

Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento

Fernando Shinji Kawakubo¹
Rúbia Gomes Morato¹
Kleber Cavaça Campos²
Ailton Luchiar¹
Jurandyr Luciano Sanches Ross¹

¹Departamento de Geografia - FFLCH/USP
Av. Prof. Lineu Prestes, 338 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-000
fsk@usp.br

² Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – IGC/USP
Rua do Lago, 562 - Cidade Universitária – São Paulo – SP - CEP 05508-080
kavkamp@usp.br

Abstract. The purpose of this paper is to map the environmental fragility employing Digital Elevation Model and field algebra. The method used based in a empirical model of fragility proposed by Ross (1994). The results showed the importance of computational techniques in the production of intermediate and syntheses maps.

Palavras-chave: MNT, derivações cartográficas, mapa síntese, fragilidade ambiental.

1. Introdução

O mapa de fragilidade ambiental constitui uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial ambiental. O mapeamento da fragilidade ambiental permite avaliar as potencialidades do meio ambiente de forma integrada, compatibilizando suas características naturais com suas restrições.

A metodologia da fragilidade empírica proposta por Ross (1994) fundamenta-se no princípio de que a natureza apresenta funcionalidade intrínseca entre suas componentes físicas e bióticas. Os procedimentos operacionais para a sua construção exige num primeiro instante os estudos básicos do relevo, solo, geologia, clima, uso da terra e cobertura vegetal etc.. Posteriormente, essas informações são analisadas de forma integrada gerando um produto síntese que expressa os diferentes graus de fragilidade que o ambiente possui em função de suas características genéticas.

O princípio da funcionalidade intrínseca baseia-se no conceito de Unidade Ecodinâmica preconizada por Tricart (1977). De acordo com Ross (1994), dentro desta concepção ecológica o ambiente é analisado sob o prisma da Teoria do Sistema que parte do pressuposto que na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações em equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio, entretanto, é freqüentemente alterado pelas intervenções humanas, gerando estados de desequilíbrios temporários ou até permanentes.

Diante dos diferentes estados de equilíbrio e desequilíbrio que o ambiente está submetido, Ross (1994) sistematizou uma hierarquia nominal de fragilidade representadas por códigos: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5). Estas categorias expressam especialmente a fragilidade do ambiente em relação aos processos ocasionados pelo escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais.

É denominado de fragilidade potencial a vulnerabilidade natural do ambiente e de fragilidade ambiental a vulnerabilidade natural associada aos graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem.

As etapas intermediárias para a elaboração do mapa síntese seguem as construções das cartas de declividade (nas escalas de detalhe, como 1: 25000, 1: 10000, 1: 5000 e 1: 2000) ou padrões de formas do relevo (nas escalas médias e pequenas, como 1: 50000, 1: 100000, 1: 250000), de solo e de uso e cobertura vegetal. As informações de geologia e clima são utilizadas em conjunto com as demais cartas como informações adicionais, podendo ser incorporadas na análise síntese.

Os intervalos de declividade obedecem aos estudos já consagrados de capacidade de uso/aptidão agrícola associados aos valores críticos da geotécnica. Eles indicam respectivamente o vigor dos processos erosivos, dos riscos de escorregamento/deslizamento e inundações frequentes. Para o padrão de formas, a matriz do índice de dissecação do relevo é utilizado (Ross, 1992), que é baseado na relação de densidade de drenagem/dimensão interfluvial média para a dissecação no plano horizontal e nos graus de entalhamento dos canais de drenagem para a dissecação no plano vertical.

A fragilidade do solo ou erodibilidade corresponde à vulnerabilidade do solo à erosão. As diferenças nos atributos físicos e químicos explicam em muitos casos o fato de alguns solos erodirem mais que outros mesmo estando expostos a uma mesma condição ambiente.

Outro elemento que interfere no processo erosivo é o tipo de uso do solo e a cobertura vegetal. Além de proteger o solo contra a perda de material, o uso adequado e a cobertura vegetal o protege direta e indiretamente contra os efeitos modificadores das formas do relevo.

O mapeamento da fragilidade ambiental exige a execução de inúmeros produtos intermediários que auxiliam na análise do produto final. O objetivo deste trabalho consiste em mapear a fragilidade ambiental utilizando técnicas de geoprocessamento, como Modelagem Numérica do Terreno (MNT), Sensoriamento Remoto (SR) e álgebra de campo. A partir do MNT foram geradas cartas derivadas que auxiliaram na elaboração dos produtos intermediários. Os dados de SR foram utilizados para a confecção do mapa de uso e cobertura vegetal. A álgebra de campo permitiu combinar as diferentes informações gerando o mapa síntese.

A área de estudo corresponde à bacia do córrego do Onofre, localizada no município de Atibaia, São Paulo. O crescimento acelerado da população, assim como de sua estrutura urbana, tem pressionado os órgãos públicos a criação de novas áreas de assentamento urbano. O mapeamento da fragilidade do ambiente constitui, portanto, numa importante ferramenta que auxilia no ordenamento adequado do meio, indicando as áreas mais favoráveis e menos favoráveis à sua ocupação. Além disso, o seu mapeamento é importante pela diversidade em termos de ocupação e de problemas ambientais e pela presença de um ponto de captação de águas destinadas ao abastecimento público.

2. Área de estudo

A área de estudo corresponde à bacia hidrográfica do córrego do Onofre, principal afluente do rio Atibaia no município. A bacia está localizada na porção sul do município de Atibaia e drena uma área de aproximadamente 7800 hectares. O município situa-se a nordeste da cidade de São Paulo, nas coordenadas 23° 07' de Latitude Sul e 46° 33' de Longitude Oeste. O seu acesso se dá por duas rodovias principais: Fernão

Dias (BR – 381), que interliga São Paulo - Belo Horizonte; e D. Pedro I (SP – 065), que faz a interligação Campinas-Jacareí. A **figura 1** localiza a área de estudo.

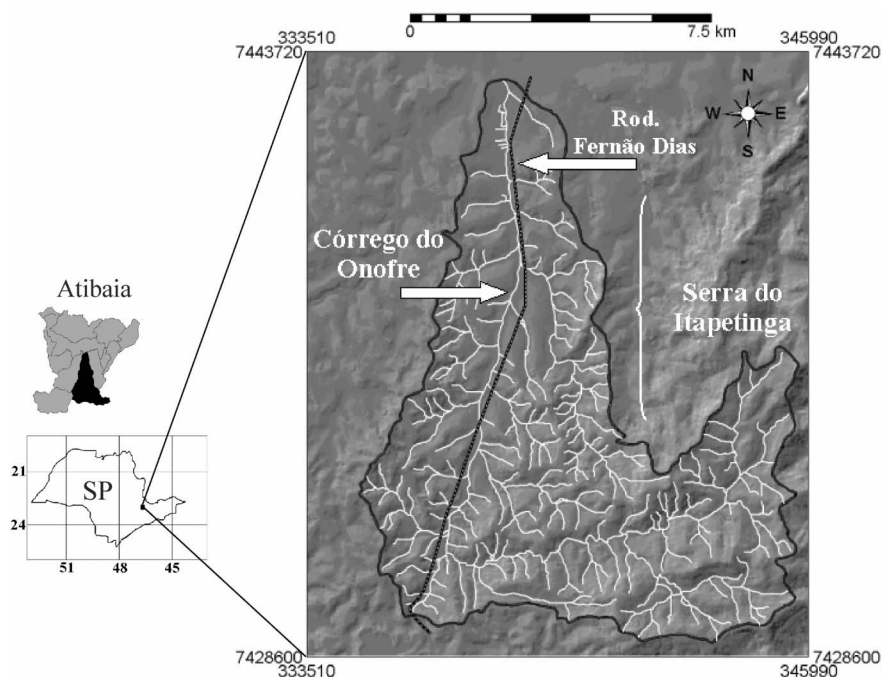


Figura 1. Localização da bacia do córrego do Onofre no município de Atibaia e em relação ao estado de São Paulo.

Segundo Silva (2001), a bacia é dividida em cinco unidades geomorfológicas formadas pelas: (1) *Serras Alongadas*, (2) *Morrotes com Serras Restritas*, (3) *Morrotes*, (4) *Colinas* e (5) *Depósitos Aluvionares*.

A unidade formada pelas *Serras Alongadas* corresponde à região da serra do Itapetinga, caracterizada por elevadas declividades, afloramentos rochosos e solos pouco desenvolvidos. O substrato rochoso é composto predominantemente por Suítes Graníticas. Na unidade *Morrotes com Serras Restritas*, as declividades variam de média a alta, desenvolvendo principalmente os solos Podzólicos. A geologia é composta pelas rochas do Complexo Amparo. Os *Morrotes* localizam-se na região central da bacia ao longo da Rodovia Fernão Dias. São áreas com declividades variadas. Apresenta solos Podzólicos nas áreas sustentadas pelas rochas do Complexo Amparo e Latossolos nas áreas com menores declividades sustentadas por materiais coluvionares (Terciário) localizados nos sopés de morros. A unidade formada pelas *Colinas* corresponde à área mais urbanizada dentro da bacia (norte). As declividades são baixas, e os solos são espessos (Latosolos) desenvolvidos sobre material coluvionar. Os depósitos *Aluvionares* (Quaternário) são delimitados pela planície aluvial do córrego do Onofre. Os solos são profundos e mal drenados; em geral são argilosos com ocorrência de hidromorfismo e gleização.

O clima da região é do tipo Cfb, segundo a classificação de Koeppen, que é temperado com temperaturas relativamente elevadas durante todo o ano. A média anual é de 19,7°C, variando entre 15,9°C em julho a 22,3°C em fevereiro. Os meses de maiores índices de chuva são de dezembro e janeiro, com totais de 204,6mm e 260,8mm, respectivamente (Silva, 2000). O período de seca ocorre de abril a setembro.

3. Material e método

A primeira etapa do trabalho consistiu na digitalização das cartas topográficas na escala 1: 10 000 (IGC, 1977), de solo (Silva, 2000) e de geologia (Próminério, 1985) utilizando um programa de vetorização semi-automático. Quatro Planos de Informação (PI) foram separados da carta topográfica: PIs temáticos de drenagem e estrada e PIs numéricos de curvas de nível e pontos cotados. Os segmentos dos mapas de solo e de geologia (PIs temático), por se tratarem de polígonos (áreas sólidas), tiveram de ser poligonizados utilizando um algoritmo de conversão segmento-polígono.

Foram gerados a partir das curvas de nível e pontos cotados dois Modelos Numéricos do Terreno (MNTs) utilizando os Modelos de Grade Regular Retangular (MGRR) e Irregular Triangular (MGIT). Estes dois modelos de grade apresentam diferenças tanto em suas propriedades computacionais quanto em suas aplicações. Assim, o MGRR é mais eficiente para aplicações qualitativas e o MGIT para aplicações quantitativas. Em vista das diferenças que cada modelo proporciona, as duas estruturas foram utilizadas como forma de explorar com maior eficiência as suas potencialidades. Antes da modelagem, as curvas de nível digitalizadas foram simplificadas utilizando o algoritmo de generalização de Douglas e Peucker (1973). O objetivo desta generalização foi excluir as amostras redundantes e aumentar a agilidade do processamento.

Para a estimativa do MGRR, foi adotado um tipo de interpolador média móvel conhecido como média ponderada com busca de vizinhança por cota e quadrante (a busca de pontos vizinhos é feita restringindo o número de pontos por quadrante e por valor de elevação). Diferentemente do MGRR cuja estimativa é feita diretamente sobre a amostragem, no MGIT é necessário inicialmente a estruturação da triangulação (obedecendo os critérios de *Delaunay*). Posteriormente um ajuste de superfície é aplicado em cada triângulo para garantir a continuidade da superfície. O ajuste de superfície utilizado neste trabalho foi o ajuste polinomial de quinta ordem proposto por Akima (1978), que apresenta maior suavidade que o ajuste linear (Felgueiras e Goodchild, 1995).

O mapa de uso da terra e cobertura vegetal foi elaborado a partir das imagens Landsat 7 ETM, bandas 3, 4 e 5 (órbita 219/76 de setembro de 1999). Inicialmente, as imagens foram georreferenciadas utilizando pontos de controle identificados na imagem e na base cartográfica digitalizada. Após a identificação dos pontos de controle, as imagens foram reamostradas utilizando o interpolador vizinho mais próximo. Como forma de realçar os diferentes tipos de usos e cobertura, a técnica de fracionar o pixel em diferentes componentes de mistura (denominado de Modelo Linear de Mistura Espectral) foi aplicado sobre as três bandas gerando três imagens fração: sombra, vegetação e solo exposto. A estimativa de mistura fundamentou-se na metodologia desenvolvida por Shimabukuro e Smith (1991) que se baseia nos critérios dos mínimos quadrados. As três imagens fração decompostas pelo modelo de mistura foram utilizadas como imagem de entrada para o processo de segmentação. O processo de classificação e edição dos erros do mapa final são descritos no trabalho de Kawakubo et al. (2003). Cinco classes de uso e cobertura vegetal foram mapeados segundo as seguintes características: Mata: constituída pela predominância de vegetação arbórea localizada principalmente na região da serra do Itapetinga; Capoeira/Pastagem: vegetação arbustiva localizadas em regiões de campo antrópico; Urbano 3: constituídos por chácaras e condomínios de alto padrão com alta densidade de vegetação; Urbano 2: áreas de expansão urbana, localizadas ao longo da Rodovia Fernão Dias com presença de muitos lotes e de solo exposto; Urbano 1: Corresponde ao núcleo urbano mais consolidado de Atibaia.

Após a implementação dos diversos produtos intermediários que norteiam direta e indiretamente a análise da fragilidade, os mapas de declividade, solo, e uso da terra/cobertura vegetal foram hierarquizados segundo os respectivos códigos de fragilidade para a derivação do mapa síntese. Dois métodos de combinação de mapas (álgebra de campo) foram empregados para a elaboração do mapa-síntese: booleano e tabela de dupla entrada. Os resultados são apresentados a seguir.

4. Resultados

Cinco classes de fragilidade variando de Muito Fraca (1) a Muito Forte (5) foram estabelecidas. Para as variáveis declividade e solo, a fragilidade é maior com o aumento do código. Para a variável uso e cobertura vegetal os códigos mais altos expressam os menores graus de proteção. Os **quadros 1, 2 e 3** descrevem a fragilidade do ambiente em relação a essas três variáveis.

Fragilidade	Categorias hierárquicas	Código
Muito Fraca	até 6%	1
Fraca	de 6 a 12%	2
Média	de 12 a 20%	3
Forte	de 20 a 30%	4
Muito Forte	acima de 30%	5

Quadro 1. Classes de fragilidade das declividades

Fragilidade	Categorias hierárquicas	Código
Muito Fraca	LVA	1
Forte	PVA	4
Muito Forte	PVA2	5
Média	PVA/LVA	3
Forte	PVA/C	4
Forte	C/PVA	4
Muito Forte	GM	5
Muito Forte	RL/C	5

LVA = Latossolo Vermelho Amarelo; PVA = Argissolos Vermelho Amarelo; C = Cambissolo; GM = Hidromórficos; RL = Neossolos Litólicos.

Quadro 2. Classes de fragilidade dos solos

Proteção	Categorias hierárquicas	Código
Muito Alta	Mata (1)	1
Alta	Cap./Past.(2)	2
Baixa	Urbano3 (4)	4
Alta	Urbano2 (2)	2
Muito Alta	Urbano1(1)	1

Quadro 3. Classes de proteção de uso e cobertura vegetal

A primeira combinação de mapas realizada utilizou o operador booleano interseção AND. Nele foram geradas duas classes: verdadeira e falsa. A hipótese estabelecida foi selecionar somente as áreas que não possuem alta ou muito alta fragilidade em todos os mapas considerados. A classe verdadeira restringiu-se basicamente à busca de áreas que possuem apenas os códigos 1, 2 e 3 de fragilidade (fragilidade Muito Fraca a Média). A **figura 2** ilustra o resultado.

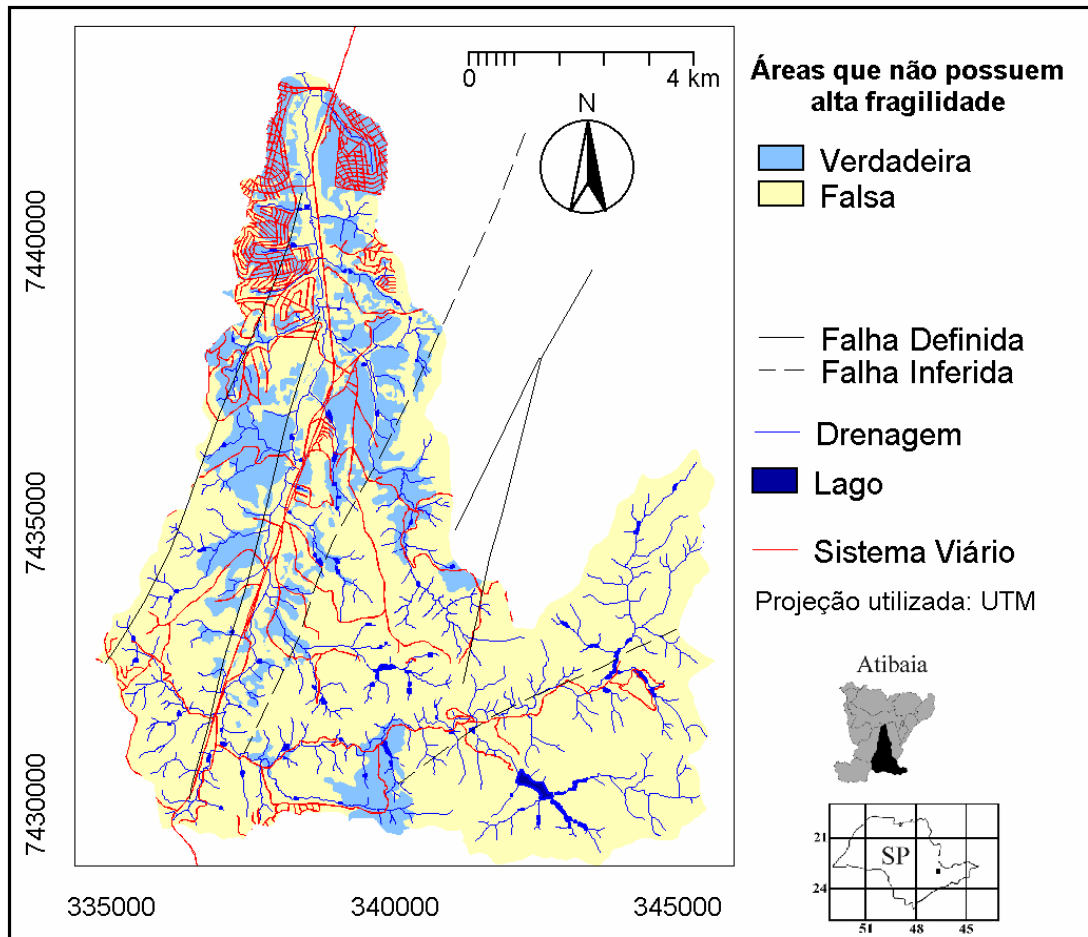


Figura 2. Mapa de fragilidade ambiental utilizando o operador booleano interseção AND.

O segundo mapa de fragilidade ambiental utilizou as ferramentas da tabela de dupla entrada - também conhecida como tabela bidimensional. Nesta tabela as combinações são realizadas de forma pareada (linha x coluna). As seguintes regras foram adotadas: quando duas classes possuem o mesmo grau de fragilidade (código), mantém-se esse grau de fragilidade; quando a combinação é de classes com graus diferentes, a fragilidade resultante será aquela mais forte (Morato, 2000). A **figura 3** mostra o resultado desta análise.

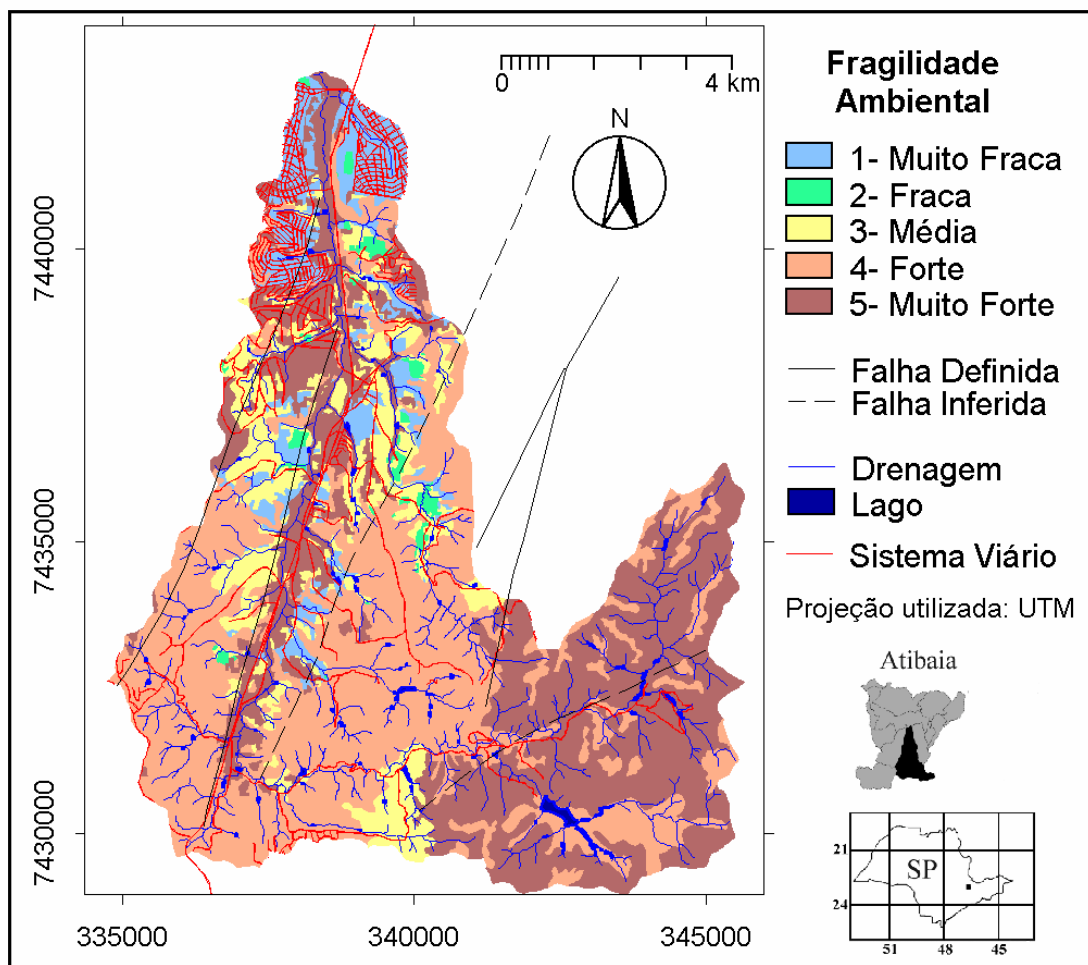


Figura 3. Mapa de fragilidade ambiental utilizando a tabela de dupla entrada.

Diferentemente do método booleano que satisfaz ou não uma determinada hipótese, a tabela de dupla entrada permite que o usuário defina com menor rigor as diferentes classes de fragilidade.

Conforme pode ser observado nas figuras 2 e 3, as áreas que possuem as mais baixas fragilidades restringem-se basicamente a duas localidades: (1) no núcleo urbano consolidado de Atibaia (Urbano1); (2) nas áreas onde se desenvolvem os Latossolos Vermelho Amarelo (LVA), excluindo as áreas de expansão urbana (Urbano2). A maior parte da bacia situa-se entre as fragilidades Forte a Muito Forte. No mapa booleano, cerca de 21% da área corresponde à hipótese verdadeira e 79% falsa. No mapa da tabela de dupla entrada, aproximadamente 8% corresponde a fragilidade muito fraca, 1% a fraca, 12% a média 43% a forte e 40% a muito forte.

A predominância de altas fragilidades na bacia deve-se a dois motivos principais: a forma como os dados foram modelados e o predomínio de altas declividades, solos rasos e pouco desenvolvidos.

5. Considerações finais

Os resultados mostraram a eficácia dos sistemas computacionais na análise empírica da fragilidade ambiental. A aplicação correta dos modelos de grade que envolvem a Modelagem Numérica do Terreno e do tipo de álgebra de mapas são importantes para explorar com maior eficiência os dados disponíveis.

6. Referência bibliográfica

Akima, H. A. Method bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregular distributed data point. **ACM Trans. Math. Software.** v.4, n.2, p.148-159, 1978.

Burrough, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment.** Oxford: Clarendon, 1986.

Douglas, D. H.; Peuker, T. K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitised line or its caricature. **Can. Cartogr.** n.10, p.112-122. 1973.

Felgueiras, C. A.; Goodchild, M. Two Papers on Triangulated Surface Modeling. **Relatório Técnico 95-2.** NCGIA. University of California, Santa Bárbara. 1995.

Felgueiras, C. A. **Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital do terreno para microcomputadores.** 92f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987.

IGC **Carta topográfica das folhas Atibaia I, Atibaia II, Atibaia III, Atibaia IV, Jardim Vitória Régia, Morro da Pedra Grande, Vila Marques e Serra da Pedra Vermelha.** São Paulo, 1977 (1º ed.). Escala 1: 10000.

Kawakubo, F. S.; Campos, K. C.; Morato, R. G.; Luchiari, A. Cartografia da fragilidade ambiental com uso de técnicas de sensoriamento remoto e de análise espacial. In: Seminário De Pesquisa Em Geografia, 1., 2003, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2003.

Petinatti, F. **Modelagem digital e representações gráficas de superfícies.** 1983. 177f. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

Prominério **Mapa geológico da quadrícula de Atibaia.** Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 1985. Escala 1: 50000.

Ross, J. L. S O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia,** n. 6, 1992.

Ross, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia.** n.8, p.63-74. 1994.

Tricart, J. Ecodinâmica. FIBGE: Rio de Janeiro, 1977.

Shimabukuro, Y. E.; Smith, J. A. The least-square mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing.** Piscataway, v.29, n.1, p.16-20. 1991.

Silva, W. S. **Identificação de unidades ambientais no município de Atibaia – SP.** 2001. 158f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.