

**UM BANCO DE DADOS DIGITAIS PARA EXPLORAÇÃO GEOLÓGICA NA FAIXA
MINERALIZADA EM Cu-Zn DO POJUÇA (CARAJÁS), BASEADO EM
DADOS GEOLÓGICOS, GEOQUÍMICOS, DE SENSORES
REMOTOS E DE ELEVAÇÃO**

W.R.PARADELLA (1); C.A.KUSHIGBOR (2); A.G.FABBRI (3)

(1) INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais) - S.J.Campos-SP
Brasil - 12201

(2) Intera Technologies Ltd. - Ottawa-ONT
Canada - K15 5H4

(3) CCRS (Canada Centre for Remote Sensing) - Ottawa-ONT
Canada - K1A 0Y7
(Agora no ITC, 7511 AL Enschede, The Netherlands)

RESUMO

Análises visual e digital de dados de sensores orbitais (MSS e TM LANDSAT e HRV SPOT) tem sido utilizadas com frequência em mapeamento geológico e prospecção mineral de ambientes áridos ou com moderada cobertura vegetal. Para ambientes de floresta tropical contudo, resultados bem sucedidos são raros e tem sido concentrados na exploração dos atributos espaciais destas imagens ou na exploração de contrastes espectrais ligados a variações de biomassa em áreas de lateritas ferruginosas. Todavia, é esperada uma maior contribuição dos sensores remotos para este particular tipo de ambiente quando tais dados puderem ser rotineiramente explorados com outros dados auxiliares, através de um banco de dados corrigidos digitalmente. Integração é aqui considerada a tarefa de registrar diferentes tipos de dados para uma análise sistemática via processamento de imagens. Quando geograficamente referenciados e armazenados em um banco de dados digitais, os vários dados podem ser rapidamente acessados e relações estabelecidas através de modelos exploratórios e de distintas técnicas de análises (realces espectrais e espaciais; classificações temáticas supervisionadas e não supervisionadas; estatística multivariada; operações lógicas com imagens binárias; etc.). Dentro deste contexto, possíveis relacionamentos geobotânicos devem ser também investigados. O trabalho discute vários aspectos da implementação de um banco de dados digitais para exploração geológica regional e de detalhe, em uma área rica em depósitos de sulfetos de cobre no ambiente Amazônico (Faixa Pojuca). O banco de dados é constituído por imagens registradas em UTM, representando dados de sensores remotos (TM LANDSAT), descritores do terreno (imagens de elevação, declividade e aspecto), de geologia (litologias e estruturas) e de geoquímica (teores de amostras de solo dos elementos Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Co, Ni, V, Cu e Zn). Este conjunto múltiplo de dados será usado em abordagens a diferentes resoluções; na comparação de métodos de extração de informações em sensoriamento remoto e no estabelecimento de relações entre as diferentes imagens que possam ser relevantes em termos do conhecimento geológico, de prospecção mineral e estudos ambientais na região.

ABSTRACT

Visual and digital analyses of orbitais RS data (LANDSAT and SPOT) have gained recognition as important tools in geologic mapping and mineral exploration. For tropical rainforest environments however, successful results are still rares and have been concentrated in the exploration of the spatial attribute of these images or having site specific conditions where iron laterites cause changes in biomass which results in spectral contrasts. But perhaps, the greatest contribution in terms of geological exploration for this kind of environment will come when satellite-based RS are routinely explored with others ancillary data through a common digital database approach. Integration is here the task of bringing together information for the systematic analysis of spatially-distributed data by digital image processing. Geological exploration is a hard task and a multidisciplinary challenge in these regions requiring the efficient utilization of all available data (geologic, topographic, geochemical, geophysics, geobotanical, etc.). When geographically referenced and store in a digital database, these data can be readily addressed and relations clarified through exploration models and different analysis techniques (spatial and spectral enhancements, thematic supervised and unsupervised classifications, merged

products, multivariate statistical analysis, etc.). Within this context Background/Spectral Geobotanical inputs must be considered so that the information content can be fully exploited. The paper discusses several aspects of the development of a digital geologic database for regional and detailed exploration in the Pojuca area, Carajás Province. A 230 square kilometre test site was selected centered on the Pojuca Cu-Zn deposit. This region is represented by Archean sequences from medium to high grade metamorphic and volcano-sedimentary rocks with several Cu and Cu-Zn deposits. Above this package are widespread low-grade clastic sediments of early Proterozoic age and Tertiary laterites and Quaternary alluviums. The area is also marked by heterogeneous topography, deep chemical weathering producing thick latosols, little outcrops and a vegetation cover with a complex canopy composed by numerous species. UTM-registered multiple data sets have been constructed which includes TM-LANDSAT images, a DEM represented by images of Elevation, Slope and Aspect, digitized geology and ten planes representing geochemical data from soil samples (Al, Fe, Mg, Mn, Ti, Co, Ni, V, Cu and Zn). The multiple data set will be used for many studies at distinct resolutions, to compare digital processing methods in RS and to extract possible relationships between the different images that can be relevant in terms of geological knowledge, mineral resources and environmental analysis.

1. INTRODUÇÃO

A complexidade dos problemas tratados em investigações geológicas requer observações em diferentes escalas. Obviamente, cada escala de observação deveria estar relacionada, sendo que idealmente, observações megascópicas tendem a fornecer o contexto para direcionar estudos de maior detalhe. Esta sequência, nem sempre é a utilizada em abordagens geológicas clássicas, onde trabalhos de detalhe são conduzidos, antes que os traços regionais estejam consolidados.

Nesta busca de conhecimento, o terreno é observado, medido e registrado segundo diferentes enfoques. Na Geofísica Aplicada, propriedades radiométricas, eletromagnéticas e gravimétricas são medidas temporal e espacialmente. Na Geoquímica, teores são obtidos de diferentes elementos, quer se considere rochas e produtos de alteração, solos, água e vegetais (Biogeoquímica). Em Sensoriamento Remoto, a distância espectral (refletida e/ou emitida) e retroespalhamento (microondas) são registrados do terreno, em muitos casos de modo multitemporal. No campo, observações diretas de litologias, estruturas, solos, etc., são feitas. Como estes níveis de interação com o terreno são amplos, podemos notar que grandes quantidades de dados já estão disponíveis, ou estão sendo ou serão coletados, com características muitas vezes complementares, interrelacionadas, quando não redundantes. Se tais dados puderem ser integrados e analisados de um modo sistemático, não resta dúvida que poderemos entender melhor o problema enfocado e encaminhar soluções mais adequadas com a otimização de recursos.

O termo "integração" engloba todos os procedimentos lógicos que visam agrupar informações registradas para análises sistemáticas. O que se busca em um modelo de integração voltado para prospecção mineral é fornecer procedimentos e técnicas adequadas para que todo o conteúdo de informação disponível possa ser ao máximo explorado, à luz de modelos prospec-

tivos.

Fabbri et al. (1987) discutem com detalhes os vários aspectos de integração de dados auxiliares com os de sensores remotos. Exemplos de integração de dados múltiplos em exploração mineral podem ser vistos em Eliason et al. (1983); Gaál (1988) e em Fabbri e Kushigbor (1989), entre outros.

Como hipótese considera-se no trabalho que é possível reorganizar dados, técnicas e métodos usados comumente em exploração mineral, em modelos computacionais para estabelecer relações e associações de pixels.

Tais pixels representam áreas do terreno sendo exploradas em diferentes níveis (reconhecimento ao detalhe).

Nas discussões seguintes são examinados alguns aspectos gerais, julgados importantes no tocante da implementação de um banco de dados digitais, através de imagens de SR e dados auxiliares, em uma área típica de floresta de "terra firme" da região Amazônica.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para ambientes de florestas tropicais úmidas, a utilização de dados de sensores remotos, particularmente os do espectro visível e infravermelho, na caracterização do substrato geológico, sempre tem sido problemática (Lyon, 1975; Amaral, 1982). Vários fatores tem contribuído para isto. Inicialmente deve ser considerada a extrema complexidade da região. De acordo com Schubart (1986), em um trato de floresta tropical úmida, estão contidas mais espécies biológicas que as presentes nas florestas frias e temperadas do hemisfério norte. Além disto, merecem ser aventadas a menor dependência da vegetação com o fluxo mineral do substrato (Klinge, 1976; Falesi, 1986), a pequena profundidade das raízes e intenso intemperismo, gerando solos extremamente lixiviados. Isto faz com que as variações de espécies e distribuições de comu-

nidades e ecossistemas sejam mais controladas por fatores "físicos" (relevo, capacidade de retenção hídrica do substrato, etc.) que "químicos" do terreno (Velooso et al., 1974; Faleiros, 1986).

Por outro lado devem também ser mencionadas as limitações em resolução dos sensores orbitais em operação. Com os satélites SPOT e LANDSAT, a melhor resolução espacial é da ordem de 10 metros e a melhor resolução espectral é de 50nm , respectivamente. Tais configurações reduzem as possibilidades de sucesso na detecção de possíveis anomalias em vegetação devido a estresses induzidos geoquimicamente, bem como, não permitem investigações ao nível de espécimes. Como consequência, o desafio atual está em adequar as limitações dos sensores às características peculiares do ambiente tropical úmido. Paradella e Bruce (1990) discutem com detalhes este assunto.

Na literatura, trabalhos recentes com dados orbitais na exploração geológica de ambientes com vegetação mais densa, tem dado cada vez mais ênfase em abordagens baseadas em integração de dados múltiplos. Isto é verificável tanto para enfoques mais regionais ("Background Geobotany"), onde imagens orbitais são integradas com descritores do terreno obtidos de modelos digitais de elevação (Hornsby e Bruce, 1986; Hornsby et al. 1988), como na busca de manifestações espectrais no dossel, induzidas geoquimicamente por mineralizações ("Spectral Geobotany"), onde a integração é baseada em dados de sensores orbitais, de geoquímica e análises estatísticas (Banninger 1984; 1985).

A discussão anterior fornece subsídios importantes na concepção de um banco de dados para a região Amazonica. Assim, variações espectrais detectadas nas imagens orbitais, devem ser exploradas mais no contexto de vinculações com propriedades "físicas" que "químicas" do substrato. Cole (1971), Paradella et al. (1989) em trabalhos geobotânicos de ambientes de florestas tropicais, enfatizam a importância da topografia, como fator controlador de variações na cobertura vegetal.

Informações topográficas são normalmente de baixo custo de aquisição, na forma de mapas, fotos aéreas, etc., e disponíveis em formato contínuo que possibilita a digitalização e manipulação por computadores.

Descritores geomorfométricos do terreno, podem ser obtidos de cartas topográficas, através da digitalização de curvas de nível no formato de vetores e geração em imagens ("raster") de DTM ("Digital Terrain Models"). Um DTM é uma representação numérica do terreno, baseado num conjunto de coordenadas ou triplas X, Y e Z. Diferentes tipos de dados podem ser usados para gerar um DTM (geofísicos, geoquímicos, fotogramétricos, etc.). Quando os dados são referentes à topografia, o termo DEM ("Digital Elevation Model") tem sido mais empregado, sendo a elevação, em um ponto de coordenadas planares X e Y, o valor de Z naquele ponto.

Os descritores obtidos de DEM incluem normalmente imagens digitais representando medidas de elevação, declividade e aspecto. Elevação é essencialmente um valor puntual instantâneo. Em um DEM, cada valor de elevação representa uma unidade básica de análise e é portanto, análogo ao valor de radiância do pixel da imagem de SR. Declividade e aspecto representam matematicamente, as derivadas verticais e horizontais da elevação em um ponto. Em outras palavras, declividade é simplesmente a direção do fluxo de drenagem do ponto de elevação considerado, sendo geralmente expressa em valores de graus (0 a 90). Aspecto por sua vez, é o componente direcional da declividade e é representado em ângulos azimutais. Como em uma imagem de aspecto os efeitos são distintos em termos de magnitude da elevação e declividade (10 graus está mais próximo de 360 que 30 graus por exemplo), sua interpretação é mais complexa e deve ser discutida isoladamente dos outros dois tipos de medidas.

Alguns autores como Franklin (1985) entre outros, têm usado adicionalmente outros descritores do terreno derivados de DEM como convexidade local (taxa de mudança da declividade ou a segunda derivada da elevação) ou relevo (desvio padrão da elevação) no mapeamento e caracterização de classes do terreno.

Várias são as vantagens de se integrar dados de DEM com os de SR. Geralmente, nas unidades de paisagem é forte o componente de formas do terreno. Tais unidades não podem ser distinguidas somente por dados espectrais, i. é, mais informações são necessárias (Story et al., 1976; Hutchinson, 1978). Outra razão seria a necessidade de se reduzir confusões de padrões espectrais devido a efeitos de "sombreamentos" de pixels que mascaram diferenças de respostas entre classes. Por último, os dados de DEM fornecem uma base consistente para a avaliação da influência dos componentes da topografia nas respostas espectrais detectadas.

Uma análise bibliográfica sobre enfoques metodológicos usados em trabalhos integrando dados de DEM com os de SR, mostra que classificações temáticas supervisionadas tem sido usadas quase que exclusivamente, quer em mapeamentos de florestas (Fleming e Hoffer, 1979; Frank, 1988); quer em mapeamentos de classes do terreno (Hutchinson, 1978; Saterwhite et al., 1984; Franklin, 1985) ou em abordagens geobotânicas regionais (Hornsby e Bruce, 1986).

A pouca disponibilidade de dados de campo, como mapas de cobertura vegetal/ecossistemas, etc., para o ambiente Amazônico, não favorece o uso de esquemas classificatórios supervisionados. Assim, a análise dos dados de SR e de DEM deve ser apoiada, em grande parte, em realces digitais (análise visual) e classificações não supervisionadas (p.ex. "clustering").

O método de análise proposto aqui é baseado, em grande parte, em processamento de imagens: um número de imagens digitais, representando diferentes fontes de dados (SR, topografia, geoquímica, geologia, etc.) e manipulado e produz informações geograficamente referenciadas.

das sobre propriedades do terreno, de interesse na exploração.

Exemplos da aplicação de processamento de imagens de dados de SR e de dados auxiliares podem ser vistas em Gaál (1988).

Inicialmente, a tecnologia de processamento de imagens forneceu as ferramentas básicas para o desenvolvimento de aplicações geológicas de dados de sensores remotos no formato digital. Com o surgimento de Sistemas de Informações Geográficas-SIG, a ênfase tem migrado do uso de dados auxiliares/geográficos no suporte às análises de sensores remotos, para o uso dos dados de sensores remotos como mais um "input" nos dados disponíveis, dentro da filosofia de implantação de um banco de dados georreferenciados. (Aronoff e Parliament, 1987).

Processamento de imagens e sistemas de informações geográficas são capazes de uma grande quantidade de operações de análises e manipulações de dados, com muito maior eficiência quando atuando em conjunto que separadamente.

Esquemas de processamento de imagens são comumente usados para tratar dados no formato "rastrer" gerando ou novas imagens para interpretação visual (realces digitais) ou mapas temáticos generalizados via classificadores (classificação temática). Tais esquemas foram concebidos primariamente para a extração pura e simples de informação relacionada geograficamente.

Quando usados no contexto de integração de dados, tais esquemas passam a servir agora para fins de tomadas de decisão. As análises tendem então a enfatizar a identificação de relacionamentos intra e entre diferentes dados, a considerar a distribuição geográfica destes conjuntos de dados e por fim possibilitam tomadas de decisão.

A participação do especialista (geólogo, geoquímico, botânico, etc.) é fundamental no sistema, principalmente na aferição das interpretações provenientes dos sensores remotos. Este esforço pode ser caracterizado como tendo um componente de extração de informação e um componente de integração. Quanto mais a análise se apoia na integração mais próxima é a interação do especialista com o sistema. Para que este esforço possa ser bem coordenado é fundamental que os diversos especialistas participem ativamente na concepção da modelagem e tenham uma cultura mínima em tratamento digital e em sistema de informações geográficas.

No que se refere aos dados de SR, uma expectativa favorável é esperada do uso de imagens "divisão" ("ratio") para ambientes como o Amazônico. Divisões são importantes por atenuarem diferenças espectrais nas cenas relacionadas com variações topográficas, isto é, tendem a fornecer um dado espectral mais "puro". Além disto, podem ser usadas como diagnósticos de propriedades da cobertura vegetal via índices vegetativos (TM3/TM4 para biomassa; TM5/TM7 para estresse hídrico, etc.). Um aspecto que merece investigação reside na influência da estratificação e do sombreamento nas divisões, que po-

dem apresentar comportamentos distintos aos observados em regiões frias e temperadas, particularmente com as divisões entre bandas Infravermelho/visível (TM4/3 p.ex.). Resultados preliminares obtidos com estes tipos de realces na área de Pojuca (Paradella et al., 1989), atestam a importância de divisões simples e complexas como técnica básica para estudos de relações geobotânicas regionais.

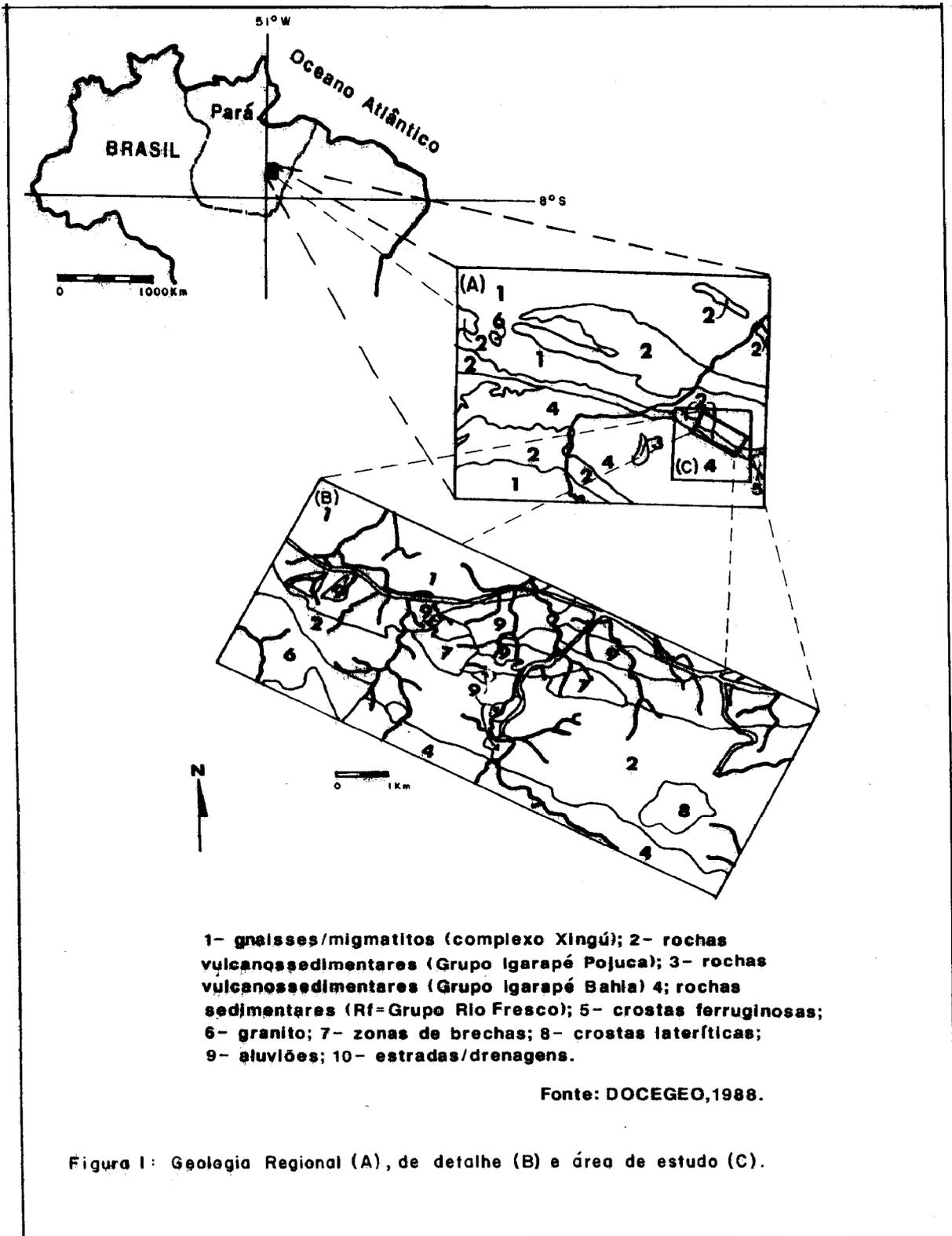
Em síntese, na concepção do banco de dados digitais do trabalho, algumas premissas foram consideradas: 1) foi assumida a suposição de que é possível reorganizar dados, técnicas e métodos de avaliação usados em exploração geológica e prospecção mineral, em modelos computacionais para estabelecer associações entre pixels no terreno com características similares; 2) o banco de dados tem uma forte conotação de ser apoiado em dados de SR, integrados com dados auxiliares; 3) a análise dos dados corrigidos é em grande parte, dependente de processamento digital de imagens; 4) o papel do ambiente e principalmente da cobertura vegetal é enfatizado; 5) descritores geomorfométricos do terreno obtidos de DEM são explorados, quer como fonte de dados básicos, quer como parâmetros controladores importantes da distribuição de vegetação no ambiente tropical; 6) modelos geobotânicos devem ser testados, sendo que Geobotânica Regional tende a ser mais eficiente do que Geobotânica Espectral; 7) técnicas de divisões de bandas ("rattios" simples e complexos) são importantes na fase de tratamento digital de imagens de SR; 8) é imprescindível uma atuação sincronizada dos vários especialistas na abordagem.

3. A ÁREA DE ESTUDO

Como área de pesquisa, foi selecionada uma subcena do TM-LANDSAT com 512 x 512 pixels (aproximadamente 236km²), centrada sobre o acampamento principal da DOCEGEO de pesquisa dos depósitos de Cu-Zn da faixa Pojuca (Figura 1). A área está situada no flanco norte da serra nina dos Carajás, e tem recebido atenção de programas de exploratórios desde 1975, quando pesquisas dirigidas à procura de minérios de Mn, indicaram fortes anomalias de Cu na região. Programas de sondagens, apoiados em geoquímica e geofísica, comprovaram a existência de corpos mineralizados em praticamente toda a área e a partir de 1982, as atividades de pesquisas foram concentradas no SE da região (corpo Pojuca 4E) devido à presença de sulfetos maciços de Cu-Zn.

3.1 - MODELOS GEOLÓGICOS E BOTÂNICOS

Rochas predominantemente gnáissicas, às vezes migmatizadas, tidas como consequência de retrabalhamento metamórfico sobre terrenos graníticos Arqueanos, constituem a unidade mais antiga conhecida como Complexo Xingu (Silva et al., 1974) e estendem-se pela metade NE da área teste.



Em discordância estrutural sobre este em basamento, ocorre uma sequência vulcanossedimentar Arqueana, de fácies xisto verde a anfibolito, com marcado trend WNW e mergulhos fortes para SSW (Medeiros Neto e Villas, 1985). A esta sequência tem sido proposta a denominação de Grupo Igarapé Pojuca, integrando o Super Grupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988). São rochas vulcânicas básicas a intermediárias, intrusivas, intercaladas com sedimentos clásticos e químicos, hospedeiros das mineralizações de Cu-Zn. Granitos anorogênicos, metabasos e metadiabásios, cortam a unidade, que está em contato com um pacote de metassedimentos em sua borda sul, de posição estratigráfica indefinida (Figura 1, mapa geológico de detalhe).

Capeando o Grupo Pojuca, em contato brusco, ocorre uma sequência de sedimentos de baixo grau metamórfico, de caráter transgressivo, que se estende pela metade SW da área teste. Tais sedimentos são grosseiros na base e gradam para siltitos e tipos mais químicos no topo e são relacionados regionalmente com o Grupo Rio Fresco (Cunha et al., 1984). Aluviões, depósitos de areia e arenitos impuros recobrem as áreas mais arrasadas das unidades anteriores. No extremo SE, nos domínios do Grupo Pojuca, em relevo de platô, uma extensa cobertura laterítica foi individualizada como unidade de mapeamento.

A mineralização de Cu-Zn do corpo 4 corresponde a sulfetos disseminados a tipos maciços, sendo já cubadas 48 milhões de toneladas de minério de cobre a 0,90% e 8,6 milhões de toneladas de minério de zinco a 1% (Sauer, 1988).

Na área teste, os solos são profundos, atingindo até 30 metros na mineralização 4E. Segundo Moura (1982) existem correlações estatísticas significativas entre as propriedades químicas dos horizontes superficiais dos solos com o substrato litológico, apesar do grande perfil de alteração.

Do ponto de vista de cobertura vegetal, três regiões ecológicas são reconhecidas na área teste, segundo Veloso et al. (1974): 1) Região de Floresta Tropical Densa (Grupo Rio Fresco); 2) Região de Floresta Tropical Densa com Floresta Aberta Latifoliada (Grupo Pojuca/Complexo Xingu) e 3) Região de Floresta Mista combinada com Floresta Aberta (Grupo Pojuca/parte do Complexo Xingu). Verificações preliminares de campo (Paradella et al., 1990), indicam que a fisionomia da cobertura vegetal, particularmente variações de estratificação, seguida por densidade de recobrimento e flora, são os parâmetros controladores de variações de respostas espectrais detectadas em imagens TM-LANDSAT. Além disto, elevação e declividade são controles primários de variações em comunidades vegetais na área teste.

4. O CONJUNTO DE DADOS

Na Figura 2 são mostrados esquematicamente

os relacionamentos entre os cinco níveis de dados já integrados e que constituem o Banco de Dados Digitais para a área teste. Dados SPOT (pancromático e multispectral) estão em fase inicial de integração e dados de levantamentos aeromagnéticos estão sendo adquiridos para futura integração.

O banco de dados discutido neste texto foi construído pelos autores no Canada Centre for Remote Sensing, em Ottawa, Canadá, através do Sistema LDIAS (LANDSAT DIGITAL IMAGE ANALYSIS SYSTEM), com um SIG baseado em estações de trabalho INTERGRAPH. Maiores detalhes sobre o LDIAS podem ser encontrados em Goodenough e Menard (1988).

A seguir serão discutidos cada um dos diferentes níveis de informações que compõem a base de dados de Pojuca.

4.1 - IMAGENS DE SR (NÍVEL 1)

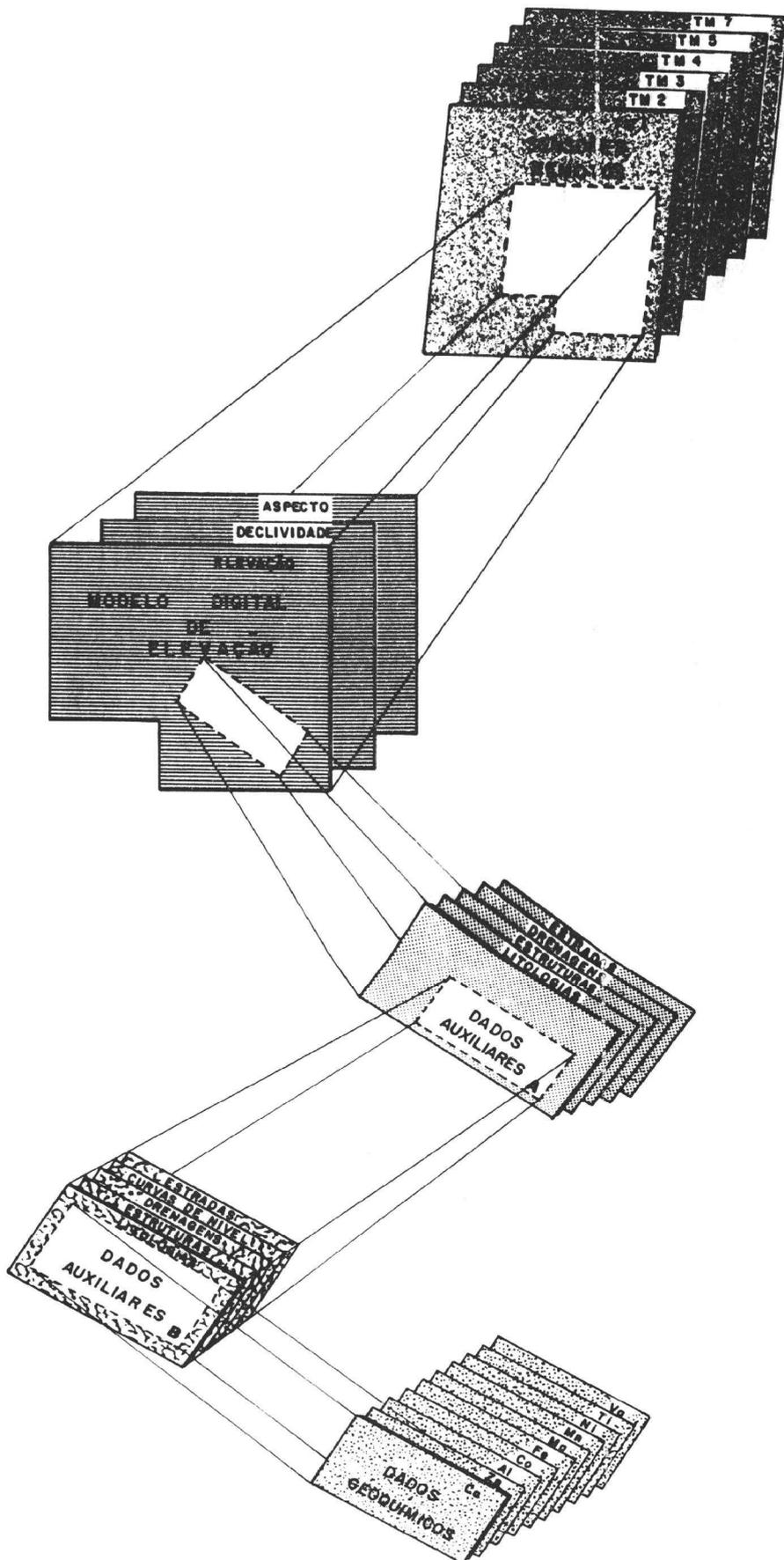
Fitas magnéticas das 6 bandas refletidas do TM-LANDSAT 5, referentes ao Quadrante C, órbita 224/ponto 64, de 31 de maio de 1984 (elevação de 46 graus; azimute de 50 graus) foram selecionadas para os propósitos da integração.

A escolha desta cena merece discussão. A fim de se evitar os efeitos de atividade antrópica, principalmente ligada aos projetos de mineração, a escolha restringiu-se a melhor passagem de 1984, no início de operação do TM-LANDSAT.

Um total de 50 pontos de controle foram selecionados das cartas topográficas 1:100.000 do IBGE e do SGE/ME (Folhas Serra dos Carajás, Rio Cinzento e Caldeirão) e do mapa geológico 1:10.000 da DOCEGEO. Tais pontos serviram de base planimétrica e foram identificados na cena na LANDSAT, através dos sistemas LDIAS e INTERGRAPH.

A escolha e localização dos pontos de controle planimétrico demandou muito tempo, devido às dificuldades de identificação nas imagens, dos pontos de apoio escolhidos das cartas, em face da densa cobertura vegetal. Em função disto, a amostragem teve que ser concentrada ao longo das estradas dos projetos de mineração e nas confluências das drenagens principais da Bacia do Itacaiúnas. Realces de Contrastes por Equalização de Frequência em imagens originais e divisões de bandas TM foram fundamentais para enfatizar detalhes nas estradas e drenagens, possibilitando a localização dos pontos com maior segurança.

Os pontos selecionados foram então usados para estimar uma equação de transformação de primeira ordem (Afim geral) relacionando valores UTM (N e E) com linhas e colunas de pixels LANDSAT. Esta transformação retificou a cena LANDSAT a uma grade de 30 metros. Para a amostragem dos pixels ao novo sistema de coordenadas foram testadas várias opções e escolhidos dois interpoladores: (1) vizinho mais próximo e (2) bi-linear.



NÍVEL 1: DADOS DE SR

Bandas TM-LANDSAT

1,2,3,4,5 e 7 originais corrigidas geometricamente (UTM) com interpolações bi-linear e vizinho mais próximo.

NÍVEL 2: DADOS TOPOGRÁFICOS

Modelo digital de elevação: imagens de elevação, declividade e aspecto geradas a partir de cartas topográficas 1:100.000 e registradas com imagens do nível 1.

NÍVEL 3: DADOS AUXILIARES A

Litologia/Estrutura, drenagens, estradas. Estradas digitalizadas de mapas na escala de 1:10.000 e corrigidos com os níveis anteriores.

NÍVEL 4: DADOS AUXILIARES B

Litologia/Estrutura, drenagens, estradas e curvas de nível digitalizadas de mapas na escala de 1:5.000 e corrigidos com os níveis anteriores.

NÍVEL 5: DADOS GEOQUÍMICOS

Imagens digitais de teores para 10 elementos obtidos de Análise química de amostras de horizonte superficial de solos ao longo de malha original de 100x100 metros.

Fig. 2 - Esquema do Banco de Dados para a área Pojuca.

O exame dos erros médios residuais da equação de transformação indicou uma acurácia ao redor de 30 metros. A Figura 3 mostra a localização dos pontos de apoio e a distribuição de isolinhas de erros médios (em metros) para a área corrigida geometricamente (coordenadas em UTM).

Assim foram geradas para o nível 1 do Banco de Dados, 2 conjuntos de Imagens TM-LANDSAT (TM 1, 2, 3, 4, 5 e 7) corrigidas geometricamente com interpolação bi-linear e vizinho mais próximo e resolução espacial de 30 metros. A área coberta pelas imagens (4114x3571 pixels) corresponde em coordenadas UTM a:

ESTE	NORTE	
508600	9413000	canto superior esquerdo
632000	9305900	canto inferior direito

4.2 - MODELO DIGITAL DE ELEVACÃO (NÍVEL 2)

Dados topográficos correspondentes a grande parte do Quadrante TM-LANDSAT anterior, na forma de curvas de nível e valores pontuais de elevação, foram manualmente digitalizados das cartas topográficas 1:100.000 do IBGE (Folha Serra dos Carajás) e do SGE/ME (Folhas Caldeirão e Rio Cinzento) em uma estação de trabalho Interact-100 (INTERGRAPH) do LDIAS.

Os dados na forma vetorial foram então convertidos para formato "raster" através do programa CONGRD, com resolução de 30 metros. Uma filtragem passa-baixa foi aplicada para minimizar efeitos de ruídos na imagem de elevação e calculadas então declividade e aspecto através do programa GRDSLPL. Maiores detalhes sobre estes algoritmos podem ser vistos na seção DTM, do manual do usuário do sistema INTERGRAPH (INTERGRAPH, 1987).

As imagens geradas foram então linearmente comprimidas para 8 bits (0-256 níveis digitais) e registradas em fitas magnéticas. Desta forma foi construído o nível 2 do Banco de Dados, com 3 imagens de 30 metros de resolução espacial, representando elevação, declividade e aspecto, corrigidas com os dados do nível anterior.

A área coberta pelo DEM de Pojuca corresponde a 1235 x 1315 pixels, cujas coordenadas UTM são:

ESTE	NORTE	
539790	9369190	canto superior esquerdo
576840	9329740	canto inferior direito

Cabe por último destacar que as áreas cobertas pelos níveis 1 e 2 são bem maiores que a sub-área de 236km² da Faixa Pojuca. A construção de um conjunto de dados de SR e DEM cobrindo a grande extensão da borda norte da Serra dos Carajás, objetiva a continuidade futura de trabalhos na região, onde se buscará a integração da Faixa Pojuca, com a área cuprifera à NW, conhecida como Faixa Salobo.

Na Figura 4 são mostradas as imagens de

elevação, declividade e aspecto para a sub-área de Pojuca, obtida do DEM regional.

4.3 - DADOS AUXILIARES A (NÍVEL 3)

Este nível abrange as informações extraídas do mapa geológico da DOCEGEO na escala 1:10.000, relativo a área do Pojuca. Foram digitalizadas e registradas em coordenadas UTM informações de litologia (polígonos representando as unidades canga laterítica, aluviões, zonas de brecha, granitóides, meta-arenitos/siltitos, sequência Pojuca e complexo Xingu), estruturas (linhas e segmentos de retas representando falhas/falhas prováveis); estradas (linhas representando vias de acesso principais e secundárias) e cursos de drenagens (linhas relativas a rios e riachos).

Todo o trabalho foi desenvolvido no ambiente INTERGRAPH com o SIG associado e o procedimento seguido foi: 1) registro do mapa geológico em UTM através de pontos de controle; 2) digitalização dos temas constantes no mapa em arquivos independentes por tema (rotina IGDS); 3) detecção de erros da digitalização e conversão dos temas corrigidos em polígonos fechados usando o pacote SPATIAL EDITOR; 4) ainda usando o pacote anterior, os temas foram transformados no que é conhecido como formas complexas e referenciadas a base de dados específicos (rotinas DMRS); 5) as formas complexas foram finalmente "rasterizadas" para criarem então imagens. O pacote INTERGRAPH usado foi o GRID DATA UTILITY; 6) as imagens ("raster") no formato INTERGRAPH foram convertidas em imagens no formato CCRS e posteriormente gravadas em formato padrão internacional de dados TM-LANDSAT.

4.4 - DADOS AUXILIARES B (NÍVEL 4)

Neste nível foram agrupados todos os dados provenientes de duas fontes: mapa geológico detalhado (1:5.000) da área Pojuca 4E (DOCEGEO) e litologias apresentadas no trabalho de Moura (1982).

Em relação a primeira fonte de dados, foram digitalizados e corrigidos em UTM os temas litológicos (aluviões, meta-arenitos/siltitos, metavulcânicas I, metassedimentos clástico-químicos metavulcânicas II), estruturas (falhas), estradas, drenagens e linhas de contorno para elevação. Já do segundo mapa foram digitalizados polígonos referentes aos temas litológicos (aluviões, rochas básicas, metassedimentos, anfíbolio-xístos, rochas antofiliticas/cordieríticas).

Os procedimentos seguidos foram os mesmos discutidos no nível anterior.

4.5 - DADOS GEOQUÍMICOS (NÍVEL 5)

Neste nível foram agrupados os dados geoquímicos apresentados por Moura (1982). Refere-se a trabalhos de amostragens geoquímicos

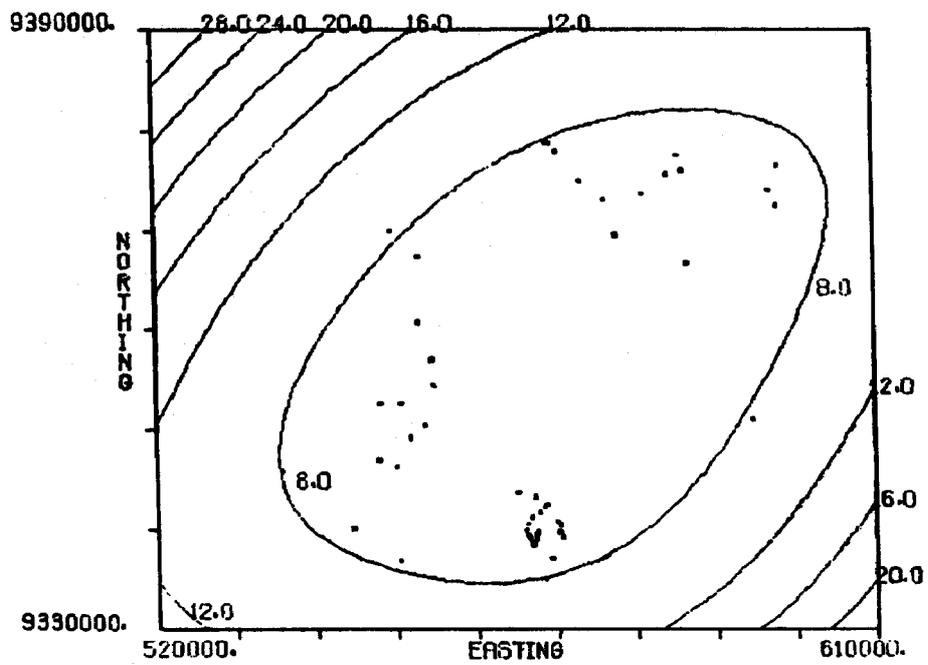
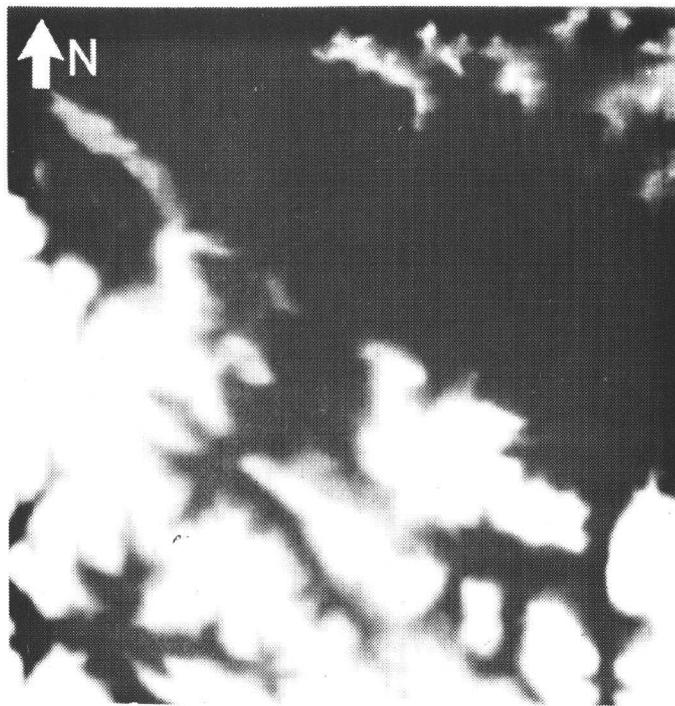
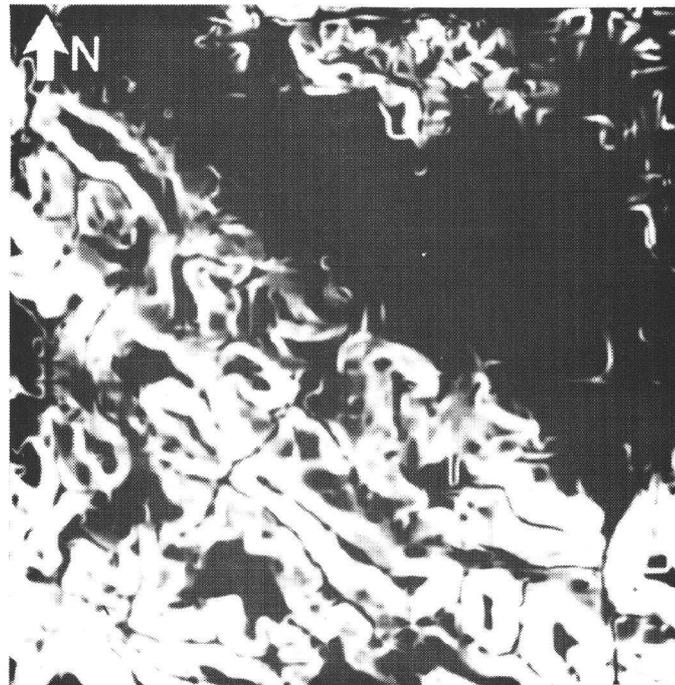


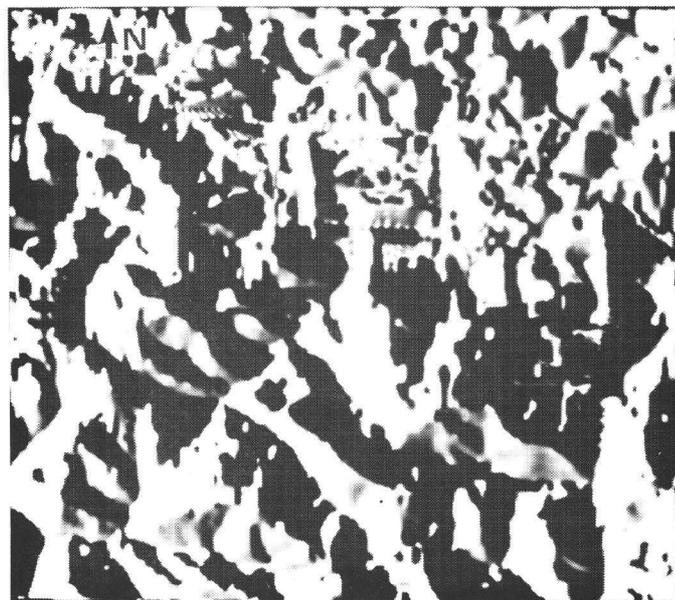
Fig. 3 - Distribuição dos pontos de controle na área e isolinhas de erro em metros (coordenadas UTM).



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 - Imagens de elevação (a); declividade (b) e aspecto (c) para a área Pojuca obtida do DEM retil. nal.

do corpo Pojuca 4E, consistindo de 171 amostras de solos coletadas a 40cm de profundidade, numa área de aproximadamente 2km². A distância entre os pontos de coleta foi de 100 metros, em malha quadrática, ao longo de 19 perfis transversais a linha base C4-00, de direção N36W. As amostras de solos foram analisadas para 10 elementos químicos (Fe, Al, Mg, Mn, Ti, Ni, Co, V, Cu e Zn).

Na construção deste nível, as fases foram: 1) traçado da linha base segundo pontos de controle presentes no mapa geológico 1:5.000 do nível anterior; 2) traçado de linhas transversais a linha base, paralelas entre si e com espaçamento de 100 metros, com a consequente criação da grade de amostragem geológica no formato INTERGRAPH e registrada em UTM (rotina IGDS); 3) detecção de erros de digitalização e conversão de cada polígono (100 x 100 metros) em forma complexa. Ao polígono, representando um centro de amostragem, foi atribuído 10 valores, correspondentes aos valores geoquímicos medidos por elemento para aquele ponto, através da rotina DMRS; 4) "rasterização" de cada um destes planos a resolução espacial de 1m x 1m (o procedimento de transformar cada célula de 100 x 100 metros em 10.000 células de 1 x 1m foi necessário para que no processo de "rasterização" não houvesse deslocamento dos pontos e os limites fossem mantidos. Assim a regra de decisão, para atribuir um valor em uma região de fronteira entre pixels, foi o maior número de células unitárias de 1 x 1 metro); 5) as imagens obtidas ("INTERGRAPH RASTER") foram então reamostradas para 10 metros e posteriormente para 30 metros usando o interpolador por vizinho mais próximo no ambiente LDIAS. Finalmente as imagens foram gravadas em fitas magnéticas em padrão internacional.

Cabe salientar que em cada fase do processo eram extraídos histogramas, valores de média e desvios padrões para comparação com os valores originais, assegurando-se assim a validade das transformações.

As Figuras 5 e 6 ilustram as discussões anteriores relativas a digitalização e construção dos diferentes níveis do Banco de Dados de Pojuca.

5. CONCLUSÕES

Esta contribuição é limitada a descrição do Banco de Dados implementado para a área Pojuca, na Serra dos Carajás. Alguns resultados parciais com o uso destes dados tem sido apresentados na literatura, estando restritos ainda a abordagens geobotânicas regionais, via uso integrado de imagens de SR e DEM (Paradella et al. 1989; Paradella et al. 1990).

Cogita-se da ampliação do Banco através das fases: 1) fotointerpretação regional do Quadrante TM-LANDSAT para caracterização de blocos crustais e faixas de cisalhamentos visando modelos evolutivos regionais; 2) interpretação visual de pares estereoscópicos pan-cromáticos referentes ao recobrimento da

PROSPEC (escala 1:40.000) com o objetivo de extrapolar o conhecimento geológico atualmente disponível (Nível 3) para toda a sub-área Pojuca; 3) integração de dados geofísicos aerofotados e de detalhe e 4) integração de dados do SPOT.

Com a implementação e a ampliação do acervo de dados para a área, inúmeras abordagens poderão ser mais facilmente viabilizadas no futuro, incluindo campos diversos como avaliações de sistemas sensores projetados (p. ex. RADARSAT, ERS-1, JERS, etc.); desenvolvimento e teste de metodologias para extração de informações digitais em ambiente tropical densamente florestado; desenvolvimento e teste de modelos exploratórios em prospecção mineral baseada em análises estatísticas multivariadas, processamento de imagens (dados de SR + auxiliares), sistemas especialistas; estudos de impacto ambiental ligado aos empreendimentos de mineração; etc..

Cabe por último salientar que um grande esforço será dirigido, a curto prazo, na manipulação dos dados geoquímicos já corrigidos. Moura (1982) aplicou tratamento estatístico multivariante em dados geoquímicos de solos na discriminação litológica da área 4E de Pojuca. Análise Discriminante e "clustering" permitiram ao autor identificar oito grupos de solos geoquimicamente homogêneos e estreitamente relacionados com as litologias subjacentes. Os mesmos dados analíticos deste trabalho foram integrados digitalmente no Banco de Dados e constituem o nível 5. Tais dados serão analisados agora visando examinar melhor suas propriedades intrínsecas e consistência da transformação digital operada. A fase posterior será investigar se a cobertura vegetal (via resposta espectral de SR), manifesta relacionamento direto com os dados geoquímicos dos solos e com a litologia subjacente, em um teste de "Geobotânica Espectral".

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi conduzida com apoio do CCRS/INPE e parcialmente financiada pelo CNPq, num programa de pós-doutorado do autor principal (processo número 20.0817/87.6).

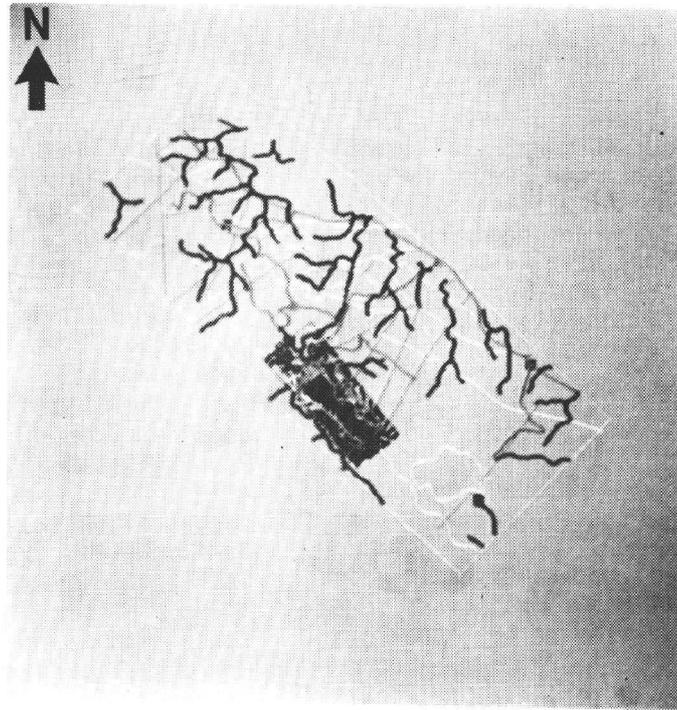


Fig. 5 - Níveis 3, 4 e 5 de dados. Retângulo maior = nível 3; retângulo intermediário em negro = nível 4; no interior deste, em retângulo claro = nível 5. (maior eixo N36W).

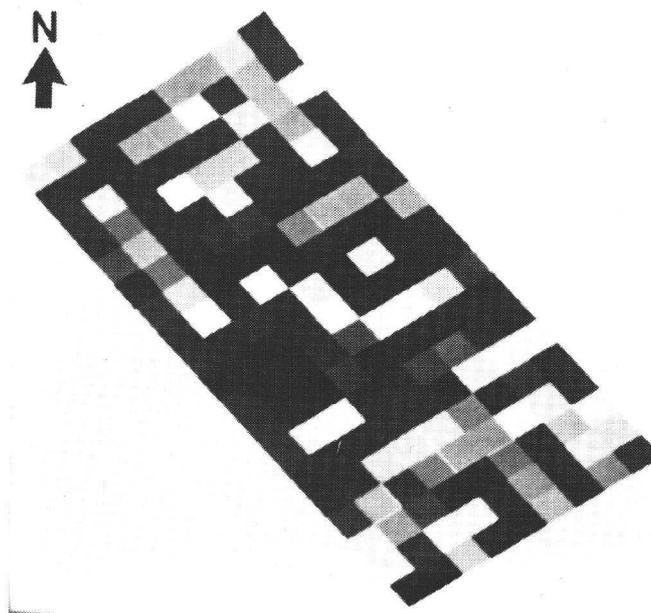


Fig. 6 - Plano digital geoquímico para o elemento cobre com resolução espacial de 30 metros, obtido a partir de amostragens de solo para área do corpo 4E de Pojuca. (maior eixo N36W).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, G. 1982. Aplicabilidade da análise automática de imagens LANDSAT na pesquisa mineral no interflúvio Araguaia-Xingu. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2. Brasília p. 197-206.
- ARONOFF, S.; PARLIAMENT, H. 1987. From data to information - Image Processing for Decision Making. *Geocarto International* (3):1987 p. 25-30.
- BANNINGER, C. 1984. Detection of heavy metal stressed vegetation using LANDSAT digital data. In: *Int. Symp. on R.S. of Env.*, 18. Paris. p. 1101-1104.
- BANNINGER, C. 1985. Spectral analysis of a heavy metal-stressed forest canopy using LANDSAT TM data. In: *Int. Colloquium on Spectral Signatures of objects in R.S.* Paris. p. 403-407.
- COLE, M.M. 1971. The importance of environment in biogeographical/geobotanical and biogeochemical investigations. *Geochemical Exploration*. Canadian Inst. of Mining and Metallurgy, Special Vol 11; p. 414-425.
- CUNHA, B.C.C.; SANTOS, D.B.; PRADO, P. 1984. Contribuição ao estudo da estratigrafia da região dos Gradaus, com ênfase no Grupo Rio Fresco. In: *Cong. Brasileiro Geologia*, 33, Rio de Janeiro, Anais, vol. 2. p. 837-885.
- DOCEGEO (RIO DOCE GEOLOGIA E MINERAÇÃO S.A.). 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, Anais II, *Simp. Geol. Amazônia*, Belém, S.B.G. p. 11-54.
- ELIASON, P.T.; DONOVAN, T.J.; CHAVEZ JR., P.S. 1983. Integration of geologic, geochemical and geophysical data of the Cement oil field, Oklahoma, using array processing. *Geophysics* 48(10); 1305-1317.
- FABBRI, A.G.; FUNG, K.B.; KASVAND, T. 1988. Issues in the integration of spatially-distributed data ancillary to remotely sensed images. In: *Cantoni, V., Di Gesu V. e Levaldi, S., Eds. Image Analysis and Processing II*, New York, Plenum Press, p. 453-468
- FABBRI, A.G.; KUSHIGBOR, C.A. 1989. Relationships between Integrated multisensor Imagery, Geophysical data and Geological Map Patterns for Mineral Exploration East of Bathurst Inlet, N.W.T.; Canadá. *Proc. IGARSS' 89*, Vancouver, Canadá, Julho 10-14, 144-1420
- FALESI, I. 1986. O ambiente edáfico. In: *Carajás, desafio político, ecologia e desenvolvimento*. CNPq e Brasiliense ed.; cap. 6, p.125-155.
- FLEMING, M.D.; HOFFER, R.G. 1979. Machine processing of LANDSAT MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. *LARS Tech Rept.* 062879 p.377-390.
- FRANK, T.D. 1988. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado rocky mountain front Range with LANDSAT Thematic Mapper and digital terrain data. *Photog. Eng. and R.S.*, 54(12):1727-1734.
- FRANKLIN, S.E. 1985. The significance of geomorphometric variables in LANDSAT MSS analysis of a high relief environment, Ph.D. Thesis; Univ. of Waterloo, Canadá, 237 pgs.
- GAÁL, G. 1988. "Exploration target selection by integration of geodata using statistical and Image processing techniques: an example from Central Finland" *Geological Survey of Finland*, Rept. of Investigation 80, 155p.
- GOODENOUGH, D., MENARD, A.A. 1988. *LDIAS- User's guide to LDIAS-CCRS, Energy Mines and Resources*, Canadá, CCRS, 511 pgs.
- HORNSBY, J.K.; BRUCE, W.D. 1986. Regional geobotany with TM: a Sudbury case study. In: *Canadian Symposium on R.S.*; 10. Alberta, Canadá, p. 601-609.
- HORNSBY, J.K.; BRUCE, W.D.; HARRIS, J.; RENCZ, A.N. 1988. Implementation of background and target geobotanical techniques in mineral exploration. In: *Thematic Conference on R.S. for Expl. Geol.*, 6. Houston, 11 p.
- HUTCHINSON, C.F. 1978. The digital use of LANDSAT data for integrated land resources survey: a study in the Eastern Mojave desert, California. Ph.D. UCLA, 265pgs.
- INTERGRAPH. 1987. Digital terrain modelling package. User's and programmer's guide (version 8.8; rev. 1; DMAP 131, ED. 2.).
- KLINGE, H. 1976. "Bilanzierung von Hauptnährstoffen im Okosystem Tropischer Regenwald (Manaus) - vorläufige Daten", *Biogeographica*, 7:59-77.
- LYON, R.J.P. 1975. Mineral exploration of digitally processed LANDSAT imagery. In: *Annual W.T. Pecora Memorial Symp.*, 1; p. 271-292.
- MEDEIROS NETO, F.A.; VILLAS, R.N.N. 1985. Geologia da jazida de Cu-Zn do corpo 4E-Pojuca, Serra dos Carajás, Anais II *Simp. de Geol. da Amazônia*, Belém, S.B.G., pgs. 97-112.
- MOURA, C.A.V. 1982. "Tratamento estatístico de dados geoquímicos e a sua aplicação ao mapeamento geológico e definição de anomalias geoquímicas no Alvo 2 - Corpo 4 Província Mineral de Carajás". (Dissertação de Mestrado, NCGG, UFPa, Belém). 109 pgs.
- PARADELLA, W.R.; BRUCE, W.D.; HORNSBY, J.K.; KUSHIGBOR, C.A. 1989. A Background Geobotany model Applied to Geologic Exploration in Tropical Forest Environments: First Results from LANDSAT TM and DTM for the Pojuca Cu-Zn deposits, Carajás Province, Brazil. *Symp. IGARSS'89*, Vancouver, Canadá, Julho-10-14, p. 2511-2513.
- PARADELLA, W.R.; BRUCE, W.D. 1989. *Geobotânica*

por Sensores Remotos: uma Revisão. Revista Brasileira de Geociências, vol 19(4): (prelo).

- PARADELLA, W.R.; SILVA, M.F.F. da; ROSA, N. de A.; GOUVEA, J.L. 1990. "Aplicação de dados de Sensores Remotos Integrados com modelo digital de elevação na Pesquisa Geobotânica na Serra dos Carajás". In: Cong. Bras. Geol., 36, Natal, Soc. Bras. Geol., (prelo).
- SATERWHITE, M.; RICE, W.; SHIPMAN, J. 1984. Using landform and vegetation factors to improve the interpretation of LANDSAT imagery. Photog. Eng. and R.S., 50(11):83-81.
- SAUERESSIG, R. 1988. Depósito de Cobre e Zinco do Corpo Quatro, Pojuca. In: Cong. Bras. Geol., 35, Anexo aos Anais, Província Mineral de Carajás, p. 115-119.
- SCHUBART, H.O.R. 1986. Dinâmica de ecossistemas. In: Carajás, desafio político, ecologia e desenvolvimento. CNPq e Brasiliense Eds., cap. 3, p. 30-58.
- SILVA, G.G.; LIMA, M.I.C.; ANDRADE, A.R.F.; ISSLER, R.S.; GUIMARÃES, G. 1974. Geologia da Folha SB-22 Araguaia e parte da Folha SC-22 Tocantins. Projeto RADAM; vol. 4.; 143 pgs.
- STORY, R.; YAPP, G.A.; DUNN, A.T. 1976. LANDSAT patterns considered in relation to Australian resources survey. Rem. Sens. of Env., 4:281-303.
- VELOSO, H.; JAPIASSU, A.M.S.; GOES FILHO, L.; LEITE, P.F. 1974. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. Estudo Fitogeográfico da área abrangida pelas Folhas SB-22 Araguaia e SC-22 Tocantins. Projeto RADAM, vol. 4., 119 pgs.