

Análise geoestatística e multifractal da
geoquímica de solos de Odivelas (Ferreira do
Alentejo)

Mário A. Gonçalves e António Mateus
Departamento de Geologia
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Fevereiro de 2000

1. INTRODUÇÃO

Com o propósito de avaliar o potencial metalogenético da região de Odivelas (Ferreira do Alentejo), em particular no que diz respeito a mineralizações de Ti e V, o Instituto Geológico e Mineiro (IGM) em parceria com o Centro de Recursos Minerais, Mineralogia e Cristalografia (CREMINER), efectuou uma campanha de recolha de solos sobre litologias do Complexo Ígneo de Beja, nomeadamente sobre a unidade de Gabros Inferiores, visando a sua análise química. A amostragem compreendeu a execução de 7 perfis de direcção Norte-Sul com espaçamento aproximado de 100 a 150 m, realizando-se a colheita de amostras de 25 em 25 m. Constrangimentos de ordem diversa impediram que todos os perfis fossem completamente amostrados em conformidade com a planificação inicial. Assim sendo, uma parte do tratamento geoestatístico dos resultados da amostragem ficou parcialmente comprometido, nomeadamente no que diz respeito à interpolação de valores entre perfis adjacentes. Igualmente comprometida ficou a análise multifractal integrada do conjunto, em particular no sentido de definir quais os valores anómalos obtidos relativamente ao fundo geoquímico local. Foi, contudo, possível aplicar estes métodos perfil a perfil, analisando unidimensionalmente os dados. Esta abordagem pode dar indicações preliminares no sentido de prosseguir ou não com novas campanhas de prospecção geoquímica, detalhando a área estudada.

O conjunto de procedimentos efectuados inclui a análise de variogramas direccionais para alguns dos elementos químicos analisados. Procedeu-se à interpolação de pontos ao longo dos perfis que contêm pelo menos 9 amostras (4 dos 7 perfis assinalados na figura 1.1). Usou-se krigagem ordinária para a interpolação linear de valores em cada 5 m de perfil, usando para a estimação os 5 pontos amostrados mais próximos. A análise multifractal, nomeadamente a determinação das relações concentração/comprimento linear¹ e respectivos espectros multifractais, foi efectuada com base no conjunto de pontos amostrados e estimados, tendo como objectivo a viabilização da metodologia de cálculo em virtude da escassez de pontos amostrados. Convictos de que esta aproximação encerra em si própria muitas limitações e não está totalmente isenta de falta de representatividade, ela não deixa de representar uma primeira abordagem aos problemas em estudo, cujos

¹Corresponde a uma modificação, para o caso unidimensional, do modelo concentração / área originalmente desenvolvido por Cheng *et al.* (1994).

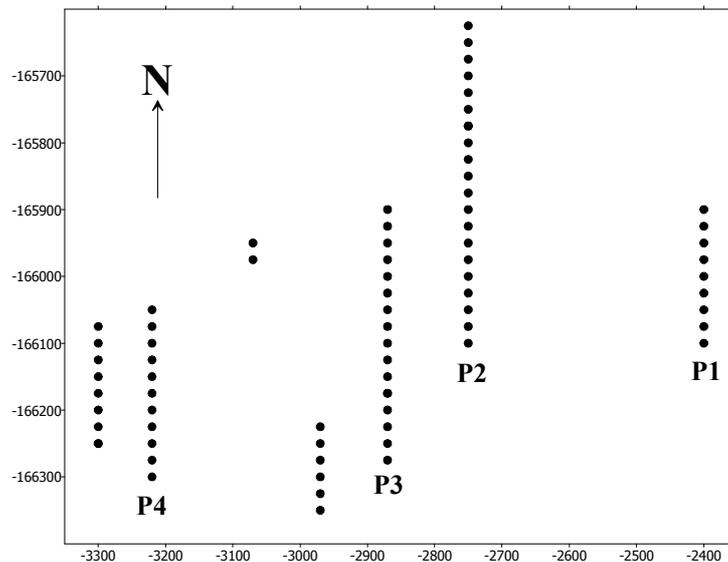


Figura 1.1: Perfis de geoquímica de solos da área de Odivelas. As coordenadas x e y encontram-se em metros. Os perfis usados no presente estudo encontram-se assinalados e referenciados conforme o seu uso no texto.

resultados deverão ser objecto de validação posterior.

1.1. Amostragem

A amostragem de solos foi efectuada ao longo de 7 perfis de direcção N-S conforme se mostra na Figura 1.1, assinalando-se apenas os pontos onde procedeu à colheita de amostras. Estas, após tratamento prévio, foram analisadas no Activation Laboratories (Canadá) para um total de 47 elementos + Au, através de activação neutrónica e espectroscopia de massa ICP; o *package* analítico envolveu limites de detecção correntemente utilizados em prospecção geoquímica.

Do conjunto de dados analisados, somente os seguintes elementos foram objecto de tratamento: Co, Cr, Ni, Ti, V, Zn e Cu. Deste conjunto, quer o Zn quer o Cu, são elementos cujo interesse para o estudo é menos significativo.

1.2. Breve análise estatística

Antes de se proceder ao estudo geoestatístico da população convirá apresentar um conjunto de dados estatísticos sumários que caracterizam a população amostrada nas suas componentes mais importantes e que consubstanciam os re-

sultados obtidos com as metodologias subsequentes. Assim, no quadro que se segue, sumarizam-se os resultados desta análise por forma a criar uma percepção global da heterogeneidade das distribuições e respectivos graus de assimetria por elemento químico.

Elemento	Co	Cr	Cu	Zn	Ni	V	Ti
N	72	72	72	72	72	72	72
\bar{x}	39	33	86	81	19	305	1.17
σ	12	34	81	44	11	123	0.61
σ/\bar{x}	0.30	1.04	0.95	0.54	0.59	0.41	0.52
min	14	5	12	26	4	32	0.09
Q_1	31	12	56	60	11	208	0.6
M	42	19	74	74	15	338	1.28
Q_3	48	36	94	86	23	399	1.6
max	73	169	702	333	51	520	2.19
Curtose	-0.06	5.12	46.29	16.84	0.94	-0.65	-1.07
Assimetria	-0.06	2.25	6.18	3.56	1.24	-0.59	-0.10

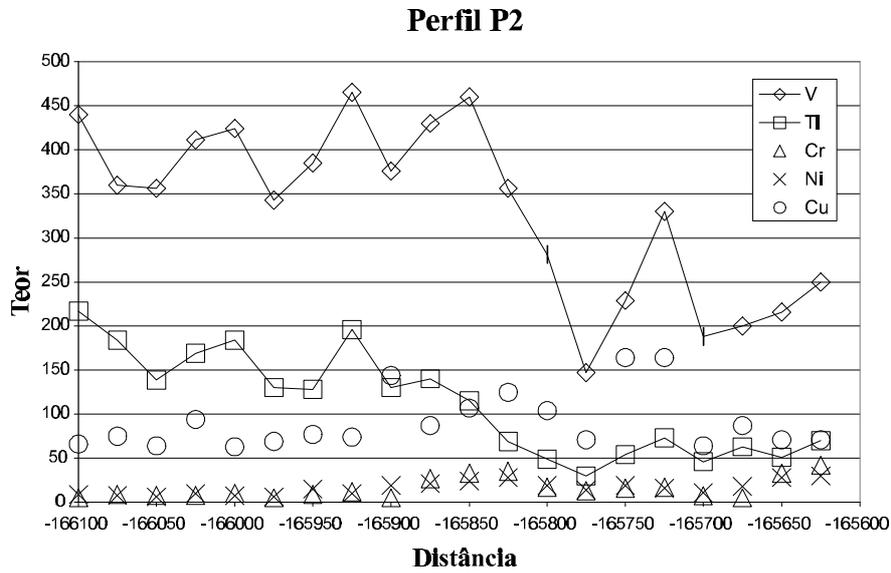
Quadro I. Síntese estatística para os elementos químicos estudados;

N : número de amostras; \bar{x} : média; σ : desvio padrão; min: valor mínimo;

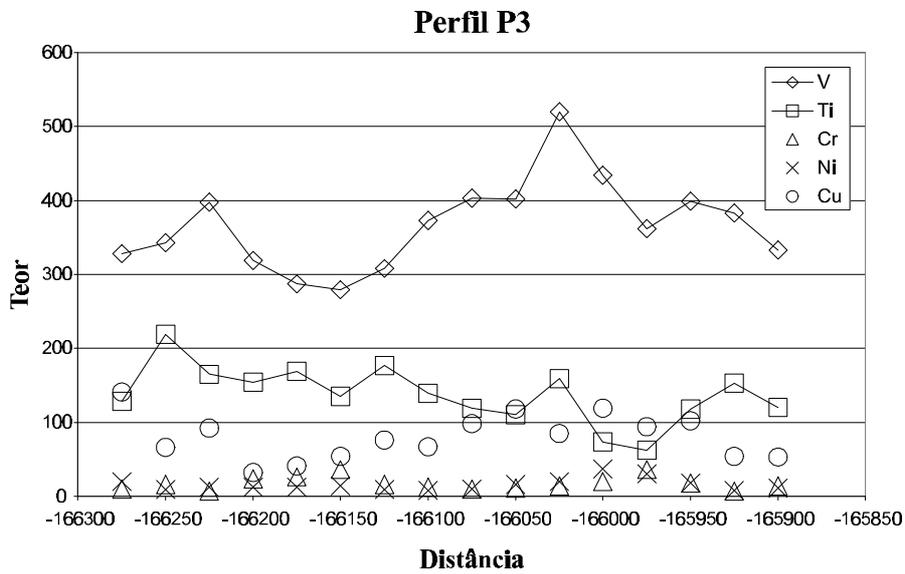
Q_1 : primeiro quartil; M : mediana; Q_3 : terceiro quartil; max: valor máximo.

A simples leitura deste quadro permite verificar que, com excepção do Vanádio, não existem valores de concentração significativamente elevados para os metais em estudo. As concentrações pontuais em Vanádio são relativamente elevadas, cifrando-se o valor máximo em torno de 520 ppm. Neste contexto, afigura-se significativo o facto de em Mombeja o valor limiar anómalo em solos se situar em 88 ppm (Gonçalves *et al.*, 1998), quando, na presente amostragem, a média se fixa em 305 ppm. No que respeita ao Ti, os teores obtidos estão dentro dos intervalos de valores habitualmente encontrados em rochas gabróicas, quer nas que compõem o Complexo Ígneo de Beja na região de Mombeja, quer nos metagabros constituintes do Complexo Ofiolítico de Beja Acebuches (BAOC). O Co, assim como o Cr, apresentam valores máximos superiores às médias encontradas nas rochas gabróicas destes Complexos. Tal é particularmente significativo para a distribuição de Cr, cujo valor do 3º quartil, sendo inferior em 79% relativamente ao máximo obtido, denota que poderão existir zonas pontualmente anómalas. Refira-se ainda que, as razões média / desvio padrão denotam para a maioria dos elementos estudados um carácter menos disperso que as distribuições de concentração em Cr e Cu, para as quais aquela razão se aproxima da unidade.

Uma breve inspecção às figuras 1.2 a 1.4 dá conta da variabilidade da concentração para o V, Ti, Cr, Ni e Cu nos solos colhidos nos perfis P2, P3 e P4.



Figura~1.2: Concentração química de V, Ti, Cr, Ni e Cu nos solos colhidos no Perfil P2. Concentrações em ppm, excepto para o Ti cujo valor é em % \times 100.



Figura~1.3: Concentração química de V, Ti, Cr, Ni e Cu nos solos colhidos no Perfil P3. Concentrações em ppm, excepto para o Ti cujo valor é em % \times 100.

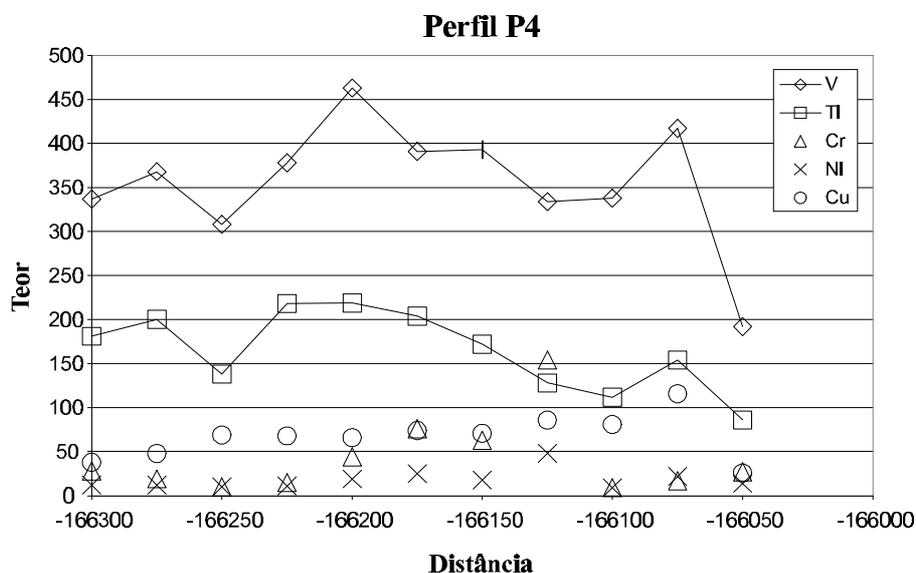


Figura 1.4: Concentração química de V, Ti, Cr, Ni e Cu nos solos colhidos no Perfil P4. Concentrações em ppm, excepto para o Ti cujo valor é em % × 100.

Verifica-se que existe uma co-variância evidente entre V e Ti (notar que o valor de concentração deste elemento nos gráficos é dado em % × 100). Estes resultados são consistentes com o facto de ser a ilmenite a principal fase mineral portadora de V. Os domínios onde existe alguma divergência nesta co-variância serão indicadores de que o V, nestes casos, se particiona por outras fases minerais, admitindo que os fenómenos de transporte e dispersão nos solos não são significativos por forma a causarem estas divergências. Para os restantes elementos, as concentrações obtidas são bastante baixas, contudo refira-se a notável co-variância entre Ni e Cr (mais visível pelo facto de as concentrações de ambos os elementos ser da mesma ordem de grandeza). Quando há lugar a enriquecimentos, verifica-se que é essencialmente o Cr que denuncia concentrações mais elevadas, conforme se constata no perfil P4 (Figura 1.4). Este mesmo comportamento também se verifica no perfil P1 (ver Figura 2.1 mais adiante). O Cu não apresenta concentrações, nem variações significativas, com a excepção do perfil P1 conforme se discute mais adiante.

2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

2.1. Análise de continuidade espacial

O conjunto de elementos seleccionados foi objecto de análise para avaliar a sua continuidade espacial através do cálculo dos respectivos variogramas experimentais. Inicialmente procedeu-se ao cálculo dos variogramas omnidireccionais e só posteriormente ao cálculo dos variogramas direccionais, segundo a direcção dos perfis (N-S). Verifica-se que em todos os casos existe uma concordância relativa entre os dois tipos de variogramas, sugerindo que a direcção N-S é predominante no cálculo do variograma experimental. Trata-se de um comportamento previsível, em particular para as distâncias mais curtas. O comportamento do variograma próximo da origem constitui igualmente um factor importante em virtude da sua sensibilidade para o ajustamento posterior dos modelos teóricos permissíveis¹. Todos os variogramas experimentais assim como o ajustamento dos variogramas teóricos foram efectuados recorrendo ao *software* Variowin 2.2 (Pannatier, 1996).

Elemento	Ef. Pepita	Modelo	Alcance (m)	Patamar	IGF^2
Co	21	Sph.	134	110.6	$4.39 \cdot 10^{-2}$
Cr	252	Sph	98	420	$1.97 \cdot 10^{-2}$
Ni	44.2	Sph	108	41.6	$1.22 \cdot 10^{-2}$
Ti	0.076	Gauss	363	0.41	$3.21 \cdot 10^{-2}$
V	1920	Sph	276	8320	$7.80 \cdot 10^{-3}$
Zn	600	Sph	120	1920	$1.78 \cdot 10^{-2}$
Cu	2680	Sph	54	2613	$7.59 \cdot 10^{-2}$

Quadro II. Parâmetros dos modelos dos variogramas teóricos ajustados e valores do efeito de pepita para o conjunto de elementos químicos objecto de estudo. Sph: Modelo esférico; Gauss: Modelo gaussiano

¹Entende-se por modelos teóricos permissíveis todos aqueles que assegurem a existência de soluções para o sistema linear de equações da krigagem. No presente momento, apenas satisfazem esta condição os modelos esférico, exponencial, gaussiano e de potência (de que o modelo linear é um caso particular).

²Designação de *Indicative Goodness of Fit*; constitui um parâmetro que mede o desajuste entre o modelo teórico de variograma e os valores experimentais obtidos.

Para o conjunto de dados experimentais relativos aos elementos em estudo, apenas se ajustou um modelo teórico e respectivo efeito de pepita. Uma síntese dos modelos de variogramas ajustados pode ser consultada no quadro II.

A consulta deste quadro revela que os teores dos diferentes elementos mostram uma continuidade espacial que, cifrando-se em regra acima dos 100 m de distância (alcance do variograma), torna legítima a interpolação de pontos interperfis. Contudo, devido ao desfasamento que os diferentes perfis apresentam entre si, grande parte da área abrangida pela campanha de solos fica sem informação. Por outro lado, é bem possível que haja uma anisotropia zonal³, implicando que o alcance do variograma seja diferente para a direcção perpendicular à considerada, isto é, entre perfis. Assim sendo, a tentativa de interpolação de pontos entre perfis, na esperança de delinear possíveis domínios anómalos, revela-se em grande parte infrutífera e corre o risco de não possuir qualquer significado geológico.

2.2. Interpolação de pontos ao longo dos perfis

Uma vez que os variogramas experimentais não denunciaram a existência de efeitos de pepita puros⁴, os dados não sofreram qualquer tipo de transformação. Refira-se que o tipo de transformação mais comum é a logaritmização desses dados devido às características que muitas das distribuições apresentam, as quais conduzem geralmente a variogramas experimentais que denunciam uma quase total ausência de correlação entre amostras para qualquer distância. Desta forma, a interpolação de pontos de 5 em 5 m ao longo de cada perfil estudado, pode ser realizada com base em krigagem ordinária. Para o efeito apenas se usaram os perfis compostos por um número de amostras superior a 9.

Para todos os perfis de cada elemento usou-se o modelo de variograma que se encontra expresso no quadro II, dado que estes representam, até pela forma como foram obtidos, o variograma médio para a direcção considerada (N-S). Para o efeito da estimação linear, usando a krigagem ordinária, utilizaram-se os 5 pontos mais próximos (metodologia esta ensaiada por Goovaerts, 1997, para a demonstração das propriedades dos diferentes estimadores de krigagem). À semelhança dos resultados obtidos por Goovaerts, verifica-se que os perfis obtidos estimam de forma exacta os valores cujos pontos coincidem com os pontos amostrados e entre

³A anisotropia zonal em variogramas identifica-se sempre que os mesmos apresentem alcances distintos para duas direcções perpendiculares, geralmente associadas às direcções de continuidade máxima e mínima.

⁴Designa-se por efeito de pepita puro a característica que alguns variogramas experimentais apresentam em virtude da total ausência de correlação espacial entre as amostras. Identifica-se pelo valor do variograma na origem ser superior a zero, e manter-se relativamente constante para qualquer distância considerada. Em algumas circunstâncias, tal pode dever-se à distribuição de concentração dos elementos ser log-normal.

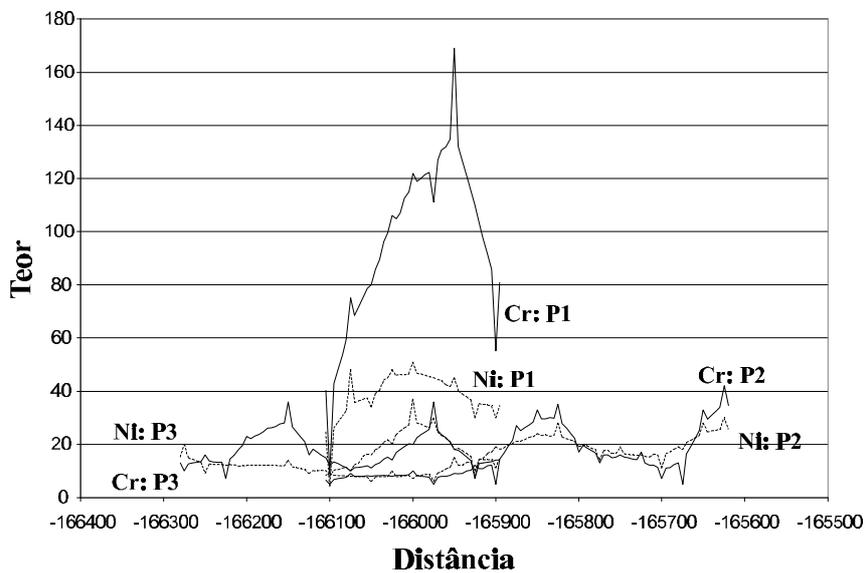


Figura 2.1: Perfis interpolados para Cr e Ni, cujos teores se encontram em ppm.

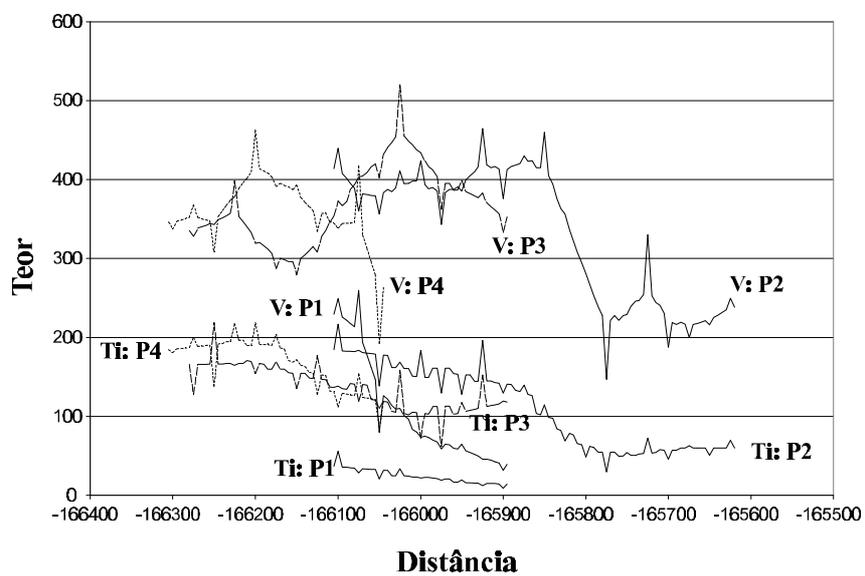


Figura 2.2: Perfis interpolados para Ti e V, cujos teores se encontram em $\% \times 100$ e ppm, respectivamente.

estes se aproximam da média local, para o caso definida pelo conjunto de 5 pontos usados para a estimação. O conjunto de perfis obtidos podem ser consultados nas Figuras 2.1 e 2.2.

3. ANÁLISE MULTIFRACTAL

A interpolação em cada 5 m de perfil teve como objectivo principal aumentar a representatividade da amostragem para que a análise multifractal pudesse ser realizada. Verifica-se que a obtenção de espectros fiáveis é grandemente dependente do número de amostras, que dependendo igualmente da geometria da rede de amostragem, pode implicar o uso de um número superior a 1000 amostras. Existem métodos que poderão contornar o problema, aumentando a amostragem embora criando medidas não independentes entres si, como seja o método das caixas deslizantes (Allain & Cloitre, 1991; Cheng, 1999b). Adicionalmente, o problema geométrico dos efeitos de fronteira poderá ser ultrapassado através de factores de correcção (Agterberg *et al.*, 1996), ou usando o método dos multiplicadores (Chhabra & Sreenivasan, 1991); este último procedimento foi igualmente testado com sucesso em problemas de geoquímica (Cheng, 1999a; 1999b). Refira-se contudo que os problemas geométricos só são particularmente sensíveis para a análise de áreas de amostragem bidimensionais. No presente caso, este tipo de problemas não se coloca, pese embora tal se possa vir a colocar na sequência de trabalhos futuros desenvolvidos na região. A utilização da krigagem como estimador permite realçar acima de tudo o conjunto de pontos anómalos em cada perfil, dado que, entre os pontos amostrados, os valores estimados se aproximam em cada nó da média dos pontos usados para a estimação do respectivo nó.

3.1. Relacção concentração / comprimento linear

A obtenção de relações concentração / comprimento linear não é mais que uma modificação da metodologia proposta por Cheng *at al.*(1994), no caso aplicado a uma área superficial coberta por uma malha de geoquímica de rocha. Estes autores demonstraram a existência de uma relação empírica em que uma área A que encerra um conjunto de amostras cuja concentração ρ é inferior ou igual a um dado valor ν , toma a forma

$$A(\rho \leq \nu) \propto \rho^{-\delta_1}. \quad (3.1)$$

Tal relação pode ser explicada teoricamente desde que a distribuição geoquímica apresente uma medida multifractal. O valor do expoente δ_1 é determinado pelo

declive da relação linear entre o logaritmo da área e o logaritmo da concentração. De forma similar se obtém, para as áreas que encerram concentrações superiores a um dado valor ν ,

$$A(\rho > \nu) \propto \rho^{-\delta_2}. \quad (3.2)$$

O expoente δ_2 possui então o mesmo significado que o expoente anterior.

Em termos do modelo multifractal, Cheng *et al.* (1994) obtêm equações similares às anteriores, representando as relações entre área e concentrações para os dois extremos de ρ admissíveis, isto é, para os valores de ρ próximos do seu valor máximo. Daqui resulta

$$A(\rho) = C_1 \rho^{-\delta_1}, \quad (3.3)$$

em que δ_1 representa um expoente que se pode relacionar com o valor mínimo de α do espectro multifractal resultante (α_{\min}), e C_1 é uma constante de proporcionalidade. No outro extremo da distribuição, ou seja, para os valores mínimos de ρ , obtém-se

$$A(\rho) = C_2 \rho^{-\delta_2}, \quad (3.4)$$

em que δ_2 se relaciona com o valor máximo de α (α_{\max}), e C_2 é igualmente uma constante de proporcionalidade.

No presente trabalho, as equações (3.3) e (3.4) são modificadas para o caso unidimensional, ou seja, em vez de se considerar áreas, consideram-se comprimentos lineares, L .

A variabilidade extrema por vezes observada em alguns perfis não permitiu quantificar o valor limiar anómalo para cada elemento em cada perfil. Em algumas situações recorreu-se a uma estimativa quantitativa aproximada, em especial por falta de pontos representativos de patamares anómalos. Nas circunstâncias em que a variabilidade é bastante mais acentuada, a estimativa de valores dos patamares anómalos não é passível sequer de ser realizada. O quadro seguinte sintetiza os resultados obtidos, onde para cada perfil e elemento se mostra o valor do limiar anómalo ν em ppm, exceptuando o Ti cujo valor é em percentagem:

Elementos	Co	Cr	Cu	Ni	Ti	V	Zn
Perfil P1	34	142	412	≈ 45	0.37	111	58
Perfil P2	55	18	121	25	1.85	-	130
Perfil P3	≈ 55	27	112	26	1.78	436	88
Perfil P4	≈ 50	95	91	28	-	415	173

Quadro III. Valores dos patamares de concentração anómalos por elemento químico e por perfil. Os valores aproximados são semi-quantitativos e na ausência de valores significa que não foi possível determinar com rigor sequer um valor aproximado.

Tais resultados mostram que alguns dos elementos possuem variações significativas nos valores dos limiares anómalos calculados, em particular o Cu e Cr, cujos teores mais elevados se apresentam no perfil P1 e, inversamente a este comportamento, o V cujo valor mais baixo ocorre no perfil P1. Para o V, apesar de não existir uma estimativa para o perfil P2, esta cifra-se necessariamente entre os 270 e 470 ppm (valores mínimo e máximo). O Ni parece apresentar igualmente um valor mais elevado no perfil P1, apesar de ser apenas um valor aproximado, contudo não muito longe do seu valor real. O Ti apresenta um comportamento muito similar ao V, onde somente no perfil P1 apresenta um patamar de anomalia inferior aos restantes perfis. No perfil P4 (sem valor calculado), este deve cifrar-se entre 1.5 e 2%. O Co apresenta valores muito regulares, ao contrário do Zn.

Este conjunto de resultados sugere com algum fundamento que o perfil P1 terá intersectado um substracto geológico diferente do encontrado nos restantes perfis. Com efeito, na carta geológica preliminar da região mostra-se que o perfil P1 intersecta uma estrutura carbonatizada segundo uma zona de cisalhamento NW-SE, com a indicação de presença de sulfuretos. A existência destes sulfuretos deve explicar, muito provavelmente, os mais altos valores de Cu obtidos no conjunto dos perfis. Embora não visível na figura 2.1, esse ponto anómalo encontra-se desfasado dos pontos anómalos, quer do Cr, quer do Ni. Este dado significa, muito provavelmente, que a fonte anómala será distinta, relacionando-se com domínios de natureza wherlítica adjacentes às bandas gabróicas relativamente enriquecidas em óxidos primários.

Quanto aos restantes perfis, deve salientar-se a sua similaridade química com os valores médios obtidos para a maioria das rochas gabróicas da região, com a salvaguarda dos teores em V serem significativamente superiores. O Ti parece acompanhar igualmente esta mesma tendência, embora não apresente de forma alguma valores dignos de monta.

3.2. Modelação multifractal

A modelação multifractal dos perfis ainda foi ensaiada, mas os resultados não foram conclusivos, pelas razões avançadas na introdução. Somente o perfil P2 permitiu a estimação de espectros $\alpha - f(\alpha)$ o que se deve essencialmente ao facto deste ser constituído por um maior número de amostras. Pontualmente, para alguns elementos é possível calcular o espectro multifractal para o perfil P1. A possibilidade de comparar à *posteriori* estes espectros com modelos de distribuição multifractal, em especial o modelo de de Wijs (1951), fica assim sem grande significado. Em conformidade com trabalhos recentes, pretende-se correlacionar tais espectros com factores multiplicativos destes modelos que possam dar uma quantificação aproximada dos graus de enriquecimento relativo que alguns destes elementos sofreram

comparativamente ao fundo geoquímico local. A possibilidade de correlação dos parâmetros destes modelos com o número de eventos geológicos responsáveis por este tipo de enriquecimentos continua uma possibilidade especulativa a que falta demonstrar a sua validade.

4. CONCLUSÕES

O aspecto mais saliente da geoquímica de solos realizada na zona de Odivelas consiste em confirmar as conclusões anteriormente referidas para a zona de Mombeja, no que diz respeito à potencialidade das rochas gabróicas do Complexo Ígneo de Beja para mineralizações de V (\pm Ti). Admitindo como muito provável (como já havia sido feito para Mombeja), que os teores em solos foram sujeitos a um factor de diluição, os resultados obtidos não deixam de ser bastante promissores.

Constata-se por outro lado que a análise integrada dos elementos perfil a perfil, através da determinação dos patameres anómalos, permite levantar a possibilidade de o perfil P1 ter intersectado um domínio composicionalmente diferente da Unidade de Gabros Inferiores. Os resultados particulares deste perfil relativamente aos restantes, permitindo identificar a intersecção de uma zona de cisalhamento carbonatizada com sulfuretos, confirmada por cartografia, dá igualmente uma medida da utilidade destas metodologias na prospecção geoquímica, desde que devidamente acompanhadas por abordagens complementares e levadas a cabo com as devidas precauções relativamente ao conjunto de dados que pretende tratar. Neste aspecto, e depois de apontadas na introdução as limitações que este conjunto de dados apresenta, não deixam de ser muito satisfatórias as conclusões passíveis de serem retiradas deste relatório.

Acresce, por último, salientar a necessidade de cruzar estes resultados com os obtidos através do estudo e análise de concentrados minerais, assim como dos exames petrográficos, por forma a estabelecer uma plataforma de correlação mais sólida entre as conclusões obtidas por esta via e a geologia da região estudada.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Agterberg, FP, Cheng, Q, Brown, A & Good, D, Multifractal modeling of fractures in the Lac du Bonnet batholith, Manitoba, *Computers & Geosciences*, **22** (5), 497-507, 1996.
2. Allain, C & Cloitre, M, Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets, *Physical Review A*, **44** (6), 3552-3558, 1991.
3. Cheng, Q, Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation, *Journal of Geochemical Exploration*, **65** (3), 175-194, 1999a.
4. Cheng, Q, The gliding box method for multifractal modeling, *Computers & Geosciences*, **25**, 1073-1079, 1999b.
5. Cheng, Q, Agterberg, FP & Ballantyne, SB, The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods, *Journal of Geochemical Exploration*, **51** (2), 109-130, 1994.
6. Chhabra, AB & Sreenivasan, KR, Negative dimensions: Theory, computation, and experiment, *Physical Review A*, **43** (2), 1114-1117, 1991.
7. de Wijs, HJ, Statistics of ore distribution, *Geologie en Mijnbouw*, **13** (11), 365-375, 1951.
8. Gonçalves, MA, Vairinho, M & Oliveira, V, Study of geochemical anomalies in Mombeja area using a multifractal methodology and geostatistics, In: Buccianti, A, Nardi, G & Potenza, R (Eds.), *Proc. IV IAMG*, vol **2**, De Frede, Napoli, 590-595, 1998.
9. Goovaerts, P, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press, 500 pp, 1997.
10. Panmatier, Y, *Variowin. Software for Spatial Data Analysis in 2D*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.