensor products, LANDSAT and Radar images, Ektachrome color and infrared color aerophotographs were used to study the regional geology and iron formation of the north part of Quadrilátero Ferrífero, M.G., for evaluating their potentialities on these purposes. The LANDSAT images are more available in mapping lithologic units as compared with Radar image on account of its better tonal contrast which has to be used in conjunction with all landforms and their continuities. Moreover, the largest spectral difference between rocks rich and poor in iron in the near infrared (LANDSAT image of band 7) is more helpful to delineate the iron formations. The subdivision of the groups into formations on normal and infrared color aerophotographs is practicable. The major structural provinces like the Rio das Velhas Uplift, the Serra do Curral and the Gandarela Syncline are all detectable with the four sensors. The extraction of the structural lineaments on Radar imagery is more practicable on account of the enhancement of topographic features with Radar Shadow. Mapping the general distribution of iron formations by the computer's automatic classification (I-100) is possible. If the test sites were selected in combination with field work and the image scale were enlarged enough for this purpose, the result would be more satisfactory.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, vem sendo estudada detalhadamente por mais de 150 anos, devido às suas potencialidades econômicas representadas, principalmente, pelos depósitos ferríferos.

Em 1969, foi estabelecido entre a ex-Comissão Nacional de Atividades Espaciais (CNAE), atualmente Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), e a NASA, um plano de cooperação para levantamento dos recursos minerais de grande parte desta região, a partir de dados de sensores remotos, incluindo coberturas fotográficas com filmes colorido normal e infravermelho e utilização de imageadores infravermelho e Radar de visada lateral (v. Plano da Missão 96 [ 3 ]).

Posteriormente, com a implementação do Programa de Sensoriamento Remoto Brasileiro, novos dados de sensores remotos foram colocados em disponibilidade, sobre a área, incluindo as imagens e mosaicos SLAR do Projeto RADAMBRASIL e as imagens (fitas CCT) fornecidas pelos satélites da série LANDSAT. Todo este conjunto de dados, na maior parte ainda não devidamente analisados, ofereceu aos autores deste trabalho, a perspectiva impar de uma avaliação do desempenho destes vários produtos de sensores, dentro do enfoque da caracterização da geologia regional e das formações ferríferas associadas. Como área teste de trabalho, foi selecionada a região norte do Quadrilátero, dentro dos limites  $19^{\circ}45'$  -  $20^{\circ}00'$  de latitude sul e  $40^{\circ}30'$  -  $44^{\circ}00'$  de longitude oeste.

Os resultados das interpretações obtidas, comparados e discutidos à luz dos levantamentos geológicos regionais e de detalhes disponíveis (mapas e relatórios do convênio USGS - DNPM), constituem em essência, o objetivo maior deste estudo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizadas no trabalho os seguintes produtos:

- 1 - Imagens LANDSAT, em papel, na escala 1:250.000, nos canais 4,5,6 e 7, da passagem de 15 de agosto de 1973.
- 2 - Imagens de Radar de Visada Lateral do Projeto RADAMBRASIL.
- 3 - Fotografias aéreas coloridas normais (transparências positivas) da Missão 96, na escala 1:42.000, recobrendo a área de Caeté à Serra dos Cambotas e a área da Sinclinal Gandarela.
- 4 - Fotografias aéreas coloridas infravermelho (transparências positivas) da Missão 96, idem na escala e área de recobrim<sup>en</sup>to do item anterior.
- 5 - Fitas CCT dos 4 canais do LANDSAT, adequadas à análise por computador (Sistema I-100) de 15 de agosto de 1973.

As imagens do LANDSAT e SLAR foram analisadas segundo os métodos convencionais de fotointerpretação destes produtos. As fotografias aéreas foram utilizadas a partir da análise estereoscópica, efetuada segundo os procedimentos usuais de fotointerpretação geológica. As fitas CCT foram analisadas, automaticamente, no Analisador I-100, com o intuito de tentar caracterizar, através da tonalidade, a distribuição das formações ferríferas da região.

## 3. ASPECTOS DA GEOLOGIA REGIONAL

De acordo com os levantamentos geológicos executados por Dorr, 1969 [ 2 ], a área do Quadrilátero Ferrífero é formada por rochas metassedimentares pertencentes às séries Rio das Velhas\* e Minas\*, recobrendo um embasamento predominantemente com gradações para granitos anatéticos ou migmatitos, intensamente deformados.

\* atualmente Super-Grupos Rio das Velhas e Minas.

A Série Rio das Velhas constitui a unidade estratigráfica de maior extensão ocorrendo geralmente em áreas anticlinais. Compreende principalmente rochas xistosas metassedimentares e metavulcânicas, submetidas a, pelo menos, dois eventos metamórficos: fácies xisto-verde e anfibolito. Os dados geocronológicos confirmam idades acima de 2.700 m.a., permitindo classificar essa série como um "greenstone belt". O seu contato com a Série Minas é estrutural e estratigraficamente "unconformity". A série Minas é observada em sinclínios transformados e falhados sendo os filitos e quartzitos as suas litologias mais comuns. Em geral ela é distintamente diferente, em natureza, da Série Rio das Velhas por se consistir de extensas formações tabulares, relativamente consistentes em litologias de grande extensão lateral, um tipo de formação não presente na série inferior. Determinações geocronológicas indicam uma idade superior a 2.000 m.a. para suas rochas. A Tabela 1 apresenta uma síntese estratigráfica dos grupos e formações que compreendem ambas as séries.

No quadro estrutural do Quadrilátero Ferrífero, a maior estrutura é o Arqueamento Rio das Velhas [ 2 ], que se estende desde o sul do Quadrilátero, seguindo em direção a Nova Lima, daí para nordeste, desaparecendo nas rochas graníticas próximas a Caeté. Todas as maiores estruturas sinclinais estão conjugadas a ela na área de estudo, a extremidade norte da sinclinal Vargem do Lima é o único exemplo existente de estrutura dobrada associada a este arqueamento, com a direção de seu traço axial paralelo a ele.

A maior estrutura presente é a parte central, isoclinal invertida, da Sinclinal Gandarela. O Grupo Piracicaba distribui-se ao longo de sua porção axial e os grupos Itabira e Caraça nos seus flancos. A grande falha de empurrão do Fundão, segue mais ou menos paralela ao seu traço axial e trunca seu flanco sudeste.

A Serra do Curral, limite norte do Quadrilátero, mostra-se como uma estrutura geológica homogênea, formada pelos grupos

TABELA 1

COLUNA ESTRATIGRÁFICA

UNIDADE ESTRATIGRÁFICA	LITOLOGIA	ESPESSURA	ESTRUTURAS PRINCIPAIS
SERIE ITACOLOMI	protoquartzito, filito sericítico e conglomerado	2.000 m	Falhas de Empurrão
discordância erosional			
SERIE MINAS	Gr. Piracicaba Fm. Sabará Fm. Barreiro Qzito Tabões Fm. Fecho do Funil Fm. Cerradinho	grauvacas, xistos, filitos e tilóides	3.500 m
		filitos	120 m
		ortoquartzitos	120 m
		dolomito, filito dolomítico e quartzoso	410 m
		quartzito ferruginoso, filito	400 m
	Gr. Itabira Fm. Gandarela Itabirito Cauê	margas calcíticas e dolomíticas, filito rico em carbonato e finas unidades de itabirito	300 m
		Itabirito	250 m
	Fm. Batatal Fm. Moeda	filitos	100 m
		orto e protoquartzitos, conglomerado, filitos e quartzitos	1000 m (variável)
	Gr. Tamandua Fm. s/ nome Qzito Cambotas	filito e dolomito c/ Fe	1000 m (variável)
ortoquartzito			
discordância angular			
SERIE RIO DAS VELHAS	Gr. Maquiné Fm. Casa Forte Fm. Palmital	protoquartzito, arenito, conglomerado	1600 m
		filito sericítico, xistos, quartzito	
EMBASAMENTO	Gr. Nova Lima	xistos, filitos, xistos metavulcânicos, quartzitos, facies carbonática com formações ferríferas.	4.000 m (mínimo)
			Dobras e basculamentos profundos bastante tectonizados

Todos os principais tipos de estruturas

Caraça, Itabira e Piracicaba (Série Minas), distribuídos paralelamente à sua extensão, com mergulhos inversos para sudeste. A parte mais complexa da serra, do ponto de vista estrutural, é a leste de Belo Horizonte, onde ela é seccionada por um número de pequenas falhas. Na sua extremidade nordeste, ela inflete-se abruptamente para norte e a seguir volta-se para oeste, refletindo um dobramento sinclinal (Figura 1).

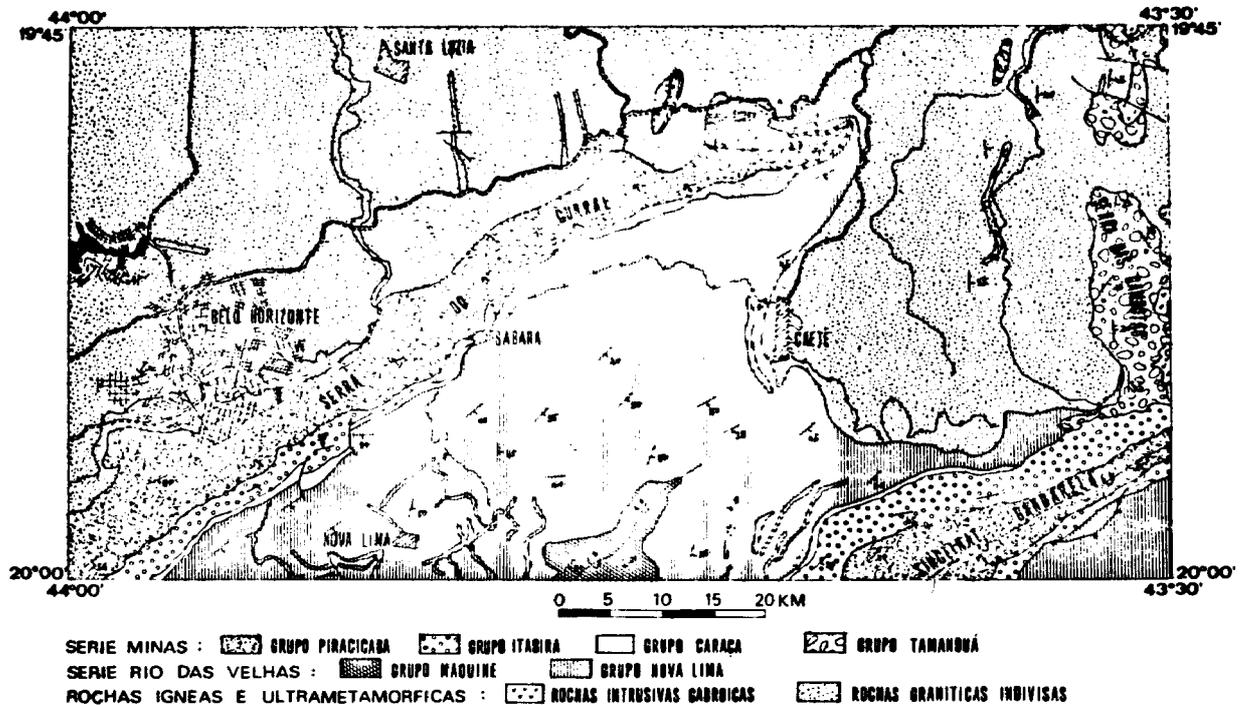


FIG.1 MAPA GEOLÓGICO [ FONTE DORR II 1969 ]

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 4.1 - INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS LANDSAT

A quantidade de informações geológicas, que pode ser extraída de imagens multiespectrais LANDSAT, é variável em função do canal utilizado, ou seja, da região do espectro eletromagnético abrangida por cada imagem MSS.

A grande vantagem no uso dos produtos deste sistema sensor resulta, justamente, na possibilidade de análise multiespectral do alvo de interesse, a partir das diferenças em energia refletida em distintos comprimentos de ondas.

O resultado final da interpretação deverá ter como base, a integração das diferentes informações, obtidas da análise individual de cada imagem disponível do sistema LANDSAT (canal 4: 0.5 - 0.6  $\mu\text{m}$ ; canal 5: 0.6 - 0.7  $\mu\text{m}$ ; canal 6: 0.7 - 0.8  $\mu\text{m}$  e canal 7: 0.8-1.1 $\mu\text{m}$ ).

A imagem do canal 4, que tem como característica principal uma grande homogeneidade de tonalidades escuras, diretamente relacionada à influência dos baixos níveis de reflectância da cobertura vegetal nesta região do espectro, é pouca valiosa na interpretação geológica, principalmente no estudo de regiões onde o principal elemento de mapeamento são as características topográficas das unidades, representadas e realçadas pelas diferenças de sombreamentos. Em virtude desta limitação, a imagem do canal 4 não foi analisada no trabalho, pela escassez de resultados fornecidos.

A imagem do canal 5 contém a maior gama de tons de cinza entre as imagens LANDSAT, tornando possível a análise e separação de unidades, em grande parte por gradações de cinza e, secundariamente por expressões topográficas.

Na área (Figura 2), as formações ferríferas do Grupo Itabira foram as únicas unidades que mostraram possibilidade de delimitação, além da inferência de ocorrência de lentes de itabirito, situados em região de rochas do Grupo Nova Lima.

As demais unidades não puderam ser reconhecidas, em virtude de apresentarem uma heterogeneidade de tons ao longo de suas áreas de exposições, dada as variações da cobertura vegetal, atividades antrópicas, morfológicas e mesmo litológicas, tornando extremamente duvidosa qualquer interpretação.

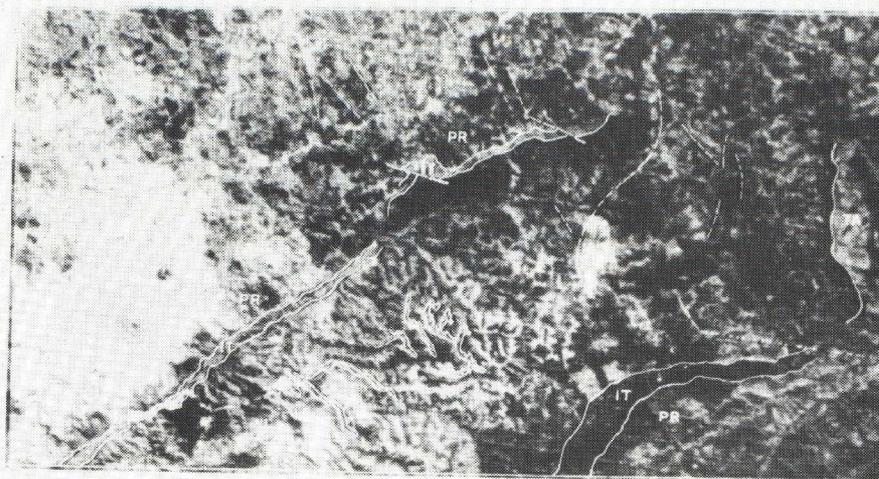
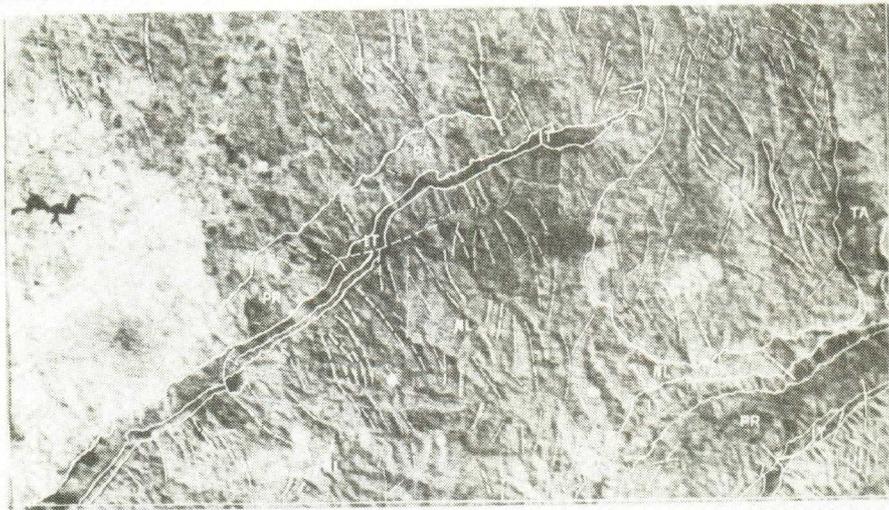


FIG 2 IMAGEN LANDSAT E INTERPRETAÇÃO

Os lineamentos estruturais extraídos nesta imagem (canal 5), são poucos, devendo corresponder provavelmente, a sistemas de falhamentos.

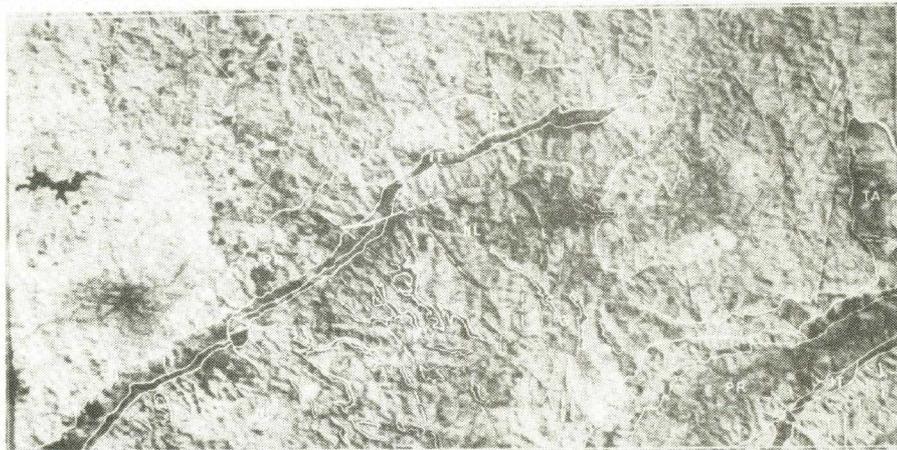
As imagens dos canais 6 e 7, em virtude da alta refletância da vegetação nesta região do espectro, apresentam níveis tonais mais elevados (são mais claras), facilitando a delimitação e caracterização de unidades geológicas que apresentam ou exerçam controles topográficos, a partir dos efeitos de sombreamentos associados.

Tal característica permitiu que os melhores resultados fossem obtidos das interpretações destas imagens para a área do Quadrilátero Ferrífero, existindo de maneira geral, pequenas diferenças entre as informações fornecidas pelos canais 6 e 7 independentemente. Como exemplo, os limites do Grupo Piracicaba, na Serra do Curral e a separação dos metassedimentos do Grupo Nova Lima, com as rochas graníticas do embasamento, foram melhor definidos no canal 7 (Figura 4) do que no canal 6 (Figura 3).



BANDA 6  
0 5 10 15 20KM

FIG. 3 IMAGEM LANDSAT E INTERPRETAÇÃO



BANDA 7  
0 5 10 15 20KM

FIG. 4 IMAGEM LANDSAT E INTERPRETAÇÃO

Outro aspecto importante a ressaltar, refere-se à presença nas imagens do canal 7, de várias lentes ferríferas, presentes na região dos metassedimentos do Grupo Nova Lima, (identicamente observadas no canal 5) e que não foram possíveis de identificação na imagem do canal 6. Nos canais 6 e 7, a região de ocorrência do Grupo Itabira foi mais facilmente delimitada, devido à sua tonalidade extremamente escura causada pelo comportamento de materiais ricos em ferro, que possuem a propriedade de exibirem uma elevada absorção na região do infravermelho próximo. Demonstrando tal característica, as Figuras 5 e 6 apresentam as curvas de reflectância espectral típicas de alguns minerais e rochas pobres e ricas em ferro, onde se observa que o maior contraste ocorre na região do infravermelho próximo (canais 6 e 7 do LANDSAT).

Do ponto de vista estrutural, duas categorias de lineamentos de significado regional, foram interpretadas através dos canais 6 e 7. Os lineamentos predominantes ostentam direção preferencial NNW-SSE e provavelmente se relacionem a fraturamentos. Os lineamentos secundários se apresentam como falhamentos, pois impõem descontinuidades na disposição das unidades mapeadas na área.

#### 4.2 - INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS DE RADAR

As imagens de Radar de visada lateral, têm a característica de realçarem pelo sombreamento, os elementos topográficos do relevo, particularmente as feições lineares que se dispõem paralelas ou oblíquas à linha de vôo. Tal característica confere às imagens SLAR melhor desempenho à extração de lineamentos estruturais do que oferecem as imagens LANDSAT. Entende-se por lineamentos estruturais qualquer feição topográfica do relevo que possa revelar uma correspondência com estruturas geológicas.

Estas imagens, revelaram, na área do Quadrilátero Ferrífero, a presença de uma infinidade de lineamentos estruturais, a maioria de pequeno porte, e que se distinguem entre si segundo suas expressões fotográficas e topográficas. Quatro diferentes tipos puderam assim serem identificados:

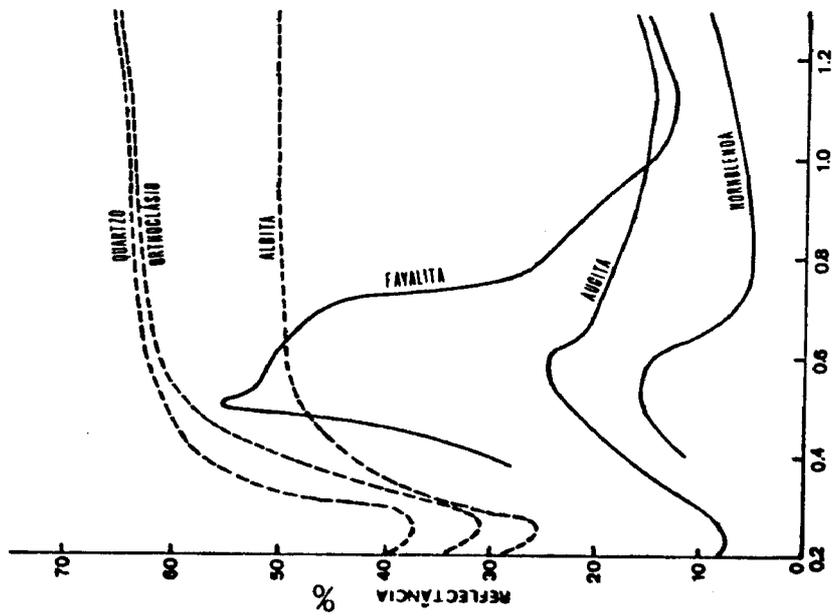


FIG. 5 COMPORTAMENTO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL NO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA MINERAIS RICOS EM FERRO (LINHA CONTÍNUA) E POBRES EM FERRO (LINHA TRACEJADA) - FONTE ROWEN 1972

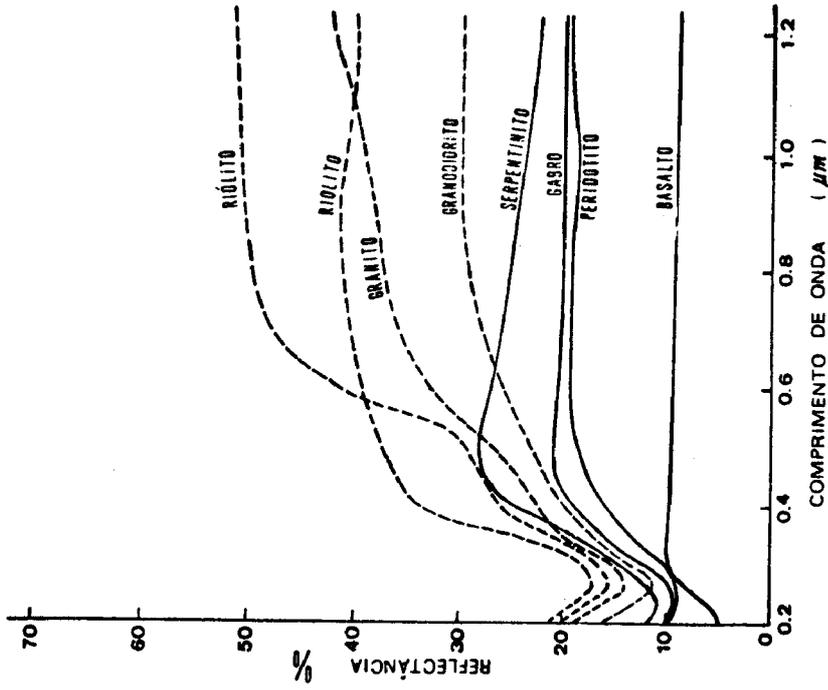


FIG. 6 COMPORTAMENTO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL NO VISÍVEL E INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA ROCHAS RICAS EM FERRO (LINHA CONTÍNUA) E POBRES EM FERRO (LINHA TRACEJADA) - FONTE ROWEN 1972

- a) pequenos lineamentos intersectantes e de fraca expressão fotogrãfica;
- b) pequenos lineamentos caracterizados por relevos negativos;
- c) lineamentos extensos de notãvel expressã fotogrãfica e de topografia negativa;
- d) lineamentos caracterizados por relevos positivos.

Tanto em funçã da infinidade numãrica destes lineamentos, como da escala de imagem, foram representados em Figura, somente aqueles mais notãveis e de possãvel representaçã cartogrãfica.



SLAR - BANDA X  
0 5 10 15 20 KM

FIG. 7. IMAGEM DE RADAR E INTERPRETAÇÃO

Na região de rochas graníticas indivisas, entre Caeté e Serra das Cambotas (ver Figura 7 e compará-la com a Figura 1), é possível observar, segundo a direção geral NNW-SSE, uma infinidade de pequenos lineamentos não superiores a 2 mm em extensão (tipo a), e quase sempre truncados por outros lineamentos, sugerindo serem traços de foliação e bandamento, visto apresentarem concordância com as medidas de foliação e bandamento anotadas nos mapas geológicos de Dorr, 1969 [ 2 ] e Herz 1970 [ 5 ]. Nesta mesma região outros lineamentos de direções NE-SW e NW-SE, um pouco mais evidentes e maiores que os correspondentes à foliação (tipo b), e, de forma semelhante, também truncados por lineamentos mais notáveis, referem-se provavelmente, a dois sistemas de juntas. Um terceiro tipo de lineamento também se apresenta nesta região, correspondendo àqueles de maiores dimensões e forte expressão fotográfica (tipo c). Ostentam direções NNE-SSW e NNW-SSE e devem corresponder aos dois principais sistemas de juntas ou zonas de fraturas e/ou falhas da área. Porém, esses tipos de lineamentos não constam dos mapas geológicos citados. Isto seria explicável e viria, a princípio, ajudar na confirmação de serem tais lineamentos fraturas ou juntas, já que usualmente tais estruturas não são representadas em mapas geológicos regionais. Ao norte da Serra do Curral são encontrados os lineamentos com expressão topográfica positiva, segundo a direção NNW-SSE (linha pontilhada na Figura 7), os quais podem ser inferidos como sendo diques, não porque somente sejam concordantes com alguns dos diques que se tem conhecimento nesta região, mas também por serem concordantes com as direções dos lineamentos mais expressivos da área, os quais devem ter servido de conduto ao material magmático.

Lineamentos com feições semelhantes à área de rochas graníticas estão presentes na região do Grupo Nova Lima e suas correspondências com foliações, bandamentos, juntas, fraturas ou diques foram estabelecidas nos mesmos princípios anteriormente discutidos. Os de direção ENE-WSW são coincidentes com as medidas de foliações e os de direções NNE-SSW e NNW-SSE são, provavelmente, sistemas de juntas ou zonas de fraturas e/ou falhas. Ao longo da Serra do Curral e da

Sinclinal Gandarela, alguns lineamentos nas direções NNE-SSW e NNW-SSE, obliquamente truncam o acamamento geral, porém não se observa terem causado deslocamentos das unidades, fato que contrariamente com provam as imagens LANDSAT, levando assim a serem interpretados pelas imagens de Radar como juntas ou falhas.

De uma maneira geral, na área de estudo, as direções de lineamentos que melhor se apresentam nas imagens de Radar são as NNE-SSW e NNW-SSE, que foram inferidas como os dois principais sistemas de juntas ou fraturas de significado regional e que aparecem quase sempre obliterando as feições estruturais mais velhas. Verifica-se que nas imagens LANDSAT, apenas um entre estes dois sistemas de lineamentos foi reconhecido.

Por outro lado, se as imagens de Radar melhor do que as imagens LANDSAT evidenciam os lineamentos estruturais, menos capacitadas se mostram para diferenciação de unidades litológicas. Embora essas unidades mostrem distintas diferenças topográficas e sendo o realce do relevo inerente às imagens de Radar, a infinidade de lineamentos presentes nestas imagens, bem como a falta de contraste tonal que possuem, mascaram, em parte, o contraste topográfico, dificultando a separação das diferentes unidades. Os grupos Nova Lima, Maquinê, Itabira e Piracicaba só puderam ser traçados parcialmente, em função de suas diferenças topográficas, acompanhando-se de perto a interpretação, com o auxílio dos mapas geológicos de Dorr [ 2 ]. Exceções se fazem ao Grupo Caraça e ao Quartzito Cambotas.

As formações ferríferas ou propriamente o Grupo Itabi rã, distintamente realçados nas imagens LANDSAT, não se mostraram nas imagens de Radar diferentes das demais unidades, assumindo seus itabiritos, cangas ferríferas e litologias afins, aspectos idênticos aos quartzitos ou filitos.

#### 4.3 - INTERPRETAÇÃO DAS FOTOS AÉREAS EKTACHROME COLORIDAS NORMAIS

As transparências positivas coloridas normais selecionadas, cobrem a parte oriental da área de estudo, incluindo a Sinclinal Gandarela (Figura 8). Da análise estereoscópica destas fotografias pode-se constatar a quase ausência de afloramentos, sendo o terreno coberto, em grande parte, por solos espessos e vegetação. Embora parâmetros texturais e tonais sejam valiosos na identificação e delimitação de unidades de mapeamento, o mais importante fator de análise para esta área ainda é a expressão topográfica associada às diferentes litologias. Nas transparências, os limites do Quartzito Cambotas (RTC) podem ser inferidos a partir de uma série de afloramentos. As expressões fisiográficas do Grupo Nova Lima (RNL) em ambos os lados da Sinclinal Gandarela são diferentes e a distribuição de suas formações ferríferas intercaladas, representadas no mapa geológico da região na escala 1:1.25.000 [7], não são identificadas.



FIG.8 FOTOGRAFIA AÉREA COLORIDA NORMAL E INTERPRETAÇÃO

No flanco norte da Sinclinal, o Grupo Itabira é subdividido em duas unidades; Itabirito Cauê (MIC) e Formação Gandarela (MIG), as quais foram aproximadamente delimitadas, nos positivos coloridos, devido a dificuldade de definição de contatos. A unidade representada no mapa como Canga (QTCA), constituindo a cobertura ferruginosa que capeia o Itabirito Cauê, é facilmente delimitada nas fotos aéreas por sua expressão topográfica e tonalidade escura associada.

Das duas formações do Grupo Piracicaba, Formação Cercadinho (MPC) e Formação Sabará (MPS), apenas a primeira pode ser individualizada através de seu brilho e tonalidade. Para o flanco Sul da Sinclinal Gandarela, a Formação Gandarela, o Itabirito Gauê e as áreas de Canga não puderam ser identificadas.

Lineamentos correspondentes ao falhamento do Fundão não puderam ser reconhecidos nas transparências, cabendo apenas mencionar, no aspecto estrutural, a relação de concordância apresentada entre os lineamentos fotogeológicos interpretados e as direções de acamamento e foliação que constam nos mapas geológicos da região.

#### 4.4 - INTERPRETAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS INFRAVERMELHO

Na Figura 9 é apresentado o produto das interpretações de fotografias aéreas infravermelho. De modo geral, os resultados obtidos não diferem muito daqueles extraídos da análise das fotos aéreas coloridas normais, com a ressalva que as unidades Itabirito Cauê (MIC) e Canga (QTCA) são mais facilmente identificadas nas fotografias infravermelho, pela característica de absorção do ferro nesta região do espectro.



FIG. 9 FOTOGRAFIA AÉREA COLORIDA INFRAVERMELHA E INTERPRETAÇÃO

#### 4.5 - CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICAS DE DADOS DO LANDSAT MOSTRANDO A DISTRIBUIÇÃO DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS NA REGIÃO

As classificações automáticas de dados do LANDSAT foram realizadas, visando caracterizar a distribuição do Grupo Itabira na área, através da análise da tonalidade (níveis de cinza) nas 4 diferentes regiões do espectro (canais 4,5,6 e 7 do LANDSAT).

Todo o estudo foi realizado no Analisador I-100 do INPE (V. "Image-100 user's manual"), a partir de fitas adequadas à análise por computadores, dos 4 canais MSS da imagem nº 1388-12205 de 15 de agosto de 1973.

O programa de classificação automática utilizado, baseado nos critérios de máxima verossimilhança ou "MAXVER", de Velasco et al 1978 [11], obriga a definição de um limiar ou "índice" de rigor para a análise, sendo empregado no estudo o limiar 3,5, em virtude dos bons resultados obtidos com este índice de rigor, no trabalho de Mattoso et al 1979 [6].

A heterogeneidade do comportamento da reflectância, ao longo da área de exposição do Grupo Itabira (formação ferrífera), representada por níveis tonais mais elevados a SW e mais baixos a NE, na Serra do Curral, fez com que se considerasse duas classes distintas para o tema formação ferrífera, durante a fase de treinamento da classificação automática. Este procedimento visou melhorar o resultado obtido na classificação inicial, quando os pontos de amostragem para o Grupo Itabira foram considerados definidores de uma única classe, apresentando, em consequência, uma distribuição bem destoante do padrão previamente definido, para este Grupo, nos dados bibliográficos.

A Figura 10 apresenta a localização dos pontos de amostragens para a classe "sequência ferrífera I" (3 pontos a SW da região, na Serra do Curral); a sequência ferrífera II" (6 pontos dispostos no extremo oriental da mesma serra) e 7 pontos, definindo 7 classes "Estêreis" (os 7 retângulos restantes na figura). A amostragem foi realizada a partir da disposição do Grupo Itabira, como representado no mapa geológico de Dorr [2].

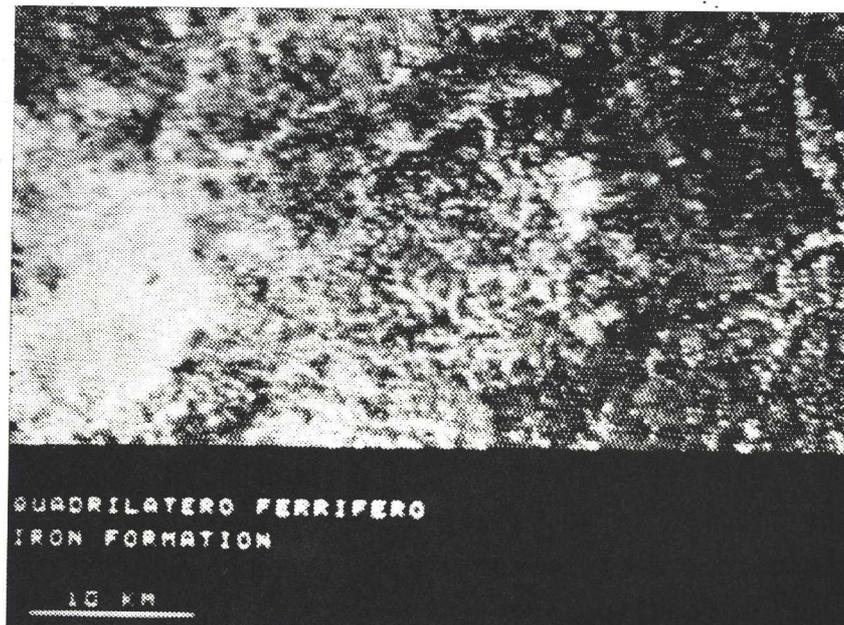


Fig. 10 - Áreas de amostragens para as classes consideradas na classificação MAXVER.

A Figura 11 mostra o resultado final obtido da integração dos resultados parciais de classificações automáticas para a classe sequência ferrífera I e II, realizadas independentemente. Nas duas classificações, as áreas de amostragens para as 7 classes estereis foram as mesmas.

Este resultado final, mostrando a distribuição das áreas de formações ferríferas, obtido através de classificações automáticas de dados LANDSAT, concorda, de maneira geral, com a distribuição em área da unidade Grupo Itabira, apresentada no mapa regional (Figura 1).



Fig. 11 - Resultado final da classificação automática para formações ferríferas no I-100.

A classificação pode ser melhorada se os pontos de amostragem para as classes foram melhor caracterizadas no campo, e se o trabalho se restringir a áreas menores permitindo, assim, através de ampliações, maior facilidade de análise dos "pixels" consideradas nas amostragens.

## 5. CONCLUSÕES

As imagens LANDSAT nos canais 6 e 7, exibindo n<sup>íveis</sup> tonais mais elevados e imprimindo um realce maior as formas do relevo, forneceram os melhores resultados para a individualização de unidades de mapeamento, principalmente se as unidades exercerem ou apresentarem controles topográficos.

Além disso, o grande contraste na região do infravermelho próximo, refletindo as diferenças de comportamento espectral para rochas ricas e pobres em ferro determinou a facilidade da delimitação das formações ferríferas nestes canais.

Em relação às informações estruturais, as imagens de Radar permitiram diferenciar várias categorias de lineamentos e correlacioná-las com os dados de mapeamentos, em nível superior a qualquer outro sensor. Porém, a numerosa quantidade de lineamentos nestas imagens dissimulou o contraste topográfico, diminuindo a possibilidade de diferenciação das unidades geológicas.

As fotos aéreas coloridas normais e infravermelho mostraram, entre si, resultados bastante semelhantes, exceção feita ao Itabirito Cauê, que apresentou a melhor resposta nas fotos infravermelho. Mais pelas feições topográficas do que tonais, a quase totalidade das diferentes formações foram reconhecidas e delimitadas.

Os resultados determinaram que é possível o mapeamento das ocorrências de formações ferríferas utilizando-se classificações automáticas de dados do LANDSAT. As classificações podem ser refinadas, se os pontos de amostragens forem melhor definidos e caracterizados no campo, visto que, no trabalho, eles foram considerados a partir do mapa geológico, podendo refletir heterogeneidades que podem não ser representativas.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] AMARAL, G.; MATTOS, J.T.; ALMEIDA FILHO, R.; CUNHA, R.P.; PARADELLA, W.R. Carta geológica ao milionésimo da Folha de Belo Horizonte, por interpretação de imagens LANDSAT. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Belo Horizonte. no prelo.
- [ 2 ] DORR, J.V.N. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington, D.C. 1969. (Geological survey professional paper 641-A).
- [ 3 ] COMISSÃO NACIONAL DE ATIVIDADES ESPACIAIS; NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (CNAE/NASA), Programa de Sensoriamento Remoto - Fase C - Missão 96. São José dos Campos. INPE, jul. 1969. (LAFE-87A).
- [ 4 ] GENERAL ELECTRIC. *Image-100: user manual*. Florida, 1975.
- [ 5 ] HERZ, N. Gneissic and Igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington D.C., 1970. (Geological survey professional paper 641-B).
- [ 6 ] MATTOSO, S.Q.; PARADELLA, W.R.; MENESES, P.R. Uso da classificação automática de dados do satélite LANDSAT na definição de áreas de ilmenita primária em floresta, Pernambuco. São José dos Campos, INPE, Jan. 1979. (INPE-1415-PEE/003).
- [ 7 ] MOORE, S.L. Geology and Ore Deposits of the Antônio dos Santos, Congo Sôco and Conceição do Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Washington, D.C., 1969. (Geological survey professional paper 341-I)

- [ 8 ] ROWAN, L.C. Near-Infrared Iron Absorption Bands, Application to Geological Mapping and Mineral Exploration. In: Annual Earth Resources Program Review, 4., Houston, Tese., Jan. 17-21, 1972. v. 3, p. 60-1.
- [ 9 ] SIMMONS, G.C. Geology and Iron Deposits of the Western Serra do Curral, Minas Gerais, Brazil. Washington, D.C., 1968 a. (Geological Survey professional paper 341-G).
- [ 10 ] SIMMONS, G.C. Geology and Mineral Resources of the Barão de Coicás Area, Minas Gerais, Brazil. Washington, D.C. 1968 b. (Geological survey professional paper 341-H).
- [ 11 ] VELASCO, F.R.D.; PRADO, L.O.C.; SOUZA, R.C.M. *Sistema MAXVER: manual do usuário*. São José dos Campos, INPE, 1975. (1315-NTI/110)