

Avaliação da neotectônica no município de Angra dos Reis, setor sul-fluminense da Serra do Mar, com base em mapas morfométricos gerados em Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Elizete Domingues Salvador ¹
Jorge Pimentel ²

¹ Serviço Geológico do Brasil – CPRM/Sureg SP
Rua Costa, 55, 01304-010, São Paulo - SP, Brasil
elizete@sp.cprm.gov.br

² Serviço Geológico do Brasil – CPRM/Escritório RJ
Av. Pasteur, 404, 22290-240, Rio de Janeiro - RJ, Brasil
jop@rj.cprm.gov.br

Abstract. Morphotectonic maps applied in neotectonics analysis was first used in 60's and, since then, methods of evaluation of morphometric parameters have been constantly improved with the development of new techniques. In this study, the influence of the Cenozoic tectonics on the landscape dynamics is evaluated in Angra dos Reis city, based on the analysis of the correlation between morphometric (base surfaces and hydraulic gradients) and lineament maps, and geomorphological aspects of the area. The basic elements for map generation were altimetric data of the digital elevation model (DEM) produced by the Shuttle Radar Topographic Mission, SRTM, 90 m data. The analysis of the patterns of hydraulic gradients distribution curves and base surfaces maps allowed to delimitate blocks with distinct characteristics, marked out by NE structures and internal compartments controlled by sets of NE and NW lineaments. Additionally, the geomorphology analysis showed high correlation between these sets of structures and drainage network anomalies or relief pattern discontinuities, which are indicative of neotectonics movements. These anomalous features are observed in distances less than 200 m apart in 50% of these structures and in 77% of the structures with NW direction. On the other hand, considering all the features related to any structure, 54% of them are associated to NE direction.

Palavras-chave: SRTM, geomorphology, morphometric analysis, geomorfologia, análise morfométrica

1. Introdução

A aplicação de mapas morfotectônicos na análise neotectônica foi pioneiramente empregada por V.P. Filosofov em 1960 (*in* Jaim 1980) e, desde então, métodos de construção e avaliação de parâmetros morfométricos vêm sendo constantemente aprimorados com o desenvolvimento de novas técnicas (e.g. Zuchiewicz 1991, Rodrigues 1993, Salvador & Riccomini 1995, Grohmann 2004). Em especial, dados de sensores remotos modelados em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm promovendo, nesta última década, um avanço significativo destes métodos, imprimindo maior agilidade e precisão em sua execução (e.g. Jordan et al. 2005, Valeriano et al. 2006, Grohmann et al. 2007).

Neste estudo, a avaliação da influência da tectônica cenozóica sobre o modelamento da paisagem atual foi baseada na análise da correlação entre mapas morfométricos de superfícies de base (SB), ou isobases, e de gradientes hidráulicos (GH), mapas de lineamentos e de aspectos geomorfológicos, gerados a partir de dados altimétricos do modelo digital de elevação (MDE) produzido na Missão Topográfica por Radar Interferométrico (*Shuttle Radar Topographic Mission* - SRTM).

A área selecionada para a aplicação da metodologia, município de Angra dos Reis, insere-se no setor sul-fluminense da Serra do Mar, que sofreu intensos processos de deformação desde o Neoproterozóico, com geração de estruturas que atuam como zonas de fraqueza na crosta, recorrentemente ativadas. Estes fatores, associados ao estabelecimento e expansão desordenada da ocupação, em área com ocorrência de deslizamentos de massa historicamente notificados, tornam imprescindíveis pesquisas referentes à estabilidade geológica.

2. Fontes de informação e métodos utilizados

A principal fonte de dados para a confecção dos mapas morfométricos de SB e GH e do mapa de lineamentos foi o modelo digital de elevação (MDE), com resolução espacial horizontal de 90 m, versão 4, disponível no *Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI)*, produzido a partir dos dados SRTM originais, de domínio público, do *U. S. Geological Survey - EROS Data Center*.

A confecção do mapa de superfícies de bases seguiu o conceito de Filosofov (1960 *in* Jaim, 1980), utilizando-se a concepção de Strahler (1952) na hierarquização das drenagens. A rede de drenagem foi extraída automaticamente a partir do MDE de onde se selecionou as componentes de 2ª ordem. Esta rede foi rasterizada com valor 1 e combinada com o MDE numa operação de multiplicação para obtenção dos valores de altitude. A vetorização do mapa resultante gerou um arquivo de pontos cotados que foram gridados através de interpolação pelo método do inverso da distância ponderada (IDW) (Philip & Watson 1982), na potência 2, com raio de busca de 2,5 km e considerando os 15 pontos mais próximos, resultando no mapa de superfícies de base. Seguiu-se o traçado das curvas de isobases de 100 em 100 m.

O mapa de gradientes hidráulicos foi gerado conforme o preconizado por Rodrigues (1993) a partir das drenagens de 2ª ordem. Após a extração e hierarquização da rede, para cada componente foi atribuído um par de pontos, na cabeceira e foz, que, combinados com o MDE, geraram uma rede com os valores de altitudes. Cada trecho de drenagem teve sua extensão calculada e ao seu ponto médio atribuiu-se o valor do gradiente hidráulico (Equação 1). Os pontos médios foram gridados, considerando os 20 pontos mais próximos, através de interpolação pelo método Spline (Franke 1982), gerando o mapa de gradientes hidráulicos.

$$GH = [(h_c - h_f) / d] * 100 \quad \text{onde:} \quad (1)$$

h_c = altitude da cabeceira; h_f = cota da foz; d = distância da cabeceira à foz da drenagem

A extração de feições lineares de relevo foi feita a partir de imagens de relevo sombreado, com aplicação de iluminação artificial ao MDE nas declinações de 45°, 270°, 315° e 360°, e elevação de 45°. Feições geomorfológicas indicativas de movimentações neotectônicas, como traçados anômalos da rede de drenagem, pontos de ruptura de escarpa, altos de relevo e capturas de drenagens foram extraídas das cartas topográficas digitalizadas, escala 1:20.000.

3. Resultados e discussão

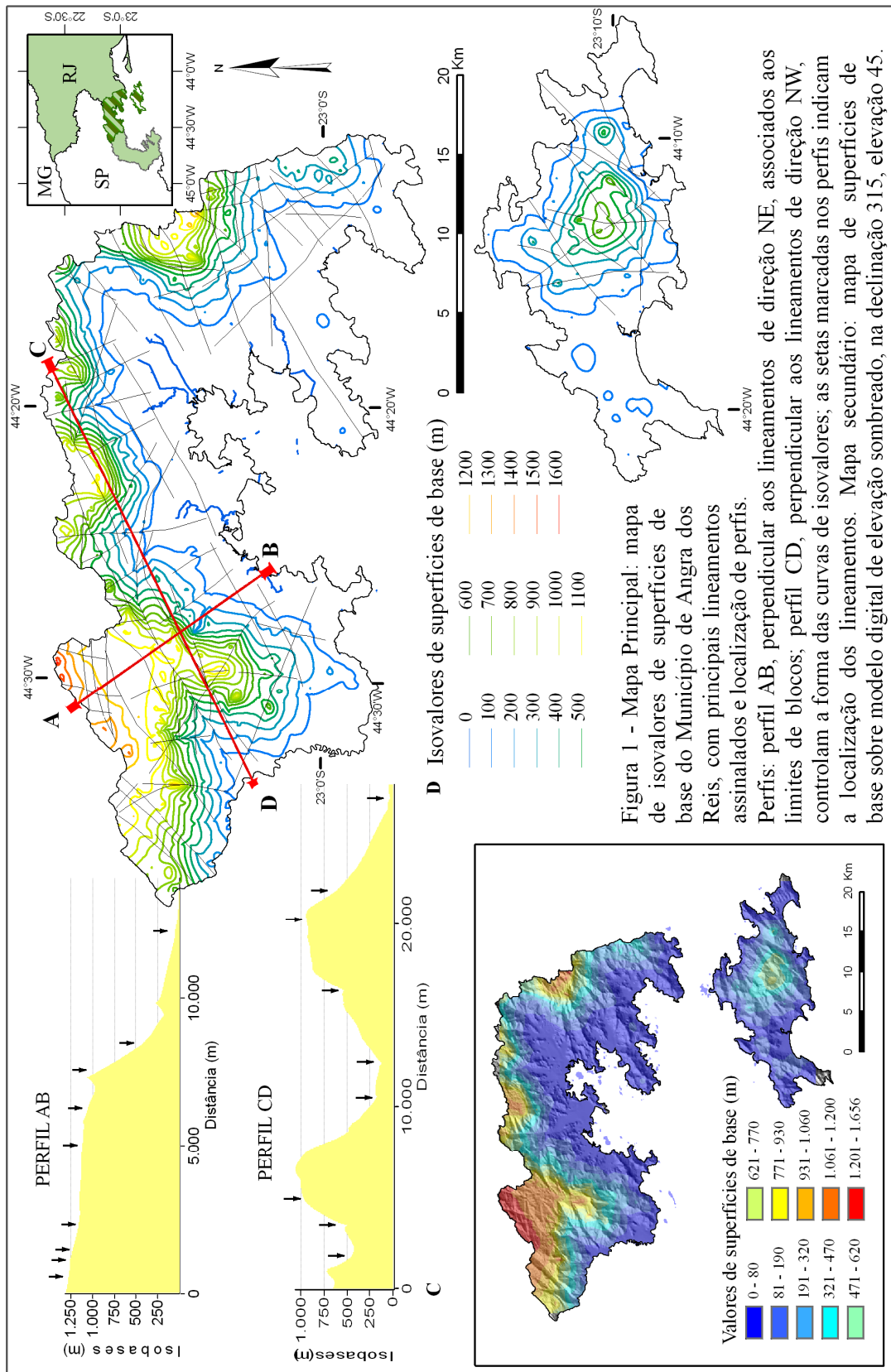
As linhas de isobase que compõem os mapas de superfícies de base delimitam superfícies erosionais sendo, portanto, relacionadas a estágios erosionais ou a eventos tectono-erosionais; os mapas de gradientes hidráulicos visam à definição de blocos com características hidráulicas distintas; ambos, quando construídos a partir de drenagens de 2ª ordem ou superiores, tendem a refletir uma estruturação recente do relevo, abstraindo-se, o entalhamento atual representado pelas drenagens de 1ª ordem.

Desta forma, a análise integrada dos mapas morfométricos e de lineamentos permitiu a identificação de estruturas que controlam a distribuição e a forma das curvas de gradientes hidráulicos e de superfícies de base. Adicionalmente, a análise da geomorfologia evidenciou alta correlação entre estruturas responsáveis pelo controle de curvas de GH e SB e feições anômalas indicativas de movimentações neotectônicas

3.1 Mapa de superfícies de base (SB) X Mapa de lineamentos

A análise do mapa de superfícies de base (Figura 1) permitiu a delimitação de dois blocos delineados pelo comportamento das curvas de isobases, um com valores predominantemente baixos, a sudeste (bloco SB1) e outro apresentando valores elevados, a noroeste (bloco SB2).

A espacialização dos blocos tem limite marcado pelos grandes lineamentos de direção NE, como ser notado no perfil AB (Figura 1), perpendicular às estruturas NE.



O bloco SB1 corresponde, principalmente, à região litorânea, com valores de superfícies de base entre 0 e 350 m. As curvas apresentam-se espaçadas no litoral e nos vales das drenagens mais amplas, com distâncias horizontais alcançando até 5000 m, tornando-se gradativamente mais próximas à medida que se aproximam da Serra do Mar. Após o limite de 350 m mostram uma redução abrupta no espaçamento horizontal, correspondendo à quebra inferior da escarpa da serra, limite com o bloco SB2. Embora a estruturação geral do bloco SB1 esteja associada à direção NE, as formas das curvas são controladas por lineamentos de direção NW.

O bloco SB2 apresenta valores de superfícies de base que variam de 350 a 1650 m. Apresenta curvas pouco espaçadas até a cota de 1000 m, limite superior da escarpa, que tendem a se distanciar nas áreas de platô, onde alcançam seus valores máximos. Semelhante ao observado no bloco SB1, a estruturação geral deste bloco é mantida pelas estruturas NE e a disposição interna das curvas fortemente influenciada pelos lineamentos NW. Este fato pode ser observado nos perfis da Figura 1, onde, no perfil AB, perpendicular às estruturas NE, nota-se a influência desta direção somente nas áreas limites entre os blocos. Por outro lado, o perfil CD, perpendicular às estruturas NW, cortando o bloco SB2, evidencia o controle NW nas quebras das curvas de superfícies de base.

3.2 Mapa de gradientes hidráulicos(GH) X Mapa de lineamentos

Os padrões de distribuição das curvas de GH delimitam dois blocos principais de valores predominantemente elevados, um a noroeste (bloco GH1) e outro a sudeste (bloco GH2), balizados por bloco com baixos valores (GH3) e orientados na direção nordeste (Figura 2). O limite entre os blocos, a exemplo do que ocorre no mapa de SB, é correlacionado à estruturação regional da área, com grandes lineamentos de direção NE (Perfil AB, Figura 2).

No bloco GH1 os maiores valores de gradientes hidráulicos (superiores a 20) delineiam as áreas de escarpa da Serra do Mar; os menores valores ocorrem nos altos platôs, após a quebra superior da escarpa. A compartimentação interna deste domínio, ressaltada pela forma das curvas, é controlada predominantemente por lineamentos NW, por vezes NE (Perfil CD, Figura 2). O bloco GH2 apresenta dimensões reduzidas, mas o comportamento das curvas é semelhante àquele observado no bloco GH1.

O bloco GH3 corresponde à área de valores de gradientes hidráulicos inferiores a 15 observados na região litorânea, entre a costa e a quebra inferior da escarpa da Serra do Mar. Tanto sua estruturação geral, como a forma das curvas são controladas pela direção NE.

3.3 Mapa de anomalias de relevo X Mapa de lineamentos

Nesta análise foram correlacionados elementos da geomorfologia e lineamentos selecionados como responsáveis pelo controle das curvas de SB e de GH. Foram consideradas feições indicadoras de tectônica recente os traçados anômalos da rede de drenagem, pontos de ruptura na base e no topo da escarpa da Serra do Mar, marcas de capturas de drenagens e altos de relevo responsáveis por desvios de drenagens.

As feições de relevo foram agrupadas de acordo com classes de distâncias que se encontram dos lineamentos e os dados resultantes destas relações constam da Figura 3 e das Tabelas 1 e 2.

A Tabela 1 mostra a quantificação do número de lineamentos (totais e separados por classes nas direções E-W, N-S, NE e NW) que estão associados a alguma anomalia de relevo em classes de distâncias (até 100, 150 e 200 m). A observação destes dados permite apontar a ocorrência de uma ou mais anomalias de relevo distantes até 200 m em 48% dos lineamentos, alcançando valores de 77%, quando nos referimos aos lineamentos de direção NW.

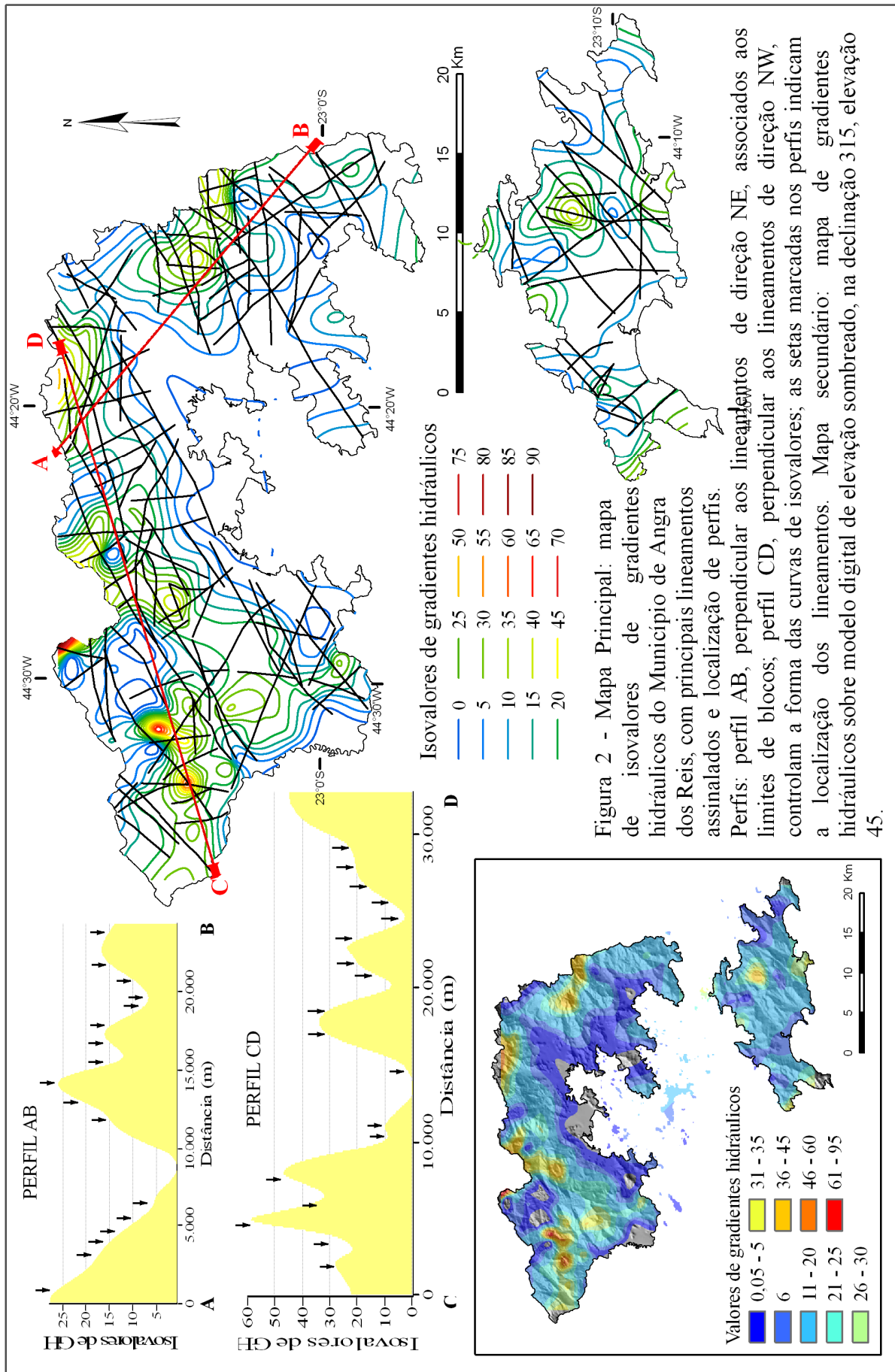


Figura 2 - Mapa Principal: mapa de isovalores de gradientes hidráulicos do Município de Angra dos Reis, com principais lineamentos assinalados e localização de perfis. Perfis: perfil AB, perpendicular aos lineamentos de direção NE, associados aos limites de blocos; perfil CD, perpendicular aos lineamentos de direção NW, controlam a forma das curvas de isovalores; as setas marcadas nos perfis indicam a localização dos lineamentos. Mapa secundário: mapa de gradientes hidráulicos sobre modelo digital de elevação sombreado, na declinação 315, elevação 45.

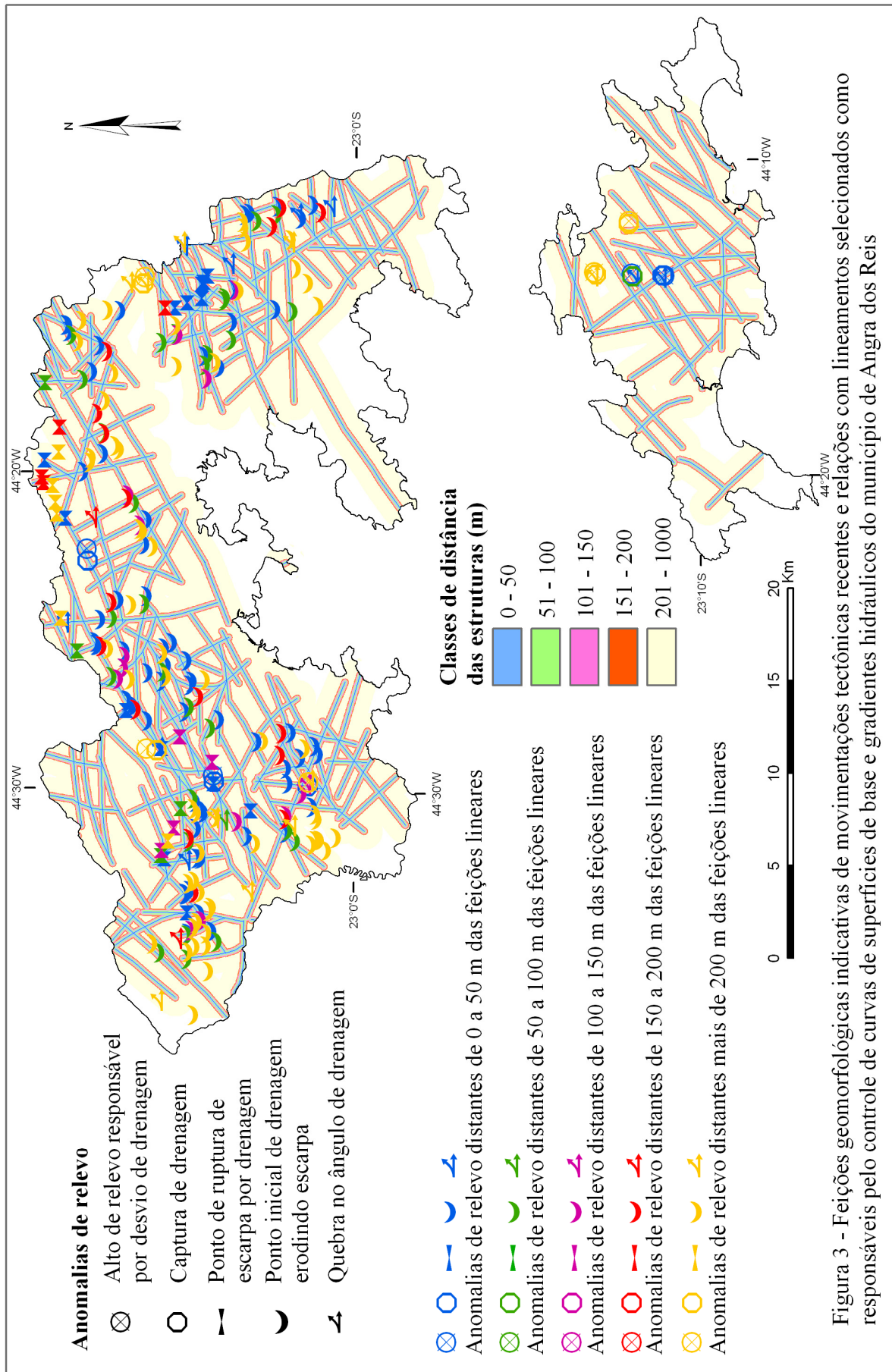


Figura 3 - Feições geomorfológicas indicativas de movimentações tectônicas recentes e relações com lineamentos selecionados como responsáveis pelo controle de curvas de superfícies de base e gradientes hidráulicos do município de Angra dos Reis

Tabela 1. Quantificação do número de lineamentos (totais e classes de direções) que controlam feições da geomorfologia indicativas de tectonismo recente.

Direção de feições lineares	Nº de feições lineares	Nº de feições lineares relacionadas a anomalias em distância de até:		
		100 m	150 m	200m
E-W	44	16 (36%)	17 (39%)	20 (45%)
N-S	39	18 (46%)	19 (49%)	19 (49%)
NW	48	28 (58%)	32 (67%)	37 (77%)
NE	84	22 (26%)	26 (31%)	28 (33%)
Todas direções	215	84 (39%)	94 (44%)	104 (48%)

Tabela 2. Quantificação do número de anomalias de relevo que estão relacionadas a feições lineares. A porcentagem total foi calculada com referência ao número total de feições anômalas de relevo (253) e a porcentagem ponderada, se relaciona ao total de feições contidas em cada classe de distância (classe 100 m: 125, classe 150 m: 145, classe 200 m: 169). Obs: para cada classe as somas das porcentagens ultrapassam 100, já que cada anomalia pode estar relacionada a mais de uma direção.

Direção de feições lineares	Nº de anomalias relacionadas a feições lineares em distância de até:								
	100 m	% total	% ponderada pela classe de distância	150 m	% total	% ponderada pela classe de distância	200 m	% total	% ponderada pela classe de distância
E-W	21	8%	17%	29	11%	20%	35	13%	21%
N-S	25	10%	20%	28	11%	19%	31	12%	18%
NW	33	13%	26%	46	18%	32%	64	24%	36%
NE	63	25%	50%	76	30%	52%	92	36%	54%
Qualquer direção	125			145			169		

Em outra análise, a Tabela 2 quantifica o número de anomalias de relevo que estão relacionadas a feições lineares. A porcentagem total foi calculada com referência ao número total de feições anômalas; a porcentagem ponderada se relaciona ao total de feições controladas por alguma direção estrutural em cada classe de distância. Dessa forma, existem 169 anomalias relacionadas a qualquer direção de lineamentos em até 200 m de distância, sendo que 54% destas feições estão relacionadas à direção NE.

4. Conclusões

A análise integrada dos dados obtidos a partir do modelo digital de elevação (MDE) produzido na Missão Topográfica por Radar Interferométrico (*Shuttle Radar Topographic Mission* - SRTM) evidencia o controle de elementos da tectônica rúptil no comportamento do relevo atual. Os fatores mais relevantes estão sintetizados a seguir.

1. Os padrões de distribuição das curvas de GH delimitam dois blocos com valores elevados, a noroeste e sudeste da área, balizados por bloco com baixos valores; os maiores valores ocorrem nas áreas de escarpa da Serra do Mar. Os blocos são limitados por estruturas NE e a compartimentação interna controlada por conjuntos de lineamentos NE e NW.

2. Do mesmo modo, estruturas NE marcam o limite externo de dois blocos delineados pelo comportamento das curvas de SB, um com valores elevados, a noroeste, e outro

apresentando valores predominantemente baixos, a sudeste. Apesar da influência dos lineamentos NE nas formas das curvas do bloco nordeste, a compartimentação interna é relacionada principalmente às estruturas NW.

3. Adicionalmente, a análise da geomorfologia evidenciou alta correlação entre estruturas responsáveis pelo controle de curvas de GH e SB e feições geomorfológicas indicativas de movimentações neotectônicas. Feições ocorrem, em distâncias inferiores a 200m, em aproximadamente 50% destas estruturas e em 77% das estruturas com direção NW. Por outro lado, do total de feições relacionadas a qualquer estrutura, 54% delas estão associadas à direção NE.

Referências

Franke, R. Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 8, n. 4, p. 237–281, 1982.

Grohmann, C.H. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas à análise morfométrica**. 2004. 21p. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

Grohmann, C.H.; Riccomini, C.; Alves, F.M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 1, p. 10–19, 2007

Jaim, V.E. **Geotectónica general**. Moscou: Mir Ed., 1980. v. 1, 357p.

Jordan, G; Meijninger, B.M.L; van Hinsbergen, D.J.J.; Meulenkamp, J.E.; van Dijk, P.M. Extraction of morphotectonic features from DEMs: Development and applications for study areas in Hungary and NW Greece. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 7, n. 3, p. 163-182, 2005

Philip, G.M. & Watson, D.F. A precise method for determining contoured surfaces. **Australian Petroleum Exploration Association Journal**, v. 22, n. 1, p. 205-212, 1982.

Rodrigues, S.K. **Neotectônica e sedimentação quaternária na região da "Volta Grande" do Rio Xingu, Altamira, PA**. 1993. 106p. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

Salvador, E.D. & Riccomini, C. Neotectônica da região do Alto Estrutural de Queluz (SP-RJ, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 25, n. 3, p. 151-164, 1995.

Strahler, A.N. Dynamic basis of geomorphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952.

Valeriano, M.M.; Kuplich, T.M.; Storino, M.; Amaral, B.D.; Mendes Jr., J.N.; Lima, D.J. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission - 90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1169-1181, 2006.

Zuchiewicz, W. On different approaches to neotectonics: a Polish Carpathians example. **Episodes**, v.14, p. 116-124, 1991.