

# APLICAÇÃO DE MÉTODOS QUANTITATIVOS NA AVALIAÇÃO DE DESCRITORES GEOLÓGICOS PARA INTEGRAÇÃO DE DADOS - ESTUDO DE CASO PARA SEQUÊNCIAS DE *GREENSTONE-BELTS*

ALBANO HENRIQUE DE ARAÚJO <sup>1</sup>  
OSMAR ABÍLIO DE CARVALHO JR. <sup>2</sup>

<sup>1</sup> INFOSAT - Sensoriamento Remoto Ltda.  
SCS - Qd. 01 - Bloco 'B' - Ed. Maristela, sala 1214  
70308-900 - Brasília - DF - Brasil

<sup>2</sup> UnB - Universidade de Brasília - Instituto de Geociências  
Departamento de Geologia Geral e Aplicada  
Campus Universitário - Asa Norte  
70910-900 - Brasília - DF - Brasil

**Abstract:** We present in this paper a study on the techniques and criteria related to integration of geophysical, geological, and remote sensing data. The study areas comprised the *greenstone-belts* sequences of Crixás, Pilar de Goiás, and Guarinos (GO). The study suggest a basic methodology based upon the nature evaluation of the data sets under use. The internal features (inherents to the physical field being measured) of each data set, like the physical property, way of propagation, etc, are considered. They are placed against the external features of the data set. These may include: resolution, data processing, etc. Based on this methodology we selected sets of describing parameters capable of integrating the different data sets under use.

## Resumo

No presente trabalho efetuou-se um estudo sobre o uso de técnicas e critérios de integração de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto. As áreas-alvo compreendem as sequências dos *greenstone-belts* de Crixás, Pilar de Goiás e Guarinos (GO). O trabalho propõe uma metodologia básica que parte da avaliação da natureza dos dados a serem utilizados. Para cada conjunto de dados considera-se os aspectos físicos intrínsecos (inerentes ao próprio tipo de dado), como a resposta física, forma de propagação, entre outros, contrapostos aos seus aspectos extrínsecos (passíveis de serem tratados e modificados), como a resolução, forma de apresentação, tratamento, etc. Baseado nesta metodologia selecionou-se conjuntos de parâmetros descritores que foram compatibilizados, permitindo a realização do processo de integração de dados.

## Objetivos

O presente trabalho objetiva aplicar e avaliar procedimentos de integração de dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto, através de métodos quantitativos. Como linha básica de trabalho

procurou-se desenvolver uma metodologia padrão para escolha e compatibilização dos dados a serem integrados, através de procedimentos estatísticos e matemáticos, possibilitando a obtenção de resultados coerentes e interpretáveis. No nosso caso, busca-se como resultado informações adicionais acerca do arcabouço geológico nas áreas estudadas, pertencentes às sequências do tipo *greenstone-belt* de Pilar de Goiás, Crixás e Guarinos (GO). A metodologia aqui proposta, apesar de desenvolvida para a abordagem de um problema geológico, pode ser adaptada para outros tipos de aplicações, mantendo-se os princípios básicos que norteiam o estudo ora apresentado.

## Crítérios Básicos

Qualquer processo de integração de dados deve levar em conta as naturezas intrínseca e extrínseca de cada conjunto de dados utilizado. Entende-se como natureza intrínseca aqueles fatores que não podem ser modificados, concordantes com as leis físicas que regem a propagação e captação do dado. Como exemplo, os dados gravimétricos dependem da densidade das rochas subjacentes ao ponto de coleta, mas não do tipo de cobertura vegetal ou do valor do campo magnético neste ponto. Em contrapartida, a natureza extrínseca dos dados refere-se a parâmetros

modificáveis e dependentes da forma de coleta e tratamento dos dados. Estariam inclusos neste item a densidade (resolução espacial), a forma de apresentação (perfis, mapas, imagens, etc.) e a possibilidade de aplicação de procedimentos estatísticos, entre outros. Um dos fatores preponderantes no processo de integração de dados é a avaliação da natureza intrínseca apresentada e a busca da sua compatibilização com os demais conjuntos de dados trabalhando a sua natureza extrínseca.

### Análise da Natureza Intrínseca dos Dados

Green & Craig (1984) abordam os fatores que influenciam o processo de integração de dados de naturezas distintas propondo a existência de quatro modelos de dados geológicos, baseados nas características intrínsecas de cada tipo de dado.

O modelo mais simples, denominado modelo de ordem zero (MOZ), assume que para o mesmo tipo de rocha ocorrendo na superfície, a resposta obtida seria sempre a mesma. Este modelo se aplicaria, por exemplo, a mapas geológicos de superfície, onde a mesma rocha relaciona-se sempre à mesma classe no mapa.

O segundo modelo, denominado de modelo de influências proporcionais (MIP), assume que o sensor/observador é influenciado por misturas de rochas no seu campo de visada e responde à soma destas influências, proporcionais às suas áreas. Um exemplo de dado que se encaixa neste modelo é a geoquímica de sedimento de drenagem.

O terceiro modelo, denominado de modelo de influências proporcionais ponderadas pela distância (MID), assume que o sensor/observador está mais influenciado pela massa de rocha adjacente do que pelas rochas mais distantes, de acordo com uma lei de decaimento bem definida. Encaixariam-se neste modelo os dados gravimétricos e magnetométricos.

O quarto modelo, denominado de modelo complexo (MCP), assume que os dados têm uma resposta mais complexa, influenciada por diversos fatores e de formas distintas. Um exemplo seriam os dados TM-Landsat onde o pixel estaria influenciado pelo tipo e densidade da vegetação, poluição atmosférica, elevação, e azimute solar, etc.

A tabela 1 apresenta algumas características inerentes aos conjuntos de dados e a classificação do tipo de dado baseada nos parâmetros de Green & Craig (op.cit.). Esta tabela apresenta um conjunto de parâmetros diretamente relacionados ao problema

geológico. Para aplicações em outras áreas devem ser geradas tabelas específicas com parâmetros referentes ao problema abordado.

Um exemplo de incompatibilidade de tipo de resposta é fornecido pela integração de dados gravimétricos e de sensoriamento remoto. Esta integração mostrará resultados, *a priori*, incoerentes ou não interpretáveis, uma vez que estes dados apresentam naturezas intrínsecas completamente distintas. Os dados TM-Landsat respondem às características da porção superficial do solo, enquanto os dados gravimétricos refletem litótipos e estruturas de sub-superfície e de profundidade.

### Análise da Natureza Extrínseca dos Dados

O objetivo primeiro da análise da natureza extrínseca da resposta apresentada por um conjunto de dados é a definição e viabilização de processos de compatibilização. Inclusos nestes processos estão, por exemplo, a mudança na forma de apresentação, a aplicação de procedimentos de reinterpolação dos dados, a utilização de funções matemáticas que possibilitem melhor visualização e discriminação de comportamentos, a filtragem de componentes, a análise de grupos, entre outros.

A modificação da natureza da resposta apresentada por um conjunto de dados com vistas a sua compatibilização, parte do pressuposto de que haja o entendimento pleno da natureza intrínseca do dado em questão. A partir disso pode-se estruturar procedimentos que permitam a compatibilização dos dados, direcionando-se o trabalho para um objetivo pré-definido.

Como exemplo, Pires (1989) procurou caracterizar seqüências de *greenstone-belts* através da integração de dados magnetométricos e de espectrometria gama. Neste trabalho o autor tentou uma integração direta entre os dois conjuntos de dados utilizando a técnica de análise de grupo G-mode. Em acordo com a abordagem aqui apresentada, esta integração utilizando dados que mostram diferentes tipos de resposta não produziu os resultados esperados. Quando os dados foram analisados simultaneamente, a resposta obtida não foi influenciada pelos dados magnetométricos, que se mostraram inócuos no processo. Diante disto, Pires (op.cit.) aplicou mais um processo de compatibilização dos dados, abandonando os valores originais do campo magnético e passando a utilizar o padrão das anomalias mostrado em superfície. Desta forma distinguiu-se três sub-domínios na área original (Crixás-Itapaci) aos quais foram atribuídos valores numéricos arbitrários.

Retomando o processo de análise de grupo com estes novos parâmetros o autor obteve resultados bem mais representativos.

Outro exemplo é dado por Silva & Veneziani (1988). Estes autores tentaram compatibilizar o uso de dados magnetométricos e de reflectância espectral. Devido ao tipo de resposta distinto destes dados os autores utilizaram a razão 5/1, uma vez que esta razão responde bem a variações no teor de  $Fe^{+2}$  do solo, explorando-se a equivalência deste aspecto em relação à resposta apresentada pela magnetometria. Apesar de relatarem semelhanças entre os perfis comparados, o método só funcionará para locais onde a estrutura subjacente não interfira no comportamento superficial da susceptibilidade magnética ou onde as estruturas sejam verticais ou horizontais. Seria necessário complementar-se o processo com uma filtragem dos dados magnetométricos para ressaltar a componente superficial, comparando-se então o comportamento desta componente com o perfil da razão 5/1.

#### **Estudo de Caso para as Sequências de *Greenstone-Belts* de Pilar de Goiás, Crixás e Guarinos**

Uma das áreas de maior potencial mineral do estado de Goiás está localizada próxima às cidades de Crixás, Pilar de Goiás e Guarinos, sendo representada pelas sequências de *greenstone-belts* homônimas (figura 1). O grande interesse econômico por estas áreas advém das inúmeras mineralizações de ouro, várias delas conhecidas e descritas na literatura e/ou em processo de exploração.

Para estas regiões está disponível um grande conjunto de dados, dentre os quais selecionou-se para o presente trabalho os dados geofísicos de radiometria do PGBC (Projeto Geofísico Brasil-Canadá), os dados de sensoriamento remoto TM-Landsat e os dados geológicos oriundos dos diversos mapeamentos já efetuados.

A escolha deste conjunto de dados subordina-se ao fato de os mesmos apresentarem tipo de resposta superficial, com pouca influência lateral, o que os torna compatíveis em relação a estes aspectos. No entanto, ainda com relação ao tipo de resposta, há uma diferença básica entre os dados geofísicos e de sensoriamento remoto, uma vez que os primeiros são influenciados por parâmetros diversos (vegetação, relevo, etc), enquanto a geofísica não é sensível a estes fatores. Esta diferença está ressaltada na tabela 1 com uma classificação distinta para os dados geofísicos e de sensoriamento remoto (respectivamente, grupos MOZ e MCP).

Outra diferença básica está na resolução espacial dos dados, originalmente de 30x30m para as imagens de satélite e de aproximadamente 250x250m para os dados geofísicos. Para compatibilizar este parâmetro aplicou-se uma reinterpolação dos dados originais para um espaçamento comum de 200x200m. A avaliação do efeito deste procedimento é efetuada aplicando-se os tratamentos estatísticos descritos adiante, tanto sobre as imagens de sensoriamento remoto originais quanto sobre as reinterpoladas.

Um terceiro aspecto de distinção entre os dados utilizados é o formato de apresentação. Enquanto os dados de sensoriamento remoto são apresentados no formato raster (imagens), os dados geofísicos estão disponíveis na forma de mapas de contorno e na forma digital. Já os dados geológicos apresentam-se no formato de mapas de classes (vetorial). Devido à facilidade de visualização proporcionada pelo uso de imagens, optou-se pela rasterização dos dados geofísicos e geológicos.

Um último aspecto que foge ao escopo do presente trabalho é a eliminação de outros parâmetros que afetam o valor da reflectância dos dados de sensoriamento remoto (vegetação, modificações antrópicas, ruídos, etc.), entretanto uma parte da interferência destes parâmetros é amenizada pelo uso das razões de bandas.

#### **Tratamento Inicial dos Dados**

O primeiro passo dado no tratamento dos dados foi a produção das imagens geofísicas e geológicas. Os dados geofísicos utilizados estavam disponíveis na forma digital, em disquetes que continham os dados originais do levantamento geofísico do PGBC. Os valores lidos para a radiometria foram interpolados pelo método de krigagem com varredura por octante gerando-se grades regulares, que foram rasterizadas.

Os dados geológicos foram digitalizados a partir de mapas nas escalas 1:100.000 e 1:50.000, abrangendo as regiões específicas dos *greenstone-belts* de Crixás, Pilar de Goiás e Guarinos. Após a digitalização os mapas foram poligonalizados e rasterizados, gerando as imagens geológicas.

Os dados de sensoriamento remoto foram lidos a partir de fitas cartucho e registrados em relação à carta topográfica da Folha Itapaci (SD-22-Z-A), para eliminar-se as distorções geográficas. Uma vez que não são utilizados processos de análise visual das imagens, não foi aplicado nenhum recurso de realce.

A partir das seis bandas adquiridas foram calculadas as quinze razões possíveis (lembrando-se que para fins de tratamento estatístico a razão A/B equivale à razão B/A).

### Tratamento Estatístico dos Dados

As sete imagens geofísicas, as seis bandas de sensoriamento remoto e as quinze razões entre bandas obtidas para cada área estudada, foram submetidas à comparação com a correspondente imagem geológica. Para quantificar tal comparação utilizou-se o coeficiente de correlação, calculado para todo o conjunto de bandas disponíveis.

As figuras 2, 3 e 4 apresentam o comportamento do coeficiente de correlação entre as bandas utilizadas e a geologia de cada área. Para as bandas de sensoriamento remoto mostra-se os resultados para os dois tipos de imagens utilizadas (com diferentes resoluções espaciais) contrapostos no mesmo gráfico. Por questão de simplicidade, não são mostradas as razões entre bandas que apresentaram um coeficiente de correlação com a geologia próximo de zero.

Os parâmetros que apresentaram maior correlação com a geologia em cada uma das três áreas estudadas foram separados formando um conjunto de dados denominado de *parâmetros descritores*. Para a região de Pilar foram escolhidos como parâmetros descritores as bandas 1, 2, 3, 5 e 7, as razões 2/1, 3/1, 3/2, 4/3, 5/1, 5/2, 5/4, 7/1, 7/2, 7/3 e 7/4, e os dados geofísicos de contagem total, Th, K, U/K e Th/K. Para a região de Guarinos os parâmetros descritores são: bandas 1, 2 e 4, razões 4/1, 4/2, 4/3, 5/1, 5/2 e 5/3, e dados geofísicos de contagem total, K, Th/K, U/Th e U/K. Para o grenstone-belt de Crixás foram escolhidos como parâmetros descritores: bandas 1, 2, 3, 5 e 7, as razões 2/1, 3/1, 3/2, 5/1, 5/2, 5/4, 7/1, 7/2, 7/3 e 7/4, e os dados geofísicos de contagem total, U, Th e K.

O próximo passo no tratamento dos dados foi a aplicação da técnica de análise de grupo do tipo G-mode. Este procedimento estatístico vem sendo usado com bons resultados na integração de dados geológicos [Pires-Harthill (1989)]. O método classifica as amostras de um conjunto de dados em grupos estatisticamente distintos dos que o rodeiam, em função das características dos seus parâmetros descritores analisados simultaneamente. Os parâmetros com altos coeficientes de correlação entre si foram substituídos pela sua primeira componente principal (PC1), diminuindo o tempo consumido no processamento e garantindo a obtenção dos mesmos resultados.

Com este procedimento os parâmetros descritores para Pilar foram reduzidos a  $PC1_{(1,2,3,5,7)}$ ,  $PC1_{(2/1,3/1,3/2,4/3)}$ ,  $PC1_{(7/1,7/2,7/3,7/4)}$ ,  $PC1_{(CT,Th)}$  e  $PC1_{(K,U/K,Th/K)}$ . Para Guarinos foram utilizadas as componentes  $PC1_{(1,2,4)}$ ,  $PC1_{(4/1,4/2,4/3)}$ ,  $PC1_{(5/1,5/2,5/3)}$  e  $PC1_{(CT,K,Th/K,U/Th,U/K)}$ . Na região de Crixás utilizou-se  $PC1_{(1,2,3,5,7)}$ ,  $PC1_{(2/1,3/1,3/2)}$ ,  $PC1_{(5/1,5/2,5/4)}$ ,  $PC1_{(7/1,7/2,7/3,7/4)}$  e  $PC1_{(U,Th,K,CT)}$ .

### Conclusões

A partir da análise dos gráficos apresentados nas figuras 2, 3 e 4 sobressaem-se os seguintes aspectos:

- os coeficientes de correlação médios com a geologia mais elevados são apresentados pelos dados geofísicos (20-40%).
- ocorre um aumento na correlação entre a geologia e os dados de sensoriamento remoto com a diminuição da resolução espacial das imagens TM-Landsat, como resposta ao procedimento de compatibilização dos dados por reinterpolação.
- os valores mais baixos de correlação são mostrados pelas razões entre bandas de sensoriamento remoto.

Fica clara a necessidade da aplicação de processos de compatibilização dos dados como parte fundamental do processo de integração. Os vários procedimentos utilizados mostraram retornos diferenciados. O uso das razões de bandas não ocasionou a esperada compatibilização, o que é indicado pelos coeficientes de correlação mais baixos quando comparados aos das bandas originais e aos dados geofísicos. Isto indica que o uso de razões simples de bandas não elimina de forma eficiente os efeitos que interferem na compatibilização com os dados geológicos. Talvez o uso de razões complexas (razões entre somas e subtrações de bandas), possa mostrar melhores resultados.

A compatibilização da resolução espacial dos dados mostrou, por outro lado, tratar-se de um processo vantajoso dentre os disponíveis para compatibilização. Isto fica bastante claro nos gráficos apresentados, onde observa-se um aumento médio de 25% na correlação entre as bandas de sensoriamento remoto e a geologia após a reinterpolação.

Deve-se ressaltar o grande ganho em termos de tempo computacional e praticidade com a conversão de todos os dados para o formato raster, além do óbvio ganho no que se refere à visualização dos resultados. Outro aspecto positivo nesta compatibilização de formato de apresentação foi a possibilidade de realizar-se cálculos estatísticos entre os diversos conjuntos de dados, abrindo o leque de opções de interpretação que,

de outra forma, estaria limitado a comparações visuais, nem sempre proficuas e raramente seguras.

Com relação ao procedimento de análise de grupo, verificou-se que alguns fatores prejudicaram os resultados obtidos. Os coeficientes de correlação relativamente baixos encontrados entre as bandas e razões de bandas de sensoriamento remoto e a geologia, não trouxeram resultados vantajosos no processo. Outro fator foi a dificuldade em se aplicar o processo sobre todas as amostras disponíveis devido a limitações de *software* e *hardware* disponíveis, uma vez que o processo demanda cálculos estatísticos e matemáticos complexos. Entretanto, a metodologia apresentada permitiu de forma inequívoca selecionar os parâmetros descritores mais adequados para o processo. Deve-se enfatizar que o procedimento adotado possibilitou a escolha dos melhores parâmetros descritores dentre os dados utilizados (dados geofísicos, geológicos e de sensoriamento remoto), o que não implica necessariamente, que sejam os parâmetros mais adequados para o fim desejado. Para melhora dos resultados da análise de grupo seria adequado dispor-se de dados geofísicos com melhor resolução espacial, permitindo a compatibilização com os dados de sensoriamento remoto sem necessidade de diminuição da resolução original destes últimos. Acredita-se, também, que para o exemplo estudado um grande auxílio seria trazido pela introdução dos dados geoquímicos.

A utilização de procedimentos quantitativos de avaliação e compatibilização dos dados, oferece a possibilidade de direcionar-se e aplicar-se com maior critério o processo de integração, gerando-se melhores resultados. Além disso, não se pode negar que sem o auxílio destes parâmetros quantitativos fica muito difícil definir-se adequadamente quais os parâmetros que poderão oferecer maior subsídio à integração. Utilizando-se estes procedimentos pode-se selecionar os parâmetros que oferecem a maior quantidade de informação geológica, submetendo-os às técnicas de realce visual já conhecidas. Além disso, o processo de componentes principais pode ser aplicado com maior critério, reduzindo o número de imagens a ser processadas sem perda da informação original.

A compreensão e utilização do conceito de natureza intrínseca e extrínseca da resposta é a base para qualquer processo de integração que almeje resultados positivos. Enquanto o conhecimento sobre a natureza intrínseca do dado fornece o embasamento necessário para a avaliação física, o domínio sobre a natureza extrínseca da resposta permitirá extrair-se dos

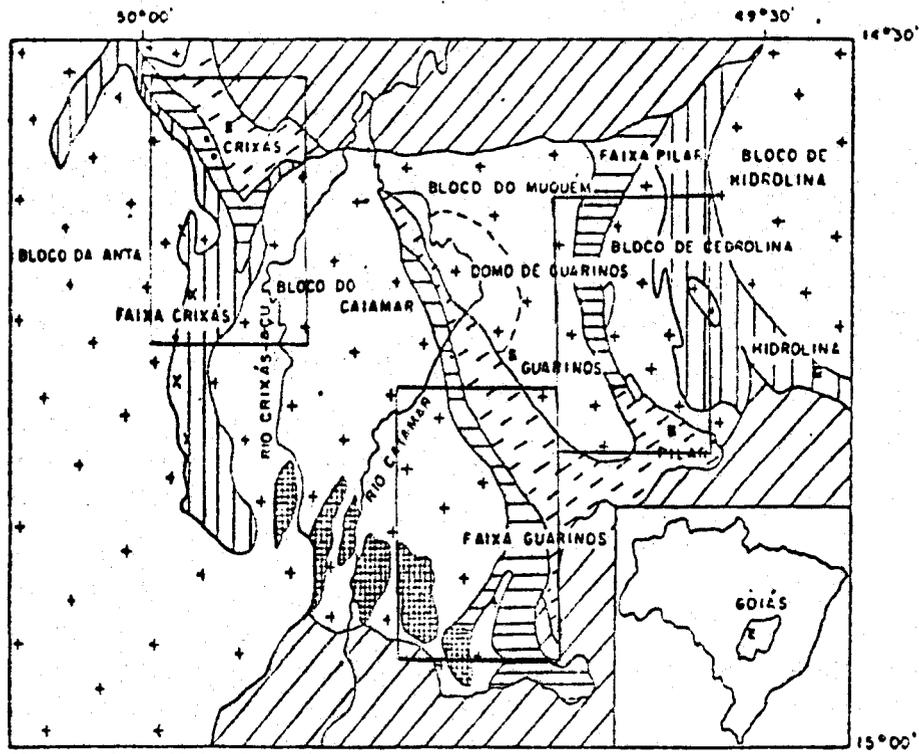
dados a melhor e maior quantidade de informação possível.

### Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos a Augusto César Bittencourt Pires, Hardy Jost, Raul Minas Kuyumjian, Paulo Roberto Menezes e Ana Paula Martins Ferreira.

### Referências Bibliográficas

- A. A. GREEN & M. CRAIG - Integrated Analysis of Image Data for Mineral Exploration. *International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Colorado, 131-137, 1984.
- H. JOST & A. M. OLIVEIRA - Stratigraphy of the Greenstone-Belts of the Crixás Region, Goiás, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 4 (3), 201-214, 1990.
- R. M. KUYUMJIAN - Geologia e Mineralizações Auríferas do Greenstone-Belt da Faixa Crixás (GO). Tese de Mestrado no. 17, IE, Departamento de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, D.F. (inédito), 1981.
- A. C. B. PIRES & N. HARTHILL - Statistical Analysis of Airborne Radiometric Data for geologic mapping purposes: Crixás-Itapaci Area, Goiás, Brazil. *GEOPHYSICS*, 34 (10), 1989.
- A. C. B. PIRES - Statistical Characterization of Greenstone Sequences using Magnetic and Gamma-Ray Spectrometric Data, Guarinos-Pilar de Goiás Area, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 21 (1), 1989.
- S. M. P. SILVA & P. VENEZIANI - Estudos de Técnicas de Integração de Dados para o Mapeamento Geológico na Região de Igaraci (PE). *V Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* - Natal - RN, 1988.



SEGUNDO SABOIA (1979), MODIFICADO DE DANNI E RIBEIRO (1978) E RIBEIRO FILHO (1978).

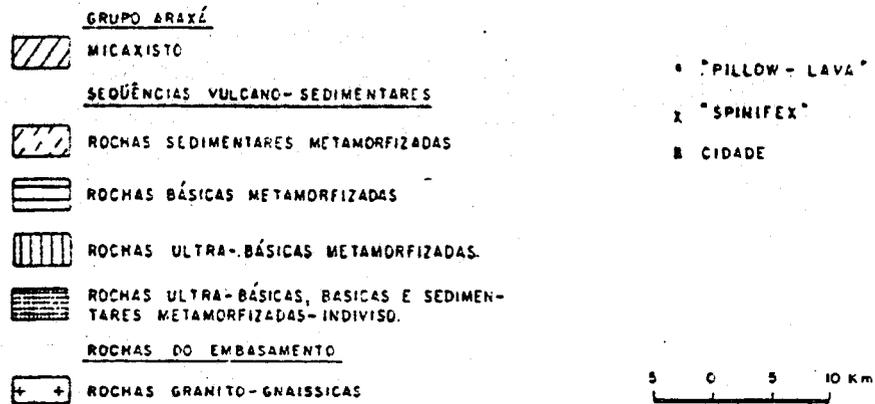


figura 1 - Localização e geologia das áreas estudadas.

Parâmetro	Influência Lateral	Influência Vertical	Tipo de Resposta	Modelo
Gravimetria	Alta	Alta	Profunda - Influenciada pela topografia	MID
Radiometria	Baixa	Baixa	Superficial - Influenciada pelo intemperismo.	MOZ
Magnetometria	Alta	Alta	Profunda - influenciada por zonas de falha.	MID
Geoquímica de Sedimento de Drenagem	Muito Alta	Baixa	Superficial - influenciada pelo relevo, clima, pluviometria, etc.	MIP
Geoquímica de Solo	Média-Baixa	Baixa	Superficial - influenciada pelo intemperismo e solifluxão.	MOZ
Dados TM-Landsat	Baixa	Ausente	Superficial - influenciada por vegetação, relevo, elevação e azimute solar, etc.	MCP
Geologia de Superfície	Ausente	Ausente	Superficial - influenciado pela estruturação de subsuperfície.	MOZ
Topografia	Ausente	Ausente	Superficial - influenciado pela estruturação de subsuperfície.	MCP
Pedologia	Ausente	Ausente	Superficial - influenciada pelo tipo de rocha intemperismo, clima, etc.	MCP
Geobotânica	Ausente	Ausente	Superficial - influenciada pelo tipo de solo, clima, relevo, etc.	MCP

Tabela 1 - tipo e classificação de dados geológicos.

### CRIXÁS

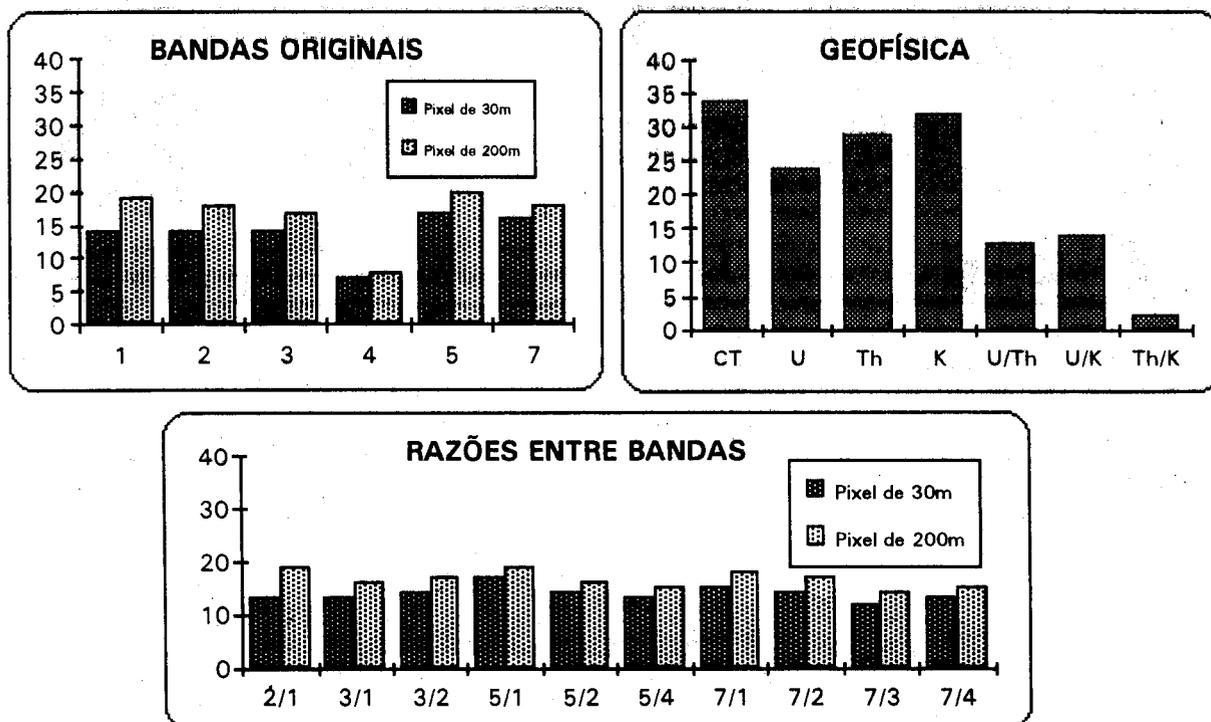


figura 2 - coeficientes de correlação em porcentagem entre os parâmetros descritores selecionados e a geologia a região de Crixás.

### GUARINOS

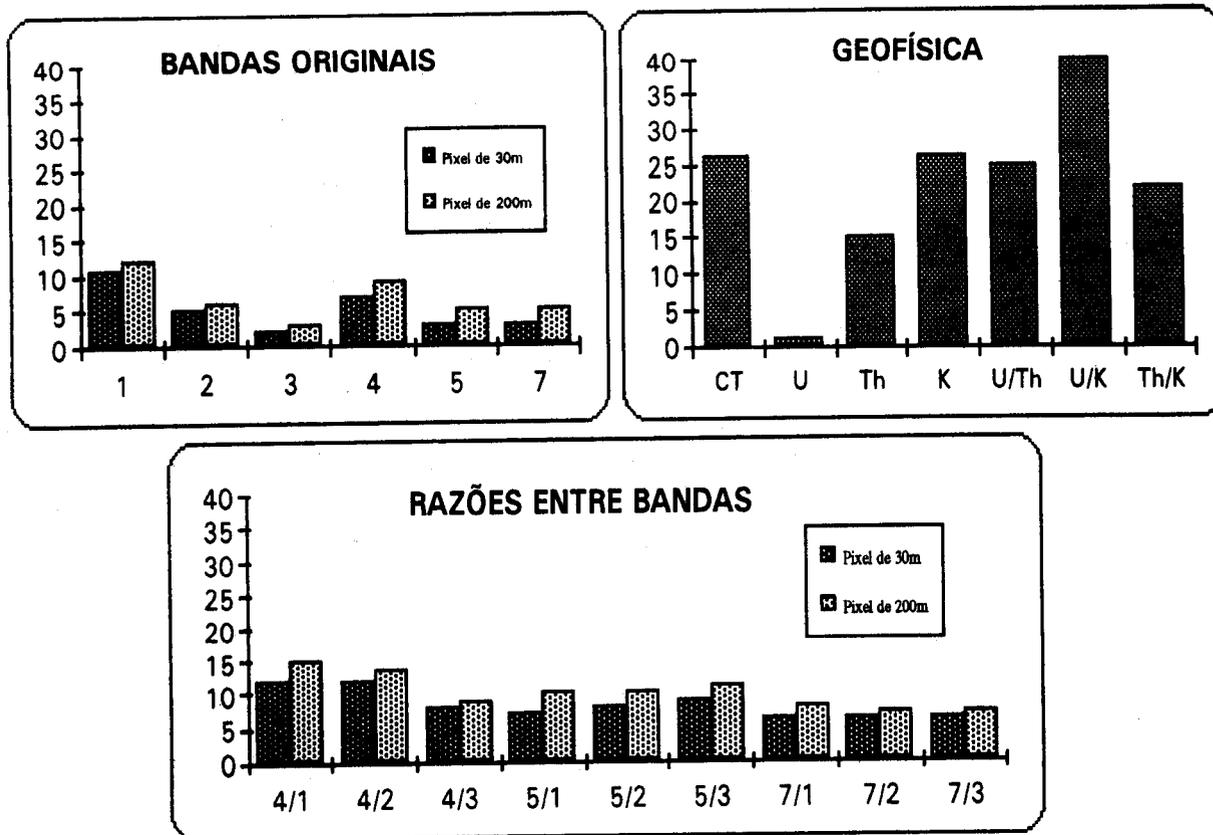


figura 3 - coeficientes de correlação em porcentagem entre os parâmetros descritores selecionados e a geologia a região de Guarinos.

### PILAR DE GOIÁS

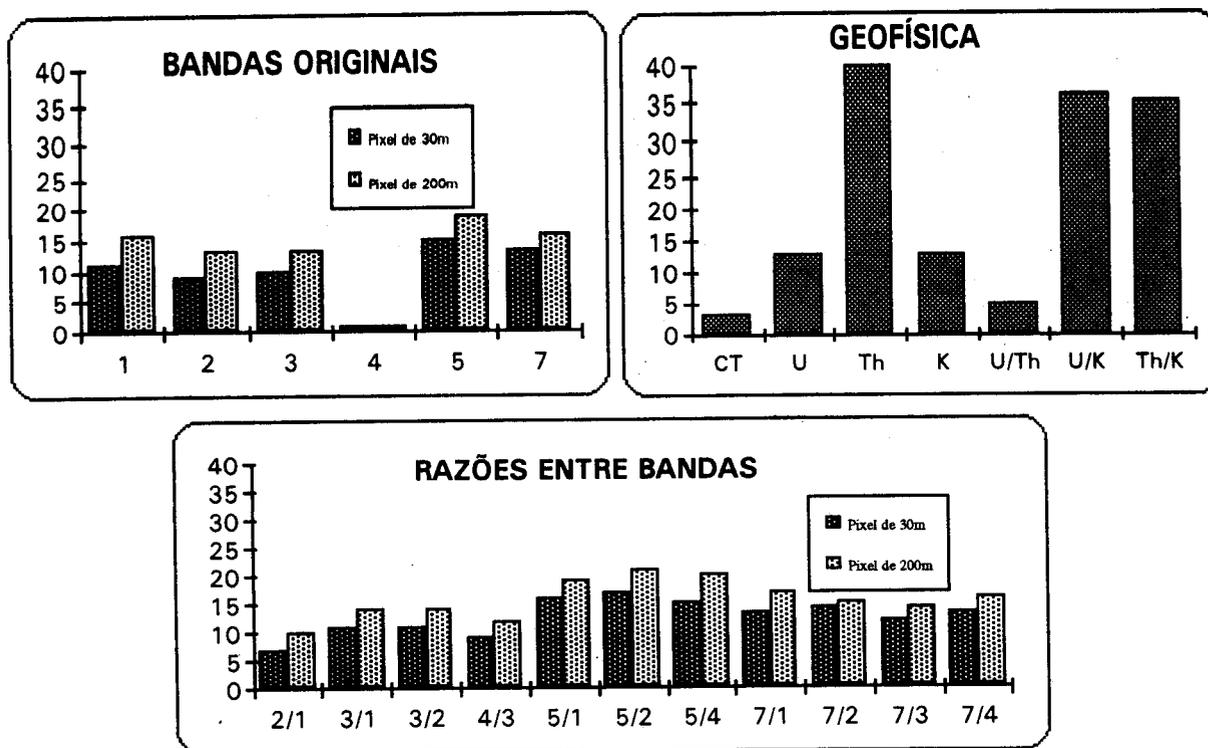


figura 4 - coeficientes de correlação em porcentagem entre os parâmetros descritores selecionados e a geologia a região de Pilar de Goiás.