

IV Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento (1997) —

ANÁLISE INTEGRADA DE DADOS GEOQUÍMICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO EM TERRENOS CRISTALINOS DO URUGUAI

FILIPPINI, J.M. (1); CRÓSTA, A.P. (2); DE OLIVEIRA, S.M. (3)

RESUMO

A integração de dados geológicos e exploratórios, através do uso de processamento digital de imagens e de sistemas de informações geográficas, vem sendo adotada rotineiramente em pesquisa mineral. Neste trabalho, as bandas ópticas do Landsat-TM foram integradas à geoquímica de regolitos, correspondente a dados levantados na década passada em um setor do basamento Pré-cambriano uruguaio. Foram cobertos 2.480 km² com 2.172 amostras. As amostras foram analisadas para 22 elementos por espectrometria de plasma de corrente directa. A área contém ocorrências de metais de base e uma antiga mina de Au. A integração dos dados foi realizada usando três métodos: (i) Sobreposição; (ii) Classificação, e (iii) Critérios SIG. Esses métodos possuem características diferentes, mas todos foram eficientes para detectar áreas favoráveis, considerando os aspectos fisiográficos e a potencialidade mineral da área de pesquisa.

ABSTRACT

Integration of geologic and exploration data, through the use of digital image processing techniques and geographic information systems, has become a routine in mineral exploration. In this paper, the optical bands of Landsat Thematic Mapper were integrated with regolith geochemistry data acquired over the Uruguayan Precambrian basement. It was covered an area of 2,480 km² with 2,172 samples. The samples were analyzed for 22 elements by direct current plasma spectrometry. The area contains occurrences of base metals and an old gold mine. Data integration was carried out using three methods: i. Simple overlay, ii. Classification, iii. Use of GIS. The three methods have different characteristics but all of them were efficient in detecting favorable areas, considering the regional geology and mineral potential of the study region.

- (1) Mestre em Ciências, Pós-graduando, Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- (2) Ph.D., Professor Livre Docente, Departamento de Metalogênese e Geoquímica do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas.
- (3) Doutora em Ciências, Professora Associada, Departamento de Geologia Geral do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

INTRODUÇÃO

A integração digital de dados geológicos e exploratórios (geoquímicos, geofísicos e de sensoriamento remoto), através de processamento de imagens (Crósta, 1993) e sistemas de informações geográficas-SIG (Bonham-Carter, 1994), vem sendo adotada rotineiramente em pesquisa mineral. Essa técnica permite otimizar as fases iniciais de projetos prospectivos, re-analisar dados históricos e recentes, e estabelecer novas hipóteses ou cenários exploratórios, de modo rápido e flexível. Ela permite ainda uma abordagem integrada, utilizando pacotes estatísticos e programas de pré-processamento.

Neste trabalho foram integrados dados digitais Landsat-TM, dados geoquímicos e informações extraídas de mapas geológicos e geográficos, correspondendo à uma área localizada em terrenos Pré-cambrianos do Uruguai. O objetivo principal foi discriminar as anomalias geoquímicas regionais e anomalias locais, definindo novos alvos de prospecção.

Para isso foram utilizados três métodos de integração, cujos resultados serão comparados e discutidos no decorrer do presente trabalho:

- i. Sobreposição: Utilizou imagens orbitais Landsat-TM no espaço de cores RGB, onde foram sobrepostas as anomalias definidas pelo tratamento estatístico dos dados geoquímicos em formato vetorial.
- ii. Classificação: Variáveis definidas em função dos dados orbitais e dos dados geoquímicos, foram processadas por métodos estatísticos de classificação, sendo agrupados os pixels com características semelhantes.
- iii. Critérios SIG: Baseou-se na análise espacial considerando modelos exploratórios teóricos, sendo aplicados sobre os dados gridados, através do uso de operadores booleanos.

CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS E GEOLÓGICAS DA ÁREA DE PESQUISA

A região estudada está localizada no sudeste do Uruguai e cobre 2.480 km² (Figura 1). O clima é temperado e as paisagens típicas são pradarias e florestas nativas que concentram-se nas margens dos principais cursos hídricos. Os desenvolvimentos agrícolas, indústrias e urbanos são limitados. A hidrografia é pouco densa e homogênea. Darnley et al. (1995) indicaram às águas superficiais, os solos e os sedimentos como os meios de amostragem mais adequados nesses ambientes.

O domínio geológico mais antigo é a Formação Pavus, que está composta por rochas (gneas e metamórficas do Proterozóico Inferior (Médio), incluindo serpentinitas, gabros, anfibolitos,

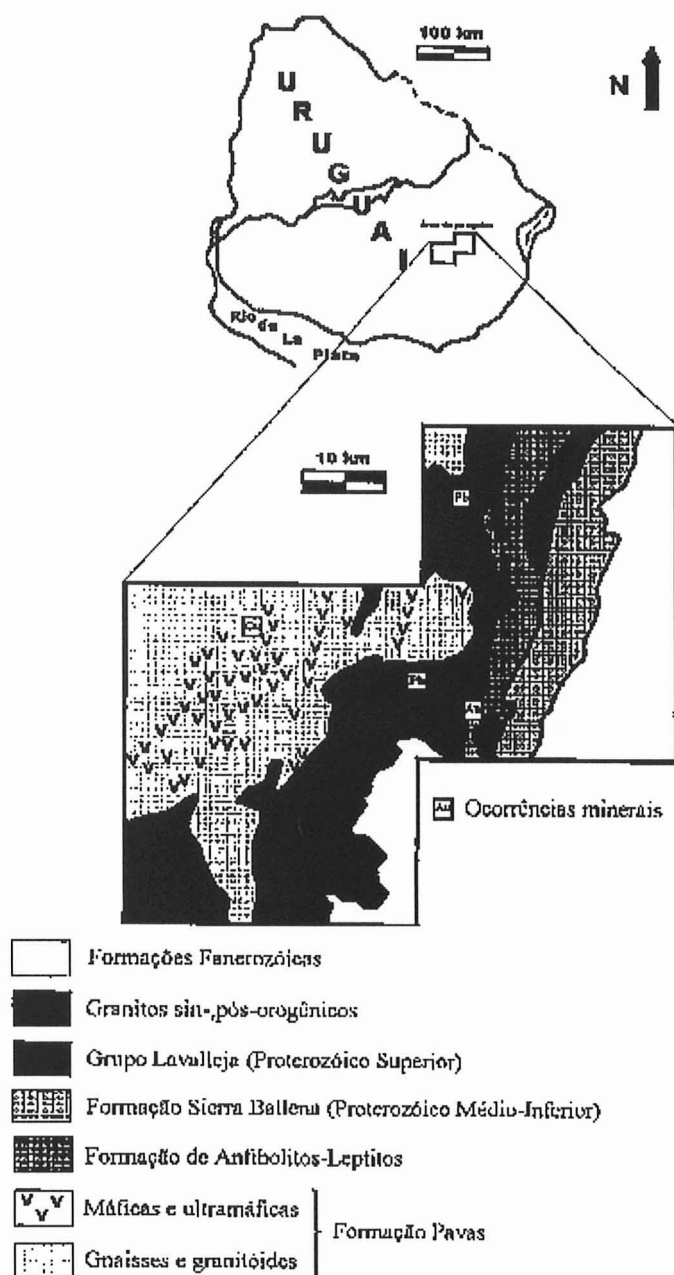


Figura 1. Localização e feições geológicas da área de pesquisa.

gnaiesses e granitos. Fesefeldt (1988) considerou a Formação de Anfíbolitos-Leptitos como o basamento do Grupo Lavalleya, em função das propriedades metamórficas de ambas unidades. Preciozzi (1987) integrou as duas em um único domínio geológico. O Grupo Lavalleya é uma Sequência vulcano-sedimentar do Proterozóico Superior, integrada por rochas carbonáticas, quartzitos, diversos tipos de xistos, breccias e volcânicas intermediárias. A formação Sierra Ballena é uma zona de cisalhamento composta por milonitos e ultramilonitos de várias classes.

Das quatro ocorrências minerais existentes na área, a mais importante é uma antiga mina de Au no setor sul-oriental. Trata-se de um veio quartzoso de cor violácea, com teor médio de Au de 7ppm e encaixado na Formação de Anfíbolitos-Leptitos. Alguns transectos geoquímicos em solos mostraram uma anomalia positiva de largura métrica próxima à mineralização. A razão anomalia/média foi superior a 1,5 para Au, Ba, Co, Cu, Mn, P e Pb no horizonte C, e para radiometria- γ total.

MÉTODOS DE COLETA E DE PROCESSAMENTO

A amostragem geoquímica foi realizada no período 1982-86, em quatro etapas de um mês cada, sendo coletadas 2.217 amostras no total, o que inclui 45 replicatas analíticas e de amostragem. Quase 90% da amostragem correspondeu a sedimentos nos terraços fluviais, sendo que foram amostrados solos nos casos de ausência de curso ativos. A radiometria- γ total foi medida com detectores de mão nos locais de amostragem.

As amostras foram secas em ambiente aquecido a 50°C, peneiradas a 80 mesh e analisadas para 22 elementos (Fe, Mn, P, Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Sn, V, W, Y e Zn) por espectrometria de emissão por plasma de arco de corrente contínua. A digestão das amostras constou de duas etapas: (i) HClO₄ a 140°C; (ii) Adição de HCl-HF a 80°C. Filippini et al. (1987) indicaram 12 elementos como adequados para o tratamento estatístico (Fe, Mn, P, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Y e Zn).

Os dados digitais Landsat-TM da órbita 223, Ponto 83, Quadrante D de 16/10/90 foram adquiridas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE. Para a retificação da imagem foram usados 44 pontos de controle e um sistema CAD. A interpolação foi efetuada no ER-Mapper (1995), pelo método do "Vizinho próximo". Obteve-se erro médio (RMS) inferior a 3m por ponto de controle. O tratamento dos dados geoquímicos foi realizado utilizando pacotes estatísticos e procedimentos gráficos de mapeamento, com a cooperação da Universidade Acadêmica de Åbo (Åbo, Finlândia) e

do Serviço Geológico da Finlândia. Foram usados métodos univariados e multivariados (Howarth, 1983).

O processamento dos dados orbitais e sua integração com a informação geoquímica foi realizado junto ao Laboratório de Processamento de Informações Georreferenciadas (LAPIG) do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Os métodos utilizados para o processamento de imagens foram a análise por principais componentes (APC) e às técnicas de classificação (ER- Mapper, 1995). O SIG utilizado foi o GRASS (1993).

Os nove setores anômalos definidos pelo tratamento estatístico dos dados e as principais falhas e limites geológicos foram digitalizados em formato vetorial no AUTOCAD (Autodesk, 1990), sendo importados para o ER-Mapper e o GRASS. O arquivo das anomalias geoquímicas foi superposto às composições RGB no ER-Mapper, considerando três bandas Landsat-TM ou PCs, dando lugar ao método de sobreposição. Os dados geoquímicos foram gridados utilizando o método de "Curvatura Mínima" com pixels de 200mx200m (Keckler, 1994) ou pelo método do "Inverso do Quadrado da Distância" sendo interpoladas sete amostras por cela (GRASS). Os métodos de interpolação foram otimizados variando o tamanho da cela ou o número de pontos interpolados por cela, e comparando com mapas de círculos.

As variáveis consideradas pelos métodos critérios SIG e de classificação foram: Ba, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, P, V, Y e Zn, a Radiometria- γ total, a banda TM4, o Fator-F e o Fator-H. As variáveis geoquímicas foram transformadas em logaritmos e divididas pelas medianas dos grupos classificados em função dos materiais amostrados. De essa forma, tentou-se homogeneizar a resposta geoquímica de sedimentos e solos. Ag e As foram adicionados para a estratégia SIG, considerando somente os valores acima dos limites de detecção. O Fator-F é a PC que representa a distribuição superficial dos óxidos de Fe e o Fator-H é a PC relacionada à distribuição do conteúdo do grupo-OH (minerais argilosos), considerando a técnica das "Feature-oriented Principal Components Selection"-FPCS (Crósta & Moore, 1989; Loughlin, 1991; Crósta & Rabelo, 1993). O método SIG considerou aspectos de exploração litogeoquímica para depósitos de sulfetos maciços ou filonares (Gevett, 1983). Para a classificação foi aplicado o procedimento não supervisionado, sendo executado repetidas vezes para otimizar os parâmetros de cálculo (número de classes, distância entre centróides, desvio padrão máximo para cada classe...).

COMENTÁRIOS SOBRE A RESPOSTA DA GEOQUÍMICA E DOS DADOS LANDSAT-TM

A resposta geoquímica regional foi controlada pelos litotipos das rochas de procedência e vários elementos mostraram mobilidade restrita (Filippini et al., 1997). Pelo que a dispersão geoquímica estaria controlada fundamentalmente por processos detriticos, fato típico nos países de clima temperado (Darnley et al., 1995). Porém, esse aspecto seria incrementado na região estudada, devido ao baixo contraste do relevo (20-260m) e à cobertura vegetal uniforme.

A classificação não supervisionada sobre os dados Landsat-TM gerou dez classes. Seis classes foram interpretadas como diferentes formas de vegetação ou tipos de solos. Duas mostraram estar relacionadas às regiões cobertas por águas e as duas restantes, que ocuparam 7% da área total, representaram litotipos diferentes, em função das razões de bandas TM3/TM1 e TM5/TM7. Os fatores obtidos pela FPCS foram representados pelas seguintes equações:

$$\text{Fator-F} = -0,22.TM1 + 0,38.TM3 + 0,15.TM4 - 0,25.TM5$$

$$\text{Fator-H} = 0,04.TM1 - 0,17.TM4 + 0,41.TM5 - 0,37.TM7$$

RESULTADOS DA INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Cinco dos setores anômalos definidos pelo tratamento estatístico mostraram sobreposição ou proximidade com relação a pequenos diques máficos, que devido a suas dimensões não foram visualizados nas imagens Landsat-TM. Várias amostras anômalas em Pb-Zn no setor N, mostraram coerência espacial com um corpo de quartzito, em função da área de exposição evidenciada pelas imagens orbitais (Figura 2). A antiga Mina de Au está localizada próxima a um corpo de quartzito caracterizado pelos dados Landsat-TM, dando lugar a uma anomalia geoquímica polimetálica. Alguns quilômetros a SW, em entorno geológico semelhante onde aflora um corpo de quartzito das mesmas feições, ocorre uma anomalia de As acompanhada por teores moderados de Cu, que foi definida pela similaridade entre ambas. Outras duas anomalias parecem estar relacionadas a feições estruturais, uma pela visualização de lineamentos em concordância com os mapas geológicos e a outra, pela ocorrência de um grande número de afloramentos de pequenas dimensões.

Na Tabela 1 são apresentados as variáveis e os parâmetros da análise espacial ponderada. As 41 classes definidas foram reagrupadas em quatro segundo sua prioridade (alta, média, baixa e nula), sendo elaborado o mapa da Figura 3. A escala de ponderação foi construída considerando os histogramas e as características de cada variável. Como o Ni representou um critério de

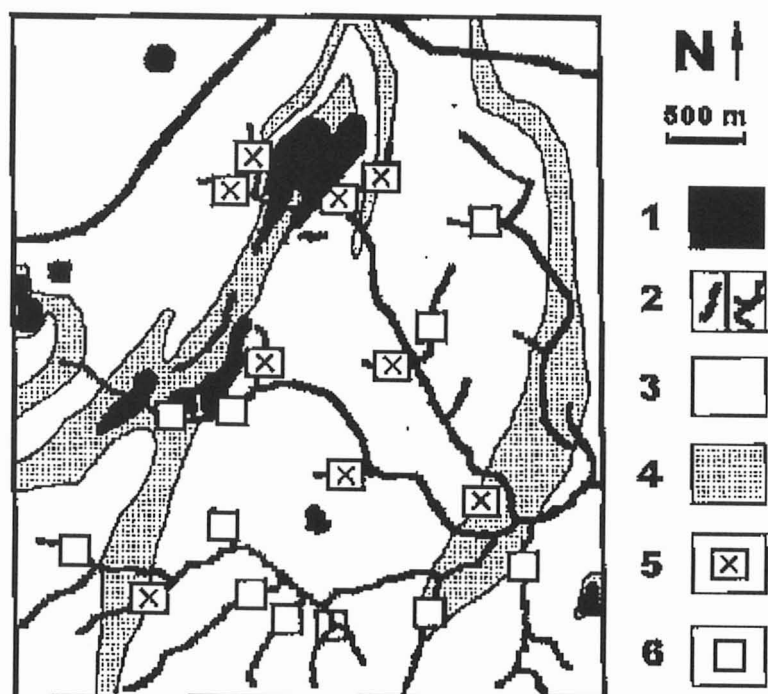


Figura 2. Relação espacial de amostras geoquímicas com feições geológicas para anomalia Pb-Zn. 1 = Rocha exposta em imagem Landsat-TM; 2 = Caminho/Cursos hídricos; 3 = rochas carbonáticas em mapa geológico; 4 = Quartzitos em mapa geológico; 5/6 = Amostras com teor de Pb ou Zn superior/inferior a 1,5 vezes a mediana.

empobrecimento, sua hierarquia foi reduzida. Os valores próximos à mediana foram considerados com ponderação média-baixa. Para o Zn foi levada em conta sua mobilidade.

As medianas das classes definidas pela Classificação não supervisionada dos dados geoquímicos e Landsat-TM são expostas na Tabela 2. Valores acima de 100 significam enriquecimento em relação à Classe 1, valores inferiores a 100 empobrecimento, enquanto o valor 100 indica que a mediana afastou-se menos de um desvio padrão da Classe 1, indicando ser estatisticamente idêntica. As 12 classes foram re-agrupadas em 5 e mapeadas com tonalidades diferentes de cinza (Figura 4).

Tabela 1. Critérios usados na estratégia SIG. As variáveis geoquímicas foram expressas como porcentagem das medianas (incluídas nos intervalos em **negrito**). Fator-F e Fator-H em valores originais.

Ni		Zn		Ag+As+Cu+Pb		Fator-F		Fator-H	
Intervalo	Peso	Intervalo	Peso	Intervalo	Peso	Intervalo	Peso	Intervalo	Peso
0-50	9	115-156	12	50-69	12	120-255	12	200-255	12
51-85	7	108-114	8	35-49	9	100-119	9	185-199	9
86-110	3	101-107	4	25-34	5	70-99	7	175-184	5
111-235	0	0-100	0	20-24	3	50-69	3	0-174	0
				0-19	0	0-49	0		

Tabela 2. Características das classes definidas pela classificação não supervisionada dos dados Geoquímicos e Landsat-TM (Banda TM4, Fator-F, Fator-H, Ba, Co, Cu, Mn, Ni, P, Pb, V, Y, Zn e Radiometria- γ). Foram incluídas as variáveis com melhor contraste. Os valores foram expressos como porcentagem da Classe 1. As células vazias possuem medianas estatisticamente iguais a 100. DP-1 = Desvio padrão da Classe 1.

Classe	Fator-F	Co	Cu	Mn	Ni	Pb	Radiometria- γ	Zn	Área, %
1									28
2		125	112		120			107	28
3		116	131			80		119	4
4	111				31	114		91	5
5	121								8
6		149		127	76	150	106	94	5
7		169	135	126		51		125	3
8		132	119	107	139	67		113	12
9		130	116	107	161	30		109	2
10		144	136	123	223	24	92		1
11		132	118	111	177	82			2
12		162	155	124	169	49	94	111	2
DP-1	7	16	11	7	16	13	5	7	

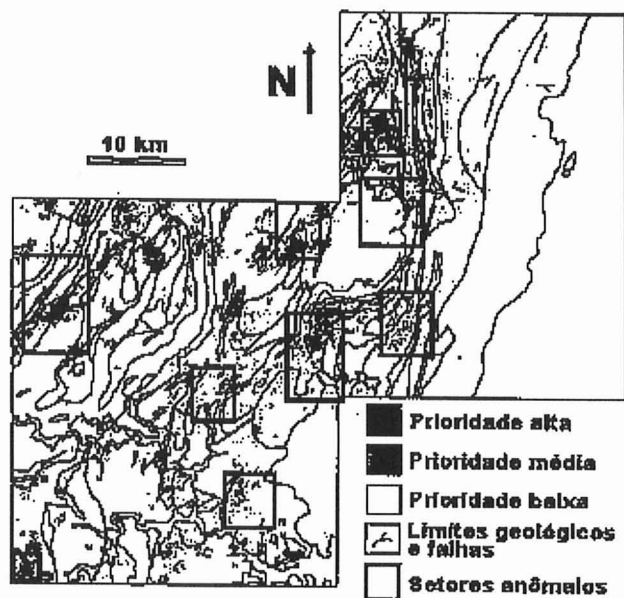


Figura 3. Zonas anômalas definidas pela análise espacial ponderada. As prioridades foram estimadas segundo um modelo exploratório teórico, incluindo variáveis geoquímicas e aquelas extraídas pela aplicação da FPCS sobre os dados Landsat-TM.

DISCUSSÃO

O método de sobreposição proporcionou a visão sinóptica das anomalias geoquímicas definidas pelo tratamento estatístico, permitindo localizar as amostras em função dos cursos hídricos e observar sua relação espacial com possíveis corpos mineralizados ou feições estruturais, definidas pelas propriedades tonais e texturais das imagens Landsat-TM.

Os modelos exploratórios utilizados no método SIG, foram baseados em dados litoquímicos, pelo que sua aplicação neste trabalho dependeu da mobilidade geoquímica, que foi restrita, validando o método. As zonas de alta prioridade definidas pelo método SIG mostraram excelente concordância com as anomalias verdadeiras definidas pela Classe 6 da classificação. Algumas anomalias que seriam explicadas pela ocorrência de rochas máficas, incluindo a anomalia regional do setor NW, não foram bem definidas pela estratégia SIG, como era de esperar em função das condições do modelo assumido (anomalia negativa de Ni). Do ponto de vista regional, e levando em consideração as regiões de prioridade alta, média e baixa, a Figura 1 sugere uma maior filiação metalogênica do Grupo Lavalleya e da Formação Pavas, em relação às outras unidades geológicas.

As classes definidas pelo método de classificação corresponderam a fenômenos regionais, a litotipos específicos ou à ocorrência de mineralizações. A Classe 2 está levemente enriquecida em Co, Cu, Ni, V e Zn em relação à Classe 1, ocupando ambas áreas extensas. Estas classes representariam o teor de fundo de dois grandes domínios, que também foram observados nas imagens Landsat-TM e estariam grosseiramente definidos por: i. a Formação Sierra Ballena e as Formações Fanerozóicas (Classe 1); ii. a Formação de Anfíbolitos-Leptitos e o Grupo Lavalleya (Classe 2). Na Figura 4 a Classe 1 corresponde à "fundo baixo" e a Classe 2 ao "fundo alto", significando "teor geoquímico de fundo baixo e alto" respectivamente.

Outro domínio estaria representado pelas Classes 3, 7, 8, 9, 10, 11 e 12, que foram re-agrupadas e representadas como "anomalias litológicas" (Figura 4), dando lugar a uma grande anomalia regional positiva para Co, Cu e V e negativa em Pb no setor NW. O teor de fundo estaria representado pela Classe 8, que cobre uma extensa área e possui resposta intermediária (Tabela 2), possivelmente como consequência da mistura de materiais procedentes dos termos félsicos e máficos da Formação Pavas. As outras classes parecem representar litotipos com conteúdo variável de minerais máficos. Em pequenas zonas afastadas da anomalia regional do setor NW, essas classes estão superpostas com afloramentos conhecidos de rochas máficas, incluindo os diques de pequenas dimensões.

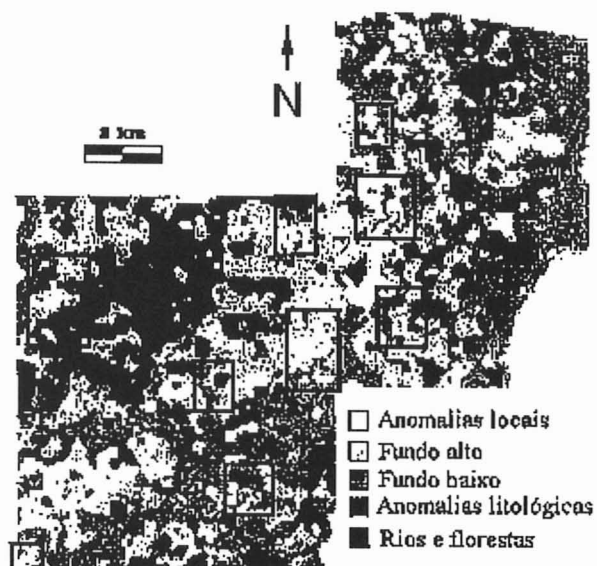


Figura 4. Classificação não supervisionada usando dados geoquímicos e Landsat-TM. Os retângulos representam os setores anômalos definidos pelo tratamento estatístico dos dados geoquímicos.

Os setores anômalos em Pb estão relacionados às Classes 4 e 6, que foram mapeadas juntas na Figura 4 como "anomalias locais". A Classe 6 está caracterizada por uma associação multivariada (Co, Mn, Pb e radiometria- γ), semelhante à detectada pelos transectos pedogeoquímicos na antiga Mina de Au. Observe-se que essa e as outras ocorrências minerais conhecidas foram evidenciadas com boa precisão. O fato mais importante da informação extraída das bandas Landsat-TM, seria o enriquecimento do Fator-F para as Classes 4 e 6, indicando certa associação com os óxidos de Fe. Algumas imperfeições no mapa da classificação foram consequência da falta de informação geoquímica, como no vértice SE, onde foi gerada uma grande acumulação de pixels da Classe 6. Isso gera dúvidas para as anomalias localizadas nas bordas da área. Porém, não deveriam ser descartadas nos outros setores sem reconhecimento prévio no campo.

Comparando os três métodos de integração, os mais sofisticados (classificação e SIG) definiram novos alvos e reduziram sensivelmente a área a ser avaliada nos setores anômalos definidos pelo tratamento estatístico. Considerando a classe de prioridade alta do método SIG, isso seria 2,5km², ou seja 0,1% da área de pesquisa. Aumentando esse valor em um fator de 10, devido aos possíveis erros introduzidos pela interpolação ou a mobilidade geoquímica, teríamos um valor de 1% da área, que ainda representa uma redução significativa, levando em conta os 270km² obtidos ao somar a área dos setores anômalos definidos pelo tratamento estatístico, que não foi quase reduzida pelo método de sobreposição.

CONCLUSÃO

Os três métodos de integração aplicados possuem feições próprias e em certos aspectos são complementares entre si. Considerando o tratamento estatístico imprescindível para estabelecer o alcance da resposta geoquímica original, o método de sobreposição é rápido, porém impreciso. Uma vez que permite apenas uma leve hierarquização dos alvos originais, sem reduzir sua área em forma efetiva.

Os métodos de classificação e SIG necessitam da transformação dos dados segundo uma malha regular. Nesse processo podem ser introduzidos erros e, em geral, é reduzido o contraste da informação. Porém, a área de pesquisa é avaliada na sua totalidade, através de critérios múltiplos de decisão, diminuindo o grau de subjetividade e gerando áreas alvo de pequenas proporções. No caso do SIG existe a possibilidade de flexibilizar o tamanho dos alvos, em função de uma escala hierárquica. Do ponto de vista interpretativo, o método de classificação permitiu diferenciar a

resposta local e regional, mostrando eficiência semelhante à do SIG na detecção das ocorrências minerais conhecidas e inferidas.

Finalmente, é necessário destacar que a informação digital possui aspectos texturais, que são difíceis de considerar por critérios de avaliação automáticos, resultando indispensável aplicar métodos mais subjetivos, como é o caso da sobreposição.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Dr. Alf Björklund da Universidade Acadêmica de Åbo e ao Dr. Nils Gustavsson do Serviço Geológico da Finlândia, pela valiosa contribuição no tratamento estatístico dos dados geoquímicos, estendendo o agradecimento às respectivas instituições.

Ao LAPIG-IG-UNICAMP por permitir a utilização dos seus recursos computarizados para o processamento e integração dos dados.

Ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro.

BIBLIOGRAFIA

1. Autodesk. AUTOCAD Reference Manual. Release 11. Autodesk Inc., USA, p.640 (1990)
2. Bonham-Carter, G. Geographic Information Systems for Geoscientists. Ottawa, Pergamon, p.378 (1994).
3. Crósta, A.P. Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, UNICAMP, p.170 (1993).
4. Crósta, A.P.; Moore, J.McM., Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state, Brazil. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, p.1173-1187 (1989).
5. Crósta, A.P.; Rabelo, A. Assessing Landsat-TM for Hydrothermal Alteration Mapping in Central-Western Brazil. In: Proceedings of the Ninth Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Pasadena, p.1053-1061 (1993).
6. Darnley, A.; Björklund, A.; Balbiken, B.; Gustavsson, N.; Koval, P.; Plant, J.; Steenfelt, A.; Tauchid, M.; Xie Xuejing. A global geochemical database for environmental and resource management, Paris, UNESCO, p.122 (1995).
7. ER-Mapper. ER-Mapper Handbook 5.0. West Perth, Earth Resource Mapping (1995).

8. Fiesfeldt, K. Asesoramiento geológico y yacimentológico a la DINAMIGE. Hannover, BGR, p.186 (1988).
9. Filippini, J. Prospección geoquímica en los alrededores de la Mina abandonada Presidente Terra. Montevideo, DINAMIGE, p.30 (1990).
10. Filippini, J.; de Oliveira, S.; Björklund, A. Avaliação de erros em prospecção geoquímica. In: III Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa. Minho, p.179-182 (1997).
11. Govett, G. Rock Geochemistry in Mineral Exploration. Amsterdam, Elsevier Sc. Pub. p.437 (1983).
12. Howarth, R. Statistical and data analysis in geochemical prospecting. Amsterdam, Elsevier Sc. Pub, p.437 (1983).
13. Keckler, D. Surfer for Windows. Golden, Golden Software Inc. (1994).
14. Loughlin, W. Principal Components Analysis for Alteration Mapping. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57: p.1163-1170 (1991).
15. Preciozzi, F. Carta Geológica del Uruguay Escala 1:100.000. Memoria Explicativa del Fotoplano J.P. Varela. Montevideo, DINAMIGE-FA-FC, p. 12, 1 mapa (1987).