

Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão - SP

Eymar Silva Sampaio Lopes¹
Paulina Setti Riedel²
Cristina Maria Bentz³
Mateus Vidotti Ferreira²
João Luís Carneiro Naletto²

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
eymar@dpi.inpe.br

² Universidade Estadual Paulista - UNESP
Caixa Postal 178 - 13506-900 – Rio Claro - SP, Brasil
psriedel@rc.unesp.br; mateusvidotti@yahoo.com.br; joaonaletto@gmail.com

³ CENPES – PETROBRÁS
Avenida Jequitibá, 950 – Ilha do Fundão - 121941-598– Rio de Janeiro - SP, Brasil
cris@petrobras.com.br

Abstract. An inventory of landslide data was elaborated based on the interpretation of remote sensing products in the region of the mountain range of Cubatão (SP-Brazil), on a scale of 1:10.000. Aerial photos taken in 1985, 1986 and 1994 were orthorectified and imported into a geographic data base, where 1742 scars were extracted from the images taken in 1985 and another 853 scars from 1994 images. Using SPRING spatial operators, the attributes were calculated using average values of elevation, slope and aspect, zonal majority of the lithological units were calculated, and shape of the slopes, among others. Results show that the basins of the “Rio da Onça” and “Rio das Pedras” presented the highest densities of scars in the events of 1985 and 1994, respectively. The majority of the scars occur preferentially on the slopes with average and high altitudes in the mountain range, above of the elevation 300m, between 35° and 40° of slope, and on the slopes that have a rectilinear profile. It was also noted that practically 75% of the scar polygons have areas measuring less than 400m², limiting their mapping to high resolution sensors like photographic sensors or those that are on board newer satellites such as SPOT 5, IKONOS and QUICKBIRD.

Palavras-chave: geodatabase, landslide, GIS, banco de dados geográfico, escorregamento, SIG.

1. Introdução

Os movimentos gravitacionais de massa do tipo quedas, rastejos, escorregamentos e corridas ocorrem continuamente em diferentes escalas de tempo e espaço, como parte da evolução natural das encostas do relevo da Serra do Mar (Guidicini & Nieble, 1984, IPT, 1988; Wolle, 1988; Wolle e Carvalho, 1989; Fernandes & Amaral, 2003), pois sob condições de clima tropical em relevo escarpado, como é o litoral paulista, tais movimentos ocorrem de modo localizado e generalizado, geralmente decorrentes de eventos pluviométricos intensos.

Os escorregamentos, sobretudo os translacionais, representam os principais processos desse quadro evolutivo, ocorrendo naturalmente nas médias e altas encostas da serra, mesmo em vertentes totalmente isentas de qualquer ação antrópica (Wolle, 1985). Tal tipo de movimento de massa ficou registrado em janeiro de 1985, quando ocorreram eventos de escorregamentos de modo generalizado, no Rio Perequê e afluentes do Rio Mogi – município de Cubatão, onde um grande volume de material foi canalizado pelo sistema de drenagem e transformou-se em corridas de lama e detritos que alcançaram grandes distâncias com alto poder destrutivo. Outro evento, na mesma região, ocorrido em janeiro de 1994 com

características semelhantes, produziu uma centena de escorregamentos no terço superior das encostas nas cabeceiras do Rio das Pedras, que gerou uma corrida de massa que atingiu a refinaria Presidente Bernardes, paralisando a produção por 2 semanas (Gramani, 2001), onde solo, árvores e rocha (blocos de até 6m de comprimento) foram transportados à velocidade estimada por Massad et al. (1997) em 10m/s em um volume de 300.000m³.

A utilização de imagem de sensores remotos obtidos em datas próximas a tais eventos é um produto importante para a elaboração de inventários de cicatrizes deixados pelos escorregamentos. O mapeamento mais preciso das cicatrizes é fundamental para ser utilizado pelos diversos métodos de investigação e análise de estabilidade de taludes, pois permitem calibrar e validar tais métodos.

A área de estudo na **Figura 1** foi escolhida por apresentar um histórico de alta suscetibilidade a movimentos de massa, ocasionada pelas condições geomorfológicas, climáticas e antrópicas. A área foi dividida em bacias de drenagem que deságuam nos rios Mogi e Cubatão, pois dependendo da forma, dimensão, localização e da quantidade de material mobilizado por escorregamentos nessas bacias, pode-se ter canalização desse material, vindo a progredir para corridas com alto poder destrutivo e que podem atingir instalações industriais e residenciais.

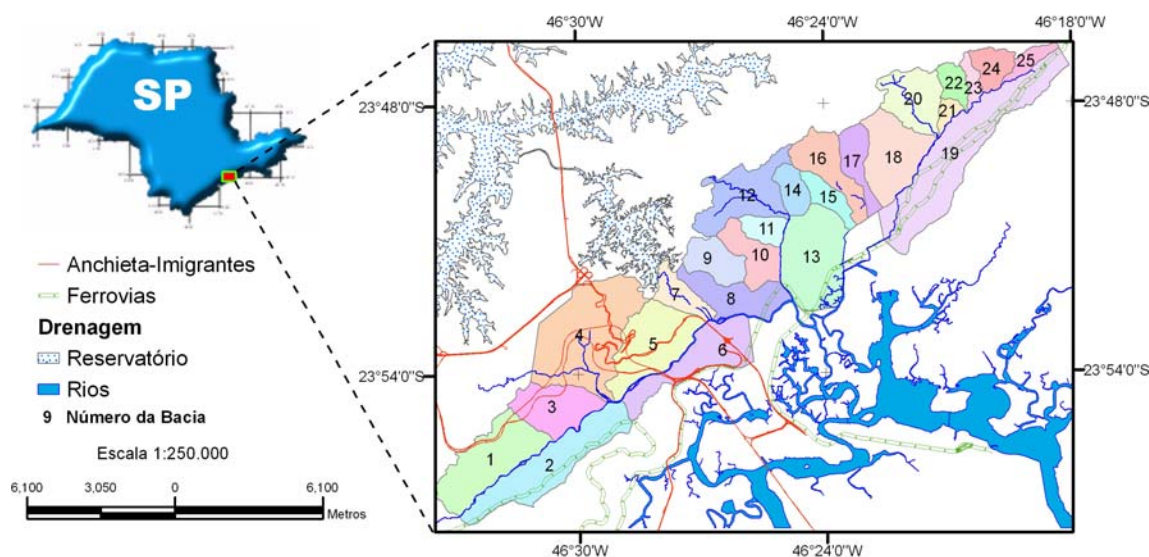


FIGURA 1 – Mapa de localização da área de estudo e divisão em bacias.

Assim, define-se como objetivo desse trabalho elaborar um inventário de cicatrizes de escorregamentos naturais e analisar fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão, na escala 1:10.000, utilizando imagens antigas de sensores fotográficos.

2. Desenvolvimento Metodológico

Os materiais utilizados neste trabalho estão divididos em bases cartográficas (cartas planialtimétricas), mapa de unidades litológicas e fotos aéreas. Os dados de bases planialtimétricas (**Quadro 1**) como estradas, drenagens e amostras de altimetria (isolinhas e pontos cotados), foram obtidos em meio digital para facilitar sua manipulação no BDG (Banco de Dados Geográfico). O mapa com limite das unidades litológicas foi digitalizado do mapa geológico do IPT (1986). As fotos aéreas foram adquiridas em meio analógico e digitalizadas em scanner” (**Quadro 2**).

| Carta | Código | Escala | Instituição |
|------------------------|----------------------------|----------|-------------|
| Rio Passareúva | 3242 / SF-23-Y-C-VI-4-SE-B | 1:10.000 | AGEM |
| Rio Cubatão | 3244 / SF-23-Y-C-VI-4-SE-D | 1:10.000 | AGEM |
| Zanzala | 4213 / SF-23-Y-D-IV-3-NO-C | 1:10.000 | AGEM |
| Serra do Poço | 4214 / SF-23-Y-D-IV-3-NO-D | 1:10.000 | AGEM |
| Caminho do Mar | 4215 / SF-23-Y-D-IV-3-NO-E | 1:10.000 | AGEM |
| Vila Parisi | 4216 / SF-23-Y-D-IV-3-NO-F | 1:10.000 | AGEM |
| Rio Itutinga | 4231 / SF-23-Y-D-IV-3-SO-A | 1:10.000 | AGEM |
| Acaraú | 4233 / SF-23-Y-D-IV-3-SO-C | 1:10.000 | AGEM |
| Campo Grande II | 4221 / SF-23-Y-D-IV-3-NE-A | 1:10.000 | AGEM |
| Raiz da Serra | 4223 / SF-23-Y-D-IV-3-NE-C | 1:10.000 | AGEM |
| Rio Passareúva | SF-23-Y-C-VI-4-SE-B | 1:10.000 | IGC |
| Caminho do Mar | SF-23-Y-D-IV-3-NO-E | 1:10.000 | IGC |
| Rio Itutinga | SF-23-Y-D-IV-3-SO-A | 1:10.000 | IGC |
| Rio Santana | SF-23-Y-D-IV-3-SO-C | 1:10.000 | IGC |
| Bernardino de Campos | SF-23-Y-C-VI-4-SE-A | 1:10.000 | EMPLASA |
| Bairro dos Fincos | SF-23-Y-C-VI-4-NE-D | 1:10.000 | EMPLASA |
| Reserv. Rio das Pedras | SF-23-Y-C-VI-4-NE-F | 1:10.000 | EMPLASA |
| Rio Cubatão | SF-23-Y-C-VI-4-SE-D | 1:10.000 | EMPLASA |
| SANTOS | SF-23-Y-D-IV-3 | 1:50.000 | IBGE / IPT |
| RIACHO GRANDE | SF-23-Y-C-VI-4 | 1:50.000 | IBGE / IPT |

Onde: AGEM = Agência Metropolitana da Baixada Santista; EMLASA = Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A.; IGC = Instituto Geográfico e Cartográfico; IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; IPT = Instituto de Pesquisas Tecnológicas

QUADRO 1 – Bases cartográficas e geológicas utilizadas.

| Tipo/ Instituição | Data | Escala do vôo | Resolução após a ortorretificação | Observação |
|----------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------------|---|
| Ortofoto digital / SMA-PPMA | 04-05- 06/2001 | 1:25.000 | 0,98 metros | Imagens adquiridas em meio digital no formato “Geotiff” e utilizadas como “âncora” para corrigir outros dados |
| Foto Aérea analógico / IGC | 1986 | 1:35.000 | 0,8 metro | Acervo IGC – cópia em papel fotográfico digitalizado em scanner com 600 dpi. |
| Foto Aérea analógico / Base | 1994 | 1:25.000 | 0,8 metro | Acervo UNESP-RC – cópia em papel fotográfico digitalizado em scanner com 600 dpi. |
| Foto Aérea diapositivo / INPE | 08/1985 | 1:25.000 | 0,5 metros | IV color – diapositivo digitalizado em scanner com 900 dpi |

Onde: IGC = Instituto Geográfico e Cartográfico; Base = Base Aerofoto S.A.; INPE = Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

QUADRO 2 – Aerolevantamentos selecionados.

A **Figura 2** mostra as etapas de trabalho utilizadas para elaboração do inventário de cicatrizes e as principais entidades geográficas manipuladas no banco de dados geográfico construído para gerenciar e analisar todas as informações coletadas e produzidas por processamentos internos ou externos ao sistema adotado, no caso, o sistema de geoprocessamento SPRING (Câmara, 1996).

Em um banco de dados no SPRING foi criado um projeto na projeção “Universal Transversa de Mercator” – UTM, modelo da Terra SAD 69 e retângulo envolvente limitado pelas coordenadas W 46° 37’ a W 46° 16’ de longitude e S 23° 58’ a S 23° 42’ de latitude. Todos os dados (mapas/imagens) foram convertidos e importados para tal projeto, fazendo com que todos os planos de informações tivessem o melhor ajuste possível sobre uma base de referência. A base de referência utilizada como “âncora” foram as ortofotos de 2001 com resolução de 0,98 metros e as cartas plani-altimétricas da AGEM na escala 1:10.000.

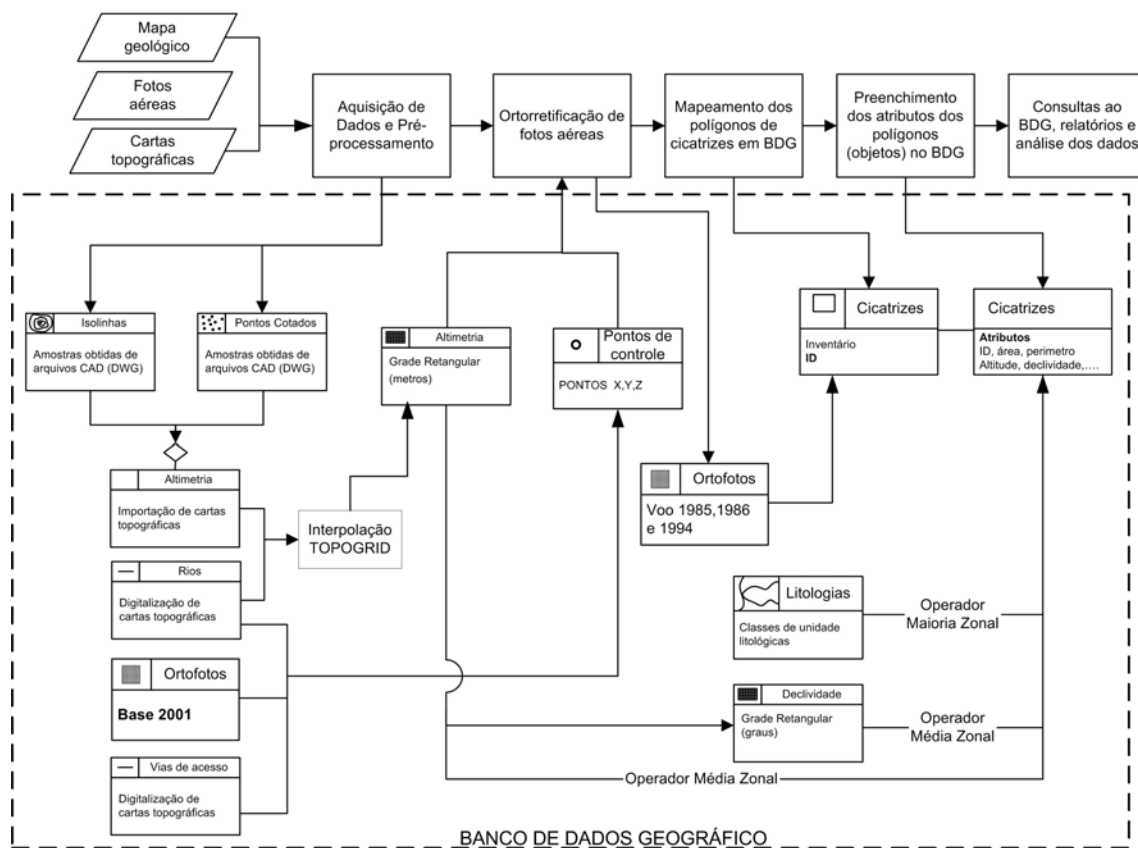


FIGURA 2 – Etapas de trabalho e banco de dados geográfico associado.

- Para as etapas apresentadas na figura acima os seguintes procedimentos foram realizados:
1. Produção de cópia digital e impressa das fotos aéreas dos anos de 1985, 1986 e 1994.
 2. Ortorretificação das fotos aéreas – a operação para criar as orto-imagens requereu; **um modelo numérico de terreno** - MNT criado a partir da base altimétrica, em que foi utilizado o interpolador TOPOGRID disponível no ArcGIS (ESRI, 2005), **parâmetros de orientação interior** como a distância focal e medidas das marcas fiduciais, e ainda **parâmetros de orientação exterior** composto de um conjunto razoável de pontos de controle (coordenadas geográficas X/Y e elevação Z) obtidos da base de referência (ortofotos de 2001 e as cartas plani-altimétricas na escala 1:10.000). Este processamento foi realizado com o programa ENVI 4.2 (RSInc, 2004).
 3. Importação das ortofotos para o BDG – as ortofotos em formato “GeoTIFF” foram importadas e “mosaicadas” no banco de dados geográfico do sistema SPRING.
 4. Extração de cicatrizes em “tela” – em um plano de informação (PI) do modelo cadastral do SPRING, sobreposto às ortofotos, foi feita a extração das cicatrizes por meio de digitalização na tela, através da interpretação visual baseada em características como ausência de vegetação, tamanho, forma e posição na encosta, utilizando-se a sobreposição de curvas de nível da base topográfica digital para favorecer a identificação das feições, recorrendo-se também às fotos originais, montadas sob o estereoscópio de espelho, para o esclarecimento de eventuais dúvidas.
 5. Elaboração do inventário das cicatrizes – os polígonos de cicatrizes foram automaticamente rotulados como objetos no sistema SPRING, atribuindo-lhes um rótulo e nome em Planos de Informações (PI) do modelo cadastral para ano das ortofotos. Como atributos desses objetos foram computados para cada polígono; área, perímetro, bacia de

ocorrência, data de identificação, valores médios da altitude, declividade e orientação da vertente utilizando operador de “média zonal” (Barbosa, 1997), geologia utilizando operador de “maioria zonal” (Barbosa, 1997) e forma da vertente por interpretação visual das cicatrizes sobrepostas à base topográfica (altimetria e rede de drenagem) com preenchimento manual dos atributos com as formas retilínea, côncava e convexa. Outros atributos como eixo maior e menor, coordenadas (X/Y) do cruzamento desses eixos e o ângulo entre o eixo maior e o eixo X, foram calculados para cada polígono.

Todas estas etapas foram efetuadas para garantir um melhor ajuste possível entre as feições extraídas das fotos e aquelas a serem observadas em outras imagens de outras datas. O “perfeito” posicionamento das cicatrizes, inclusive a parte superior descrita como “raiz”, segundo seção típica apresentada na **Figura 3**, foi importante por permitirem seu uso para validar por exemplo, modelos de estabilidade de encostas naturais.



FIGURA 3 – Seção típica do escorregamento translacional raso (planar).

FONTE : Modificado de Santos (2004) e Wolle & Carvalho (1989)

3. Resultados e Discussões

Foram corrigidas 50 fotos aéreas, distribuídas entre os seguintes vôos; 22 fotos de 1985, 10 fotos de 1986 e 18 fotos de 1994. Somente as fotos do vôo de 1994 não recobrem a totalidade da área, deixando de recobrir parte das bacias 18 e 19, e integralmente as bacias 20 a 25.

Como parâmetros de orientação exterior procurou-se obter em torno de 25 pontos para cada foto, além de uma boa distribuição dos pontos na área das fotos. Entretanto, o erro apresentado pelo programa ENVI não é adequado para avaliar a precisão da imagem corrigida, pois é fornecido um valor do “Erro Médio Quadrático” (RMS Error – Root Mean Square Error), que é obtido através de uma equação polinomial de 1º grau, isto é, uma simples transformação de afinidade, muito diferente do modelo fotogramétrico que realmente é utilizado para a ortorretificação de fotografias aéreas. Tal erro é apenas uma estimativa grosseira, utilizado no momento de aquisição dos pontos, para evitar por exemplo, digitação de valores errados, não correspondendo ao erro que será gerado na imagem corrigida.

Notou-se que existe uma relação direta entre o erro e a amplitude altimétrica. As fotos que apresentam uma grande amplitude altimétrica tendem a apresentar um erro maior, enquanto as fotos em áreas com pequena amplitude tendem a apresentar um erro menor. Isso ocorre devido à forma com que o erro é calculado, descrito acima. **A Figura 4** mostra o gráfico de dispersão entre o erro e a amplitude altimétrica das fotos do vôo de 1985.

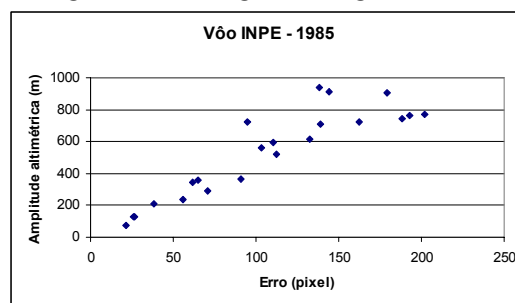


FIGURA 4 – Gráficos mostrando a correlação entre amplitude e erro.

Os arquivos com as ortofotos foram exportados do ENVI no formato GeoTIFF e inseridas no banco de dados, onde foi feita uma avaliação da qualidade do registro dessas imagens por meio de uma inspeção visual, comparando com as ortofotos de 2001 e a base de referência disponível. A **Figura 5** mostra um exemplo de uma imagem original e corrigida, onde é possível observar um bom ajuste com a base de referência.

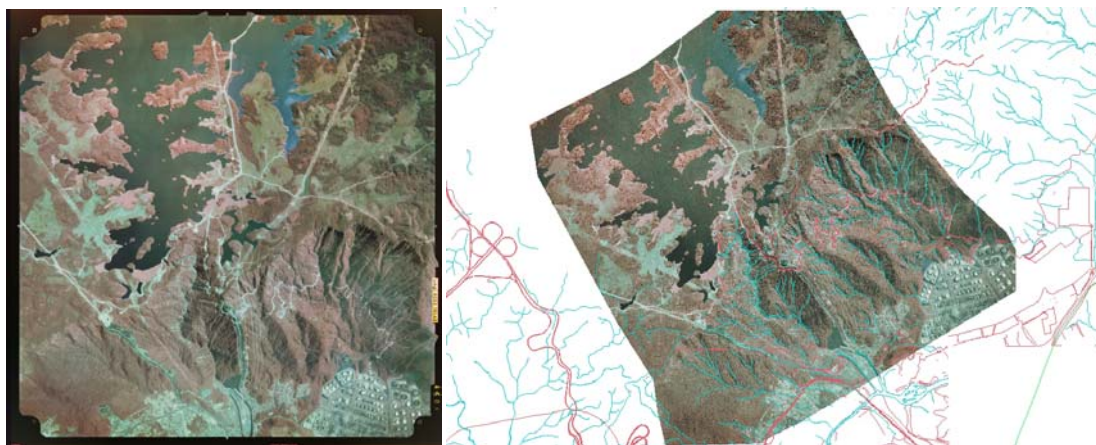


FIGURA 5– Exemplos das fotos aéreas ortorretificadas (vôo de 1985/INPE).

A extração das cicatrizes de escorregamentos foi realizada para toda a extensão da área desse trabalho, onde foram utilizadas as ortofotos de 1985 e 1994. As ortofotos de 1986 do IGC não foram utilizadas pelo fato de não representarem um acréscimo significativo no número de cicatrizes, pois foi realizada uma inspeção cuidadosa nas ortofotos e comparadas com as de 1985 (INPE), onde não foi encontrado nenhum movimento de massa que justificasse seu mapeamento.

A **Figura 6** apresenta o mapa de inventário de escorregamentos produzido para o ano de 1985 e a tabela de atributos associada, armazenados no banco de dados do SPRING. Cada linha da tabela corresponde a uma cicatriz no mapa.

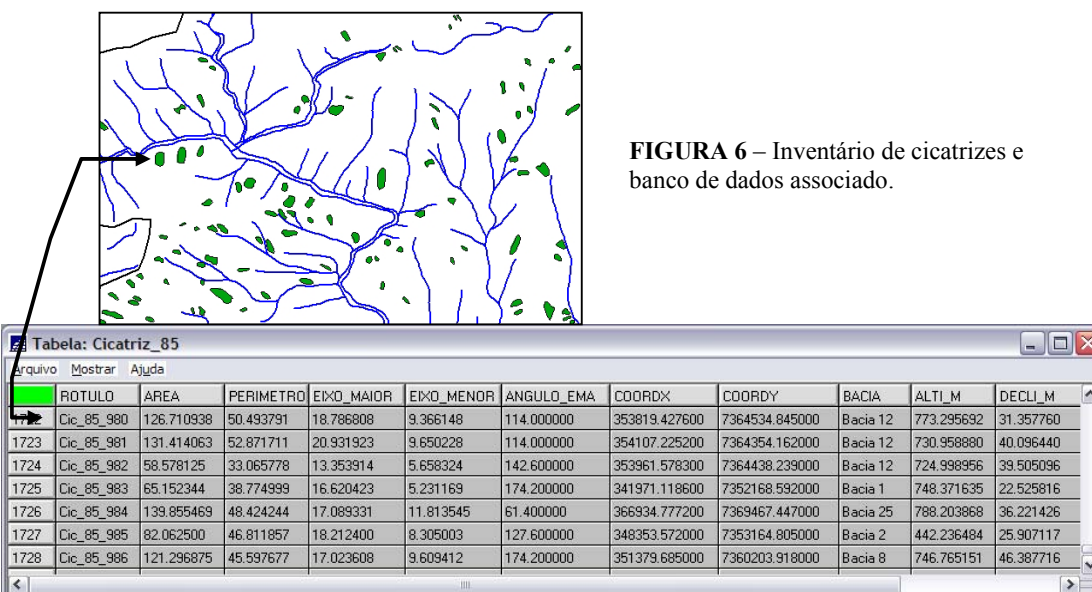


FIGURA 6 – Inventário de cicatrizes e banco de dados associado.

3.1. Cicatrizes por área e por bacias

Foram identificadas e mapeadas 1742 cicatrizes no inventário de 1985 e outras 853 cicatrizes para o ano de 1994, com valores em área resumidos na **Tabela 1**. Observa-se uma distribuição bastante assimétrica dos valores, como pode ser comprovado pelos histogramas na **Figura 7**. Os valores médios de 359,85 m² e 405,92 m² mostram que a grande maioria das cicatrizes, aproximadamente 70%, estão abaixo desses valores. Os valores de quartil superior também indicam que 75% das cicatrizes têm áreas menores que 414,45 m² e 483,86 m², para os anos de 1985 e 1994 respectivamente.

TABELA 1 – Estatística descritiva da área (em m2) das cicatrizes de 1985 e 1994.

| ANO | Mínimo | Máximo | Media | Mediana | Curtose | Assimetria | Quartil inferior | Quartil superior |
|------|--------|---------|--------|---------|---------|------------|------------------|------------------|
| 1985 | 10,51 | 9226,88 | 359,85 | 217,54 | 87,76 | 7,18 | 121,50 | 414,45 |
| 1994 | 22,33 | 3297,32 | 405,92 | 265,15 | 8,70 | 2,60 | 163,53 | 483,86 |

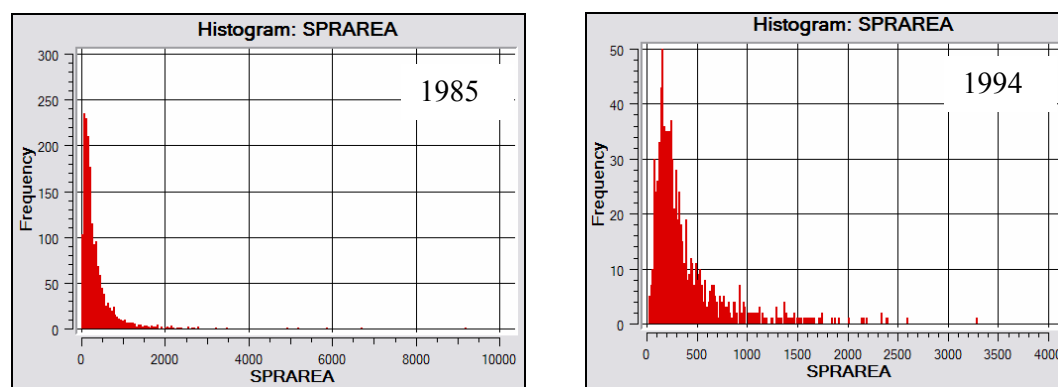


FIGURA 7 – Histogramas das áreas (m²) dos inventários de 1985 e 1994.

Agrupando as cicatrizes por bacias, observa-se que no ano de 1985, onde as chuvas se concentraram mais na porção nordeste da área, principalmente nas bacias do Rio Mogi e Perequê (Wolle, 1988), a bacia 20 (Rio da Onça) foi a que apresentou maior número de cicatrizes, totalizando 347, assim como, maior número de cicatrizes por área, com densidade 64,42. Já no ano de 1994, as chuvas se concentraram mais na porção central da área, resultando num maior número de cicatrizes na bacia 9 (Rio das Pedras), totalizando 182, e na mesma bacia a maior densidade de 51,60.

3.2. Cicatrizes por altitudes e declividade

A **Tabela 2** mostra os valores de número de cicatrizes, declividade média e mediana das cicatrizes por intervalos altimétricos de 150 metros. Observa-se que em ambos os anos, inventário de 1985 e 1994, as cicatrizes predominam nas médias e altas encostas da serraria costeira, conforme relatado por Wolle (1988), com altitude acima dos 300 m. Nota-se também, que praticamente não se alteram os valores médios e medianos de declividade nos diferentes intervalos de altitude, porém, com aumento da altitude há um ligeiro aumento nos valores médios e medianos, variando em torno de 34 a 39 graus (média de 36,4) no inventário de 1985 e de 30 a 37 graus (média 34,64) no inventário de 1994.

Analisando a **Figura 8**, nota-se que as três maiores fatias dos dois gráficos agrupam a grande maioria dos movimentos de massa, em ambas as datas com valores acima dos 300 metros. As fatias de “300 a 450”, “450 a 600” e “600 a 750” totalizam 73% e 69% das cicatrizes para os anos de 1985 e 1994 respectivamente. Em ambos os anos, a maioria dos

escorregamentos ocorreu dentro do intervalo de 600 a 750 metros, isto corresponde a 28% para o ano de 1985 e 34% para 1994.

TABELA 2 – Número de cicatrizes e declividade por intervalo altimétrico.

| | | Inventário - 1985 | | | | | | |
|-----------------------------|---------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|--|
| Intervalos altimétricos | 0 a 150 | 150 a 300 | 300 a 450 | 450 a 600 | 600 a 750 | 750 a 900 | TOTAL | |
| Número de Cicatrizes | 75 | 225 | 397 | 383 | 474 | 171 | 1725 | |
| Declividade mediana (graus) | 34.81 | 35.79 | 35.74 | 38.68 | 39.13 | 38.18 | 37.06 | |
| Declividade média (graus) | 34.07 | 35.25 | 35.42 | 38.27 | 38.46 | 36.93 | 36.40 | |
| | | Inventário - 1994 | | | | | | |
| Intervalos altimétricos | 0 a 150 | 150 a 300 | 300 a 450 | 450 a 600 | 600 a 750 | 750 a 900 | TOTAL | |
| Número de Cicatrizes | 91 | 108 | 123 | 180 | 291 | 60 | 853 | |
| Declividade mediana (graus) | 30.28 | 32.88 | 36.83 | 37.01 | 37.28 | 36.49 | 35.13 | |
| Declividade média (graus) | 29.27 | 33.85 | 36.32 | 37.57 | 36.04 | 34.82 | 34.64 | |

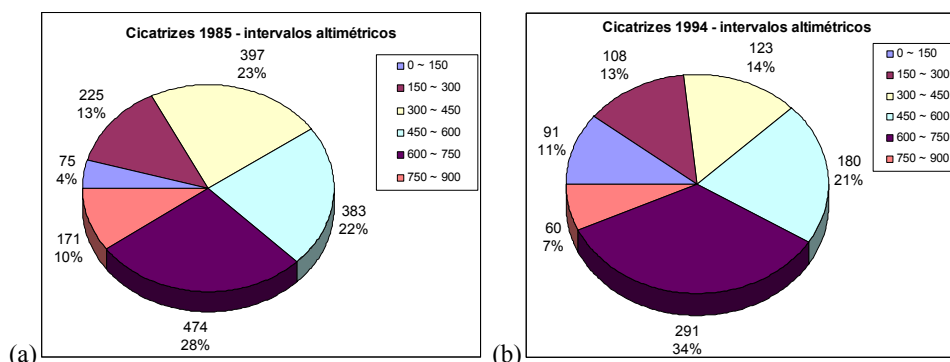


FIGURA 8 – Gráfico das cicatrizes por intervalo altimétrico.

Analisando as cicatrizes em agrupamentos por intervalos de declividade, foi constatado que a maioria dos movimentos de massa ocorre no intervalo de 35 a 40 graus. Agrupando as cicatrizes em intervalos de 5 graus, pode-se observar no gráfico da **Figura 9** que o número de cicatrizes nos dois anos do inventário mantêm-se proporcionais entre os intervalos de declividade, sendo que em 1994 foram registradas menos da metade de movimentos de massa, isto é 48% das cicatrizes ocorridas em 1985.

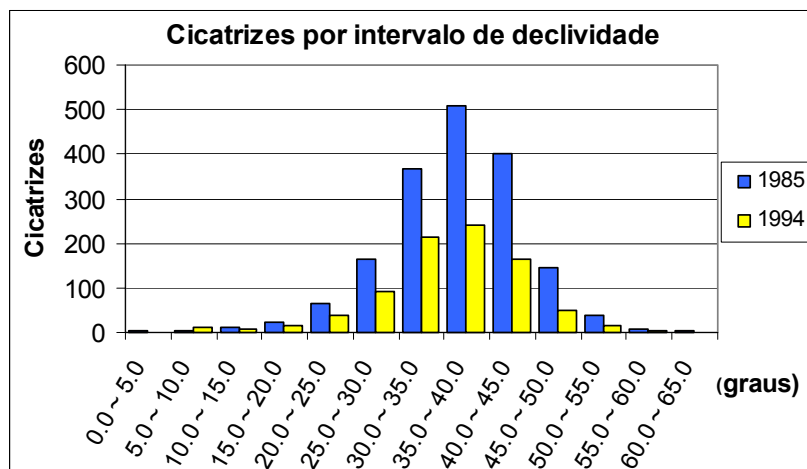


FIGURA 9 – Gráfico das cicatrizes por intervalos de 5 graus de declividade

A **Figura 10** mostra as cicatrizes dos inventários de 1985 e 1994 agrupadas em outros intervalos de declividade. Observa-se que até 30 graus os escorregamentos representam 15% em 1985 e 19% em 1994. A grande maioria encontra-se em três fatias de 5 graus, isto é, “30 a 35”, “35 a 40” e “40 a 45”, totalizando 74% em 1985 e 73% em 1994. Pouco mais da metade de todos os escorregamentos, isto é, 51% em 1985 e 54% em 1994, ocorreram no intervalo de 30 a 40 graus. A partir de 45 graus nota-se uma redução significativa na ocorrência dos escorregamentos, pois as coberturas terrosas tornam-se muito delgadas, deixando de existir a partir dos 50 graus, conforme relato de Wolle e Carvalho (1989).

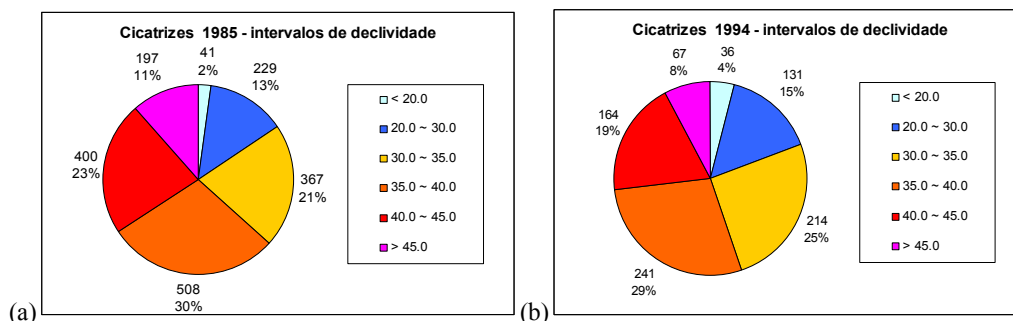


FIGURA 10 – Gráfico das cicatrizes por intervalos de declividade.

3.3. Cicatrizes por unidades litológicas

Analisando-se os resultados das cicatrizes sobrepostas ao mapa geológico, pode-se observar que três unidades litológicas, AcMn, PSeMc e PSpX concentram a grande maioria das cicatrizes, num total de 92% para o ano de 1985 e 93% para 1994. Percentagens menores ficaram com outras litológicas.

A unidade litológica AcMn, de idade arqueana, é representada por migmatitos estromatíticos (ou acamadados - veios de material neossômico¹ paralelos à xistosidade) e ou oftalmíticos (ou oclarar - material neossômico apresenta-se disperso por todo o paleossoma² sob forma de olhos) de neossoma dominante, e ou nebulíticos (não há distinção clara entre o paleossoma e o neossoma). A unidade PSeMc, de idade proterozóica superior, é representado por migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante de biotita-muscovita-clorita xisto com ou sem silimanita e granada. A unidade PSpX, de idade proterozóica superior, é representado por micaxistos com teores variáveis de quartzo, com seixos achatados. Ocorrem megacrístais de microclíneo e plagioclásio.

Segundo Tatizana et al. (1987), os migmatitos com predomínio de neossoma (AcMn), são mais resistentes ao intemperismo químico e geram solos mais arenosos, com menor suscetibilidade de escorregamentos. Já os migmatitos com predomínio de paleossoma xistoso (PSeMc) e os xistos (PSpX) e filitos, produzem solos mais argilosos e com menor resistência ao cisalhamento, sendo mais suscetíveis ao intemperismo químico.

Analisando somente as características litológicas não se explica a maior concentração de escorregamentos nos migmatitos do AcMn, que está sob rochas que teoricamente produziram solos mais resistentes. É necessário analisar outros fatores como a altitude, inclinação das encostas, formas das vertentes onde ocorrem as unidades litológica e também a distribuição das chuvas na época da ocorrência dos movimentos de massa.

Como a distribuição em área das unidades geológicas é bem diversificada, os resultados apresentados acima não explicam o potencial maior ou menor de uma unidade produzir mais

¹ Neossoma ou leucossoma : [Grego: leuco=claro; neo=novo; soma=substância,matéria]. Fases granitóides originadas por fusão parcial e/ou por metassomatismo e que permeiam porções mais máficas (paleossoma) em migmatitos heterogêneos

² Paleossoma ou melanossoma : [Grego: paleo=antigo; soma:substância,matéria]. Em migmatitos heterogêneos, a porção mais máfica (teores expressivos de Fe e de Mg) e que corresponde a rocha original.

ou menos movimentos de massa. Assim, foram selecionadas as duas bacias com maior ocorrência de cicatrizes nos anos de 1985 e 1994, isto é, as bacias 20 e 9 respectivamente, onde foram analisadas a densidade de cicatrizes por unidades geológicas.

A **Tabela 3**, mostra os resultados da densidade de cicatrizes por unidades geológicas (as três mais frequentes – AcMn, PSeMc e PSpX), onde pode-se observar a real contribuição de cada unidade. Observa-se que a unidade PSeMc é a que apresenta maior densidade de cicatrizes, mesmo ocupando uma pequena área como na bacia 9.

TABELA 3 – Densidade de cicatrizes por unidade geológica das bacias 9 e 20.

| 1985 (Bacia 20) | | | | 1994 (Bacia 9) | | | |
|-------------------|-------------------------|-----|---------|-------------------------|-----|---------|--|
| Unidade Geológica | Área (km ²) | NC | NC/Área | Área (km ²) | NC | NC/Área | |
| ■ PSpX | 1.646 | 74 | 44,950 | 0,352 | 3 | 8,518 | |
| ■ PSeMc | 1.720 | 126 | 73, 238 | 0,388 | 48 | 123,711 | |
| ■ AcMn | 2.020 | 147 | 72,785 | 2.534 | 131 | 51,699 | |
| Total | 5.386 | 347 | 64.42 | 3.527 | 182 | 51.60 | |

Onde : NC = número de cicatrizes, NC/Área = densidade de cicatrizes por km² .

As características petrológicas da unidade PSeMc realmente favorecem uma menor resistência ao cisalhamento, devido à existência de minerais xistosos. Entretanto, ainda não é conclusivo afirmar que está unidade sempre favorecerá a uma maior ocorrência de escorregamentos. O que pode-se notar é que há uma convergência de fatores que favorecem a ocorrência dos escorregamentos nessa unidade, pois ocupa justamente as porções mais altas da serra, a declividade média é ligeiramente maior nessas porções e ainda as precipitações predominantes estão associadas, segundo Tatizana et al (1987), com frentes frias vindas do pólo sul que permanecem por 2 a 4 dias em regime de chuva contínua e com frequências pluviais mais elevadas na porções mais elevadas da serra, decorrentes basicamente do efeito orográfico.

3.4. Cicatrizes por forma de encosta

A **Tabela 4** mostra os resultados das cicatrizes agrupados nas três formas de vertentes e a declividade média calculada a partir do atributo da tabela para cada uma das formas. A maioria dos movimentos de massa ocorrem nas vertentes retilíneas, 70% no ano 1994 e 61% no ano de 1985, conforme já relatado por diversos autores como Tatizana et al. (1987), Wolle (1988), IPT (1988), Wolle & Carvalho (1989) e CETESB (1991), dentre outros.

TABELA 4 – Número de cicatrizes por forma de vertente e declividade média.

| Ano | 1994 | | | 1985 | | |
|-------------------|------------|------|---------------------------|------------|------|---------------------------|
| | Cicatrizes | | Declividade média (graus) | Cicatrizes | | Declividade média (graus) |
| Forma de Vertente | num. | % | | num. | % | |
| Retilínea | 597 | 70% | 36.09 | 1067 | 61% | 37.44 |
| Convexa | 142 | 17% | 33.12 | 483 | 28% | 35.72 |
| Côncava | 114 | 13% | 33.99 | 192 | 11% | 36.26 |
| total | 853 | 100% | | 1742 | 100% | |

Observa-se ainda que as vertentes retilíneas são as que apresentam maiores valores de declividade, 36 e 37 graus em média para os anos de 1994 e 1985, e são nestas vertentes que os horizontes de solo acompanham a topografia, produzindo espessuras bastante reduzidas de massa a serem mobilizadas (Wolle, 1988).

3.5. Considerações a respeito do inventário de cicatrizes

Além da importância fundamental de se ter as cicatrizes mapeadas com uma boa precisão, produto do trabalho de ortorretificação das fotos aéreas, para serem utilizadas nos modelos geoambientais, os atributos preenchidos com informações do meio físico, permitiram uma melhor compreensão do processo de movimentos de massa na região.

A maior ou melhor ocorrência de escorregamentos translacionais rasos em algumas bacias e em determinadas porções dessas, não são explicadas por uma ou duas condicionantes apenas. A complexidade e multivariabilidade dos condicionantes tornam muito difíceis uma ponderação real desses, no processo de instabilização das encostas naturais.

Para atribuir pesos a todas as condicionantes, sem dúvidas os fatores morfológicos como declividade e forma de encosta são os mais importantes. Tais fatores estão aliados evidentemente a regimes pluviométricos intensos, principalmente com aumento da precipitação em direção as partes mais altas da serra, reflexo do efeito de resfriamento causado pela expansão adiabática do ar em ascensão (Tatizana et al., 1987).

Apesar da variabilidade litológica, com rochas mais ou menos brandas e com diferentes graus de intemperismo químico e físico, não foi possível afirmar que uma determinada litologia é mais favorável à ocorrência de escorregamentos. Mesmo na literatura, não existem trabalhos conclusivos que analisam individualmente esta condicionante.

4. Conclusões

A elaboração do inventário de cicatrizes de escorregamentos permitiu conhecer as regiões onde o processo se desenvolveu com maior ou menor intensidade. Isto auxiliou tanto na compreensão dos fatores condicionantes do processo, quanto no mapeamento dos locais com maior ocorrência histórica dos movimentos de massa e com maior probabilidade de reincidência.

Apesar da ocorrência generalizada de escorregamentos como nesses eventos de 1985 e 1994, este tipo de movimento de massa não seria possível de ser mapeado, isto é, extrair cada polígono de cicatriz, utilizando imagens de satélites como as dos sensores TM e ETM+ do Landsat, com resoluções espaciais de 30 e 15 metros, assim como o CCD do CBERS, com resolução de 20 metros, pois praticamente 75% dessas possuíam valores de área menores do que 400m².

Pode-se constatar que a forma triangular de algumas bacias, áreas restritas, um padrão subdentítico e de treliça conjugados do sistema de drenagem, altas distâncias entre interflúvios, vales em “V” encaixados e com vertentes retilíneas, são condicionantes importantes na captação de água, pois permitem uma rápida concentração e altos picos de vazão, como ocorreu com a bacia 20 no ano de 1985 e na bacia 9 no ano de 1994, e que apresentaram as maiores densidades de escorregamentos por km², criando o cenário favorável ao desenvolvimento de corridas de massa.

A distribuição espacial das cicatrizes permitiu confirmar o que outros trabalhos da literatura relatam, isto é, a maioria das cicatrizes ocorre preferencialmente nas médias e altas encostas da serra, acima da cota 300m, entre 35° e 40° de declividade e nas vertentes com perfil retilíneo.

De todos os fatores condicionantes dos movimentos de massa, constatou-se que a geomorfologia é a mais importante, em que a declividade tem o papel fundamental, seguido pela forma de vertente.

Agradecimentos

Pelo apoio financeiro do CENPES - PETROBRAS através do projeto “Avaliação de produtos de sensoriamento remoto e técnicas de processamento digital como contribuição ao monitoramento dos movimentos de massa na região de Cubatão, SP” e autorização da publicação dos dados.

Referências

- BARBOSA, C.C.F. **Álgebra de mapas e suas aplicações em sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 1997. 152p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos.
- CÂMARA, G; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, n.20: (3), p.395-403, May-Jun 1996.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) **Carta morfodinâmica da Serra do Mar na região de Cubatão - SP**. São Paulo, 1991. Relatório DTAE 07/91 do Projeto 310200.
- ESRI – Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop Help. Redlands, California, USA, 2005.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 4.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. Cap. 3, p. 123-194.
- GRAMANI, M.F. Caracterização **geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. 2001. 372f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos) – EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2.ed. São Paulo. Edgard Blücher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1984. 194p.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Estudo geotécnico dos principais mecanismos de instabilização na Serra do Mar**. São Paulo, 1988. Relatório n 25957.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Levantamentos básicos na folhas de Santos e Riacho Grande, Estado de São Paulo**. São Paulo, 1986. Relatório n 23394, 5 vol.
- MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A.; ARAUJO FILHO, H.A. Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments. In: PANAMERICANO SYMPOSIUM LANDSLIDES, 2 - COBRAE, 2, 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: p.213-222.
- RSInc - Research Systems, Inc. ENVI 4.2, 2004. 1 Arquivo. Disponível em:<<http://www.rsinc.com/envi/>>.
- SANTOS, A.R. dos **A grande barreira da Serra do Mar – Da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes**. O Nome da Rosa ed. São Paulo, 2004. 122p.
- TATIZANA, C. et al. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5, 1987, São Paulo. **Anais**. São Paulo: ABGE, 1987a ,v.2, p.225-236.
- WOLLE, C.M. **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas**. São Paulo, 1988. 394p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP.
- WOLLE, C.M. Slope stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1, 1985, Brasília. Progress Report. t.3.2, 51 p. (Discussion).
- WOLLE, C.M. & CARVALHO, C. S. Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. **Solos e Rochas**, v. 12, p. 27-36, 1989.