

## Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental, utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada

Maria Lúcia Calijuri<sup>1</sup>  
José Ernesto Mattos Alves<sup>1</sup>  
Alessandra Carreiro Baptista<sup>1</sup>  
Aníbal da Fonseca Santiago<sup>1</sup>  
Samuel Santana Paes Loures<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa  
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia Ambiental  
Departamento de Engenharia Civil - Sala 320 - 36570-000 - Viçosa - MG, Brasil  
calijuri@ufv.br  
agroermesto@hotmail.com  
{acbaptista, anibalsantiago, loures} @gmail.com

**Abstract.** The map of environmental fragility has been a lot used by the public agency in the elaboration of the environmental territorial planning. The mapping of the environmental fragility allows to evaluate the potentialities of the environment combining their natural characteristics with their restrictions. This paper proposes a method based in fuzzy logic. The application of this model resulted in environmental fragility map, wich was analysed and compared with Crepani et al. (1996) method. The results showed the importance of computacional techniques in the production of intermediate.

**Palavras-chave:** environmental fragility, fuzzy logic, weighted linear combination, fragilidade ambiental, lógica fuzzy, combinação linear ponderada.

### 1. Introdução

A ocupação desordenada do meio físico por atividades agrícolas e florestais, sem um planejamento prévio, desconsiderando a capacidade de suporte do meio físico e a fragilidade ambiental a ele associado, aliada à falta de estratégias de manejo conservacionista, tem acelerado o processo de perda do solo superficial, comprometendo a sustentabilidade destas atividades e a quantidade e qualidade dos recursos hídricos, envolvendo, dessa forma, toda a sociedade nessa problemática.

Atualmente, o processo de degradação do solo tem chamado a atenção do homem em níveis globais, devido à sua abrangência e intensificação. Oldeman (1994), através de inventários do solo, concluiu que 40% de todas as terras cultivadas no mundo estão degradadas.

Aliado a essa problemática, estudos e investigações que dão suporte à avaliação do meio físico natural, integrando as atividades antrópicas, se mostram de extrema importância no planejamento e ordenamento do uso da terra, compatibilizando o desenvolvimento socioeconômico com a conservação do meio ambiente.

Na literatura são encontradas consagradas metodologias para a geração das cartas de fragilidade ambiental: Crepani et al. (1996); INPE (1996); Ross (1994). Os três modelos de análise da fragilidade ambiental supracitados partem do mesmo princípio: as Unidades Ecodinâmicas preconizadas por Tricart (1977) para delimitar áreas no contexto dos diagnósticos ambientais (Spörl, 2001), apresentando limites rígidos na definição da fragilidade.

Um dos problemas relacionados à definição de limites rígidos para os fatores, são os erros e as incertezas associados, pois nem sempre os fenômenos naturais são representados

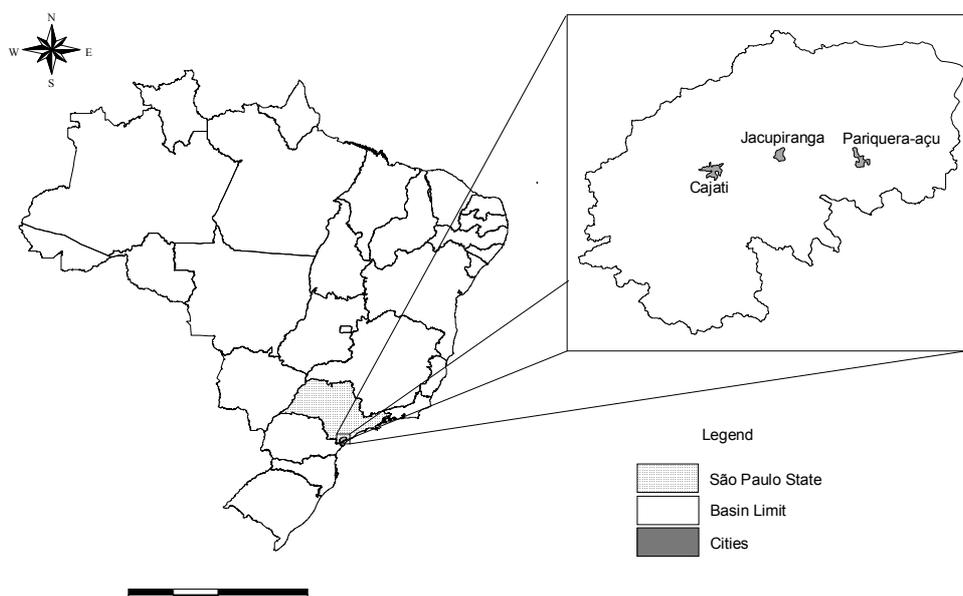
corretamente. Com isso é necessário o uso e/ou desenvolvimento de métodos que represente de forma mais complexa, os fenômenos naturais.

Burrough (1992) demonstra como as incertezas nos valores dos atributos dos mapas causam erros nos resultados das inferências espaciais efetuadas. Os resultados obtidos por esse autor sugerem que a utilização da técnica *fuzzy* pode reduzir drasticamente a propagação de erros através de modelos lógicos, fornecendo informações mais confiáveis.

Nesse contexto, este trabalho propõe o uso da inferência *fuzzy*, que tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes (Burrough e McDonnell, 1998), para gerar as cartas de fragilidade ambiental potencial e emergente. Tais conjuntos lidam com conceitos inexatos, sendo indicado para estudos que apresentam ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos Ruoff (2004).

Segundo exposto, o objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia para a geração das cartas de fragilidade ambiental potencial e emergente com o uso de funções de padronização *fuzzy*, incorporando os fatores em uma análise multicritério a partir de uma combinação linear ponderada.

Para a realização deste trabalho, devido à sistemática da integração do ambiente físico e dos processos antrópicos atuantes, foram escolhidas as bacias hidrográficas dos rios Jacupiranga e Pariquera-açu que se localizam no sul do estado de São Paulo, abrangendo terras dos municípios de Cajati, Pariquera-açu, Jacupiranga e Registro, conforme apresentado na **Figura 1**.



**Figura 1:** Localização das bacias hidrográficas dos rios Jacupiranga e Pariquera-açu/SP.

## 2. Metodologia

### 2.1. Materiais Utilizados

- mapas topográficos do IBGE, em escala 1:50.000, de 1978, em formato digital;
- mapa geológico do IPT, em escala 1:50.000, de 1996, em formato digital;
- imagem orbital Landsat TM, órbita-ponto 220/77, data 13-03-2003;
- mapa geológico IPT, em escala 1:500.000, de 1996 em formato digital;

- mapa de solos, em escala 1:50.000, desenvolvido no âmbito deste projeto por Loures, Samuel S. P. e Schaeffer, Carlos Ernesto G. R., 2005.

## 2.1. Métodos

Para auxiliar na análise do produto final, a caracterização da fragilidade ambiental exige a execução de inúmeros planos de informação. Dessa forma, a partir do levantamento topográfico foi gerado o Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente (MDEHC), de onde foram geradas cartas derivadas que auxiliaram na elaboração dos produtos intermediários.

Utilizando-se o mapa de solos e o mapa geológico foram delimitadas as principais unidades geoambientais da área. Foi realizado ainda um trabalho de campo a fim de verificar e corrigir os limites das unidades fisiográficas. Também foram coletadas e analisadas, em laboratório físico/químico, amostras de solo a fim de descrever as características de cada unidade taxonômica.

O mapa de cobertura vegetal e uso do solo (**Quadro 1**) foi obtido a partir dos dados de sensoriamento remoto, de onde foram extraídas informações para o reconhecimento de padrões e objetos homogêneos, empregando-se a classificação supervisionada pelo Método da Máxima Verossimilhança. A imagem foi trabalhada com recursos dos módulos para processamento de imagens do *software* Idrisi, *Version* Kilimanjaro, maio de 2003, © The Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Os mapas do sistema viário e da hidrografia foram utilizados como referências para o georreferenciamento da imagem.

**Quadro 1:** Distribuição das classes de uso do solo.

<b>Classes de uso do solo</b>	<b>Porcentagem</b>
Formações Florestais	45,2%
Agricultura	27,4%
Campos	12,82%
Pastagens	9,3%
Recursos Hídricos	1,94%
Área Urbana	1,36%
Solo Exposto	0,03%

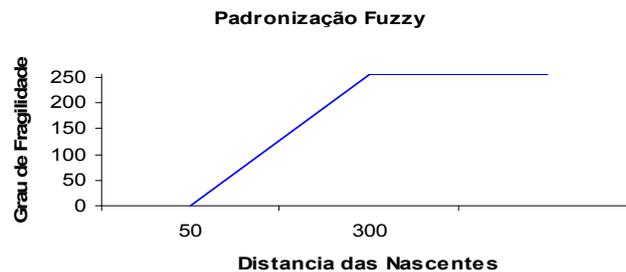
Para converter os fatores em imagens padronizadas a uma escala de fragilidade, foram utilizadas as funções dos conjuntos *fuzzy*, em bytes, variando de zero, áreas menos frágeis, a 255, áreas mais frágeis (**Gráficos 1, 2 e 3**). Em alguns casos, os fatores foram reescalados para valores categóricos de fragilidade.



**Gráfico 1:** Distância dos córregos: função fuzzy linear crescente, com primeiro ponto de controle 30m e o segundo 100m;



**Gráfico 2:** Distância dos rios: função fuzzy linear crescente, com primeiro ponto de controle 50m e o segundo 200m.



**Gráfico 3:** Distância das nascentes: função fuzzy linear crescente, com primeiro ponto de controle 50m e o segundo 300m.

Para se estabelecer as classes de declividade foram utilizados intervalos já consagrados nos estudos de capacidade de uso/aptidão agrícola associados aos valores já conhecidos de limites críticos da geotecnia. Desta forma, as classes de declividade foram hierarquizadas em cinco categorias, como indica o **Quadro 2**.

**Quadro 2:** Definição dos valores de fragilidade para as diferentes classes de declividade.

<b>Classes de Declividade</b>	<b>Grau de Risco</b>	<b>Categorias Hierárquicas</b>
< 6%	225	Muito fraco
6 a 12%	175	Fraco
12 a 20%	125	Médio
20 a 30%	75	Forte
> 30%	25	Muito Forte

Para a carta de solos foram utilizados valores de fragilidade em consideração à suscetibilidade de cada classe de solo à erosão e ao potencial de contaminação dos recursos hídricos para as diferentes unidades pedológicas (**Quadro 3**).

**Quadro 3:** Definição de valores de fragilidade para as diferentes unidades pedológicas.

<b>Classes de Solos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Grau de risco</b>
CXbd1	Cambissolo Háplico fase 1	75
CXbd2	Cambissolo Háplico fase 2	125
GXbd1	Gleissolo Háplico fase 1	25
GXbd2	Gleissolo Háplico fase 2	25
LVAAd1	Latossolo Vermelho Amarelo	225
LVAAd2	Latossolo Vermelho Amarelo	225
MT	Chernossolo	125
PVAd	Argissolo Vermelho Amarelo	125
RLd	Neossolo Litólico	25

A influência do relevo no processo de erosão é consequência da sua morfologia, sendo assim, o relevo foi dividido em dois compartimentos, côncavo e convexo, formando, dessa forma, a morfometria da vertente (**Quadro 4**), uma vez que essas formas têm predisposição diferenciada para erosão. Considerando-se a forma de escoamento superficial da água, difuso na forma convexa e/ou concentrado na forma côncava, pôde-se estabelecer a vulnerabilidade natural de cada unidade homogênea.

**Quadro 4:** Definição dos valores de fragilidade associada à morfometria de vertente.

<u>Morfometria</u>	<u>Grau de risco</u>
Côncavo	125
Convexo	250

Para o tema uso do solo foram utilizados os graus de proteção descritos no **Quadro 5**, considerando o efeito do uso/cobertura do solo na determinação dos processos erosivos.

**Quadro 5:** Definição dos valores de fragilidade para as diferentes classes de uso do solo.

<u>Classes de Uso do Solo</u>	<u>Graus de Proteção</u>
Formações Florestais	255
Campos	200
Agricultura	25
Pastagem	125
Corpos d'água	Restrição
Solo Exposto	25
Áreas Urbanas	75

**Nota:** A classe “Corpos d’água” foi utilizada como uma restrição, ou seja, uma limitação absoluta na análise.

A análise foi realizada utilizando-se o módulo MCE (*Multi Criteria Evaluation*) do GIS Idrisi Kilimanjaro como sistema de apoio à tomada de decisão, usando critérios múltiplos para mapear a fragilidade. O módulo MCE foi utilizado para avaliar e agregar os critérios oriundos de informações existentes ou geradas.

O valor de compensação ou ponderação indica a importância relativa dos fatores e regula a compensação entre eles. No GIS Idrisi Kilimanjaro, o módulo *Weight* compara pares de fatores em termos de sua importância relativa e depois de todas as combinações possíveis, calcula um conjunto de pesos cuja somatória é 1 e uma razão de consistência (**Quadro 6**).

**Quadro 6:** Comparação pareada entre os fatores e cálculo do pesos.

<u>Parâmetros para Comparação Pareada</u>									
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9	
Extremamente	Muito fortemente	Fortemente	Moderadamente	Igualmente	Moderadamente	Fortemente	Muito fortemente	Extremamente	
Menos importante							Mais importante		
<u>Matriz de Comparação Pareada</u>									<u>Pesos de importância calculada</u>
<u>Fatores</u>								<u>Fragilidade</u>	
	<u>Distancia dos corregos</u>	<u>Distancia dos rios</u>	<u>Distancia das nascente</u>	<u>Morfometria de vertente</u>	<u>Solos</u>	<u>Declividade</u>	<u>Uso/cobertura</u>	<u>Potencial</u>	<u>Emergente</u>
<b>Distancia dos corregos</b>	1							0.0569	0.0364
<b>Distancia dos rios</b>	1	1						0.0569	0.0364
<b>Distancia das nascente</b>	1	1	1					0.0569	0.0364
<b>Morfometria de vertente</b>	3	3	3	1				0.1254	0.0754
<b>Solos</b>	5	5	5	3	1			0.3519	0.1629
<b>Declividade</b>	5	5	5	5	1	1		0.3519	0.1832
<b>Uso/cobertura</b>	7	7	7	7	5	5	1		0.4694

Como observado, para a fragilidade potencial, os fatores declividade e pedologia têm maior influência na determinação do grau de fragilidade, uma vez que a resistência do solo ao processo de erosão é consequência do tipo de solo e de suas características físicas. No entanto, para a fragilidade emergente o fator uso/cobertura tem uma maior importância na determinação do grau de proteção, pois a cobertura vegetal representa a defesa da unidade de paisagem contra os efeitos dos processos modificadores das formas de relevo.

Os dados temáticos foram agregados através da combinação linear ponderada (WLC), considerando seus respectivos pesos, resultando em um mapa de 0 a 255 níveis de fragilidade. Este mapa foi reclassificado (**Quadro 7**) em cinco classes de fragilidade ambiental: Muito Fraca, Fraca, Média, Forte e Muito Forte, e suas respectivas áreas foram espacializadas e calculadas.

**Quadro 7:** Intervalos para classificação da fragilidade.

<b>Classes de Fragilidade</b>	<b>Intervalo das Classes</b>
Muito Fraca	0-50
Fraca	50-100
Média	100-150
Forte	150-200
Muito Forte	200-255

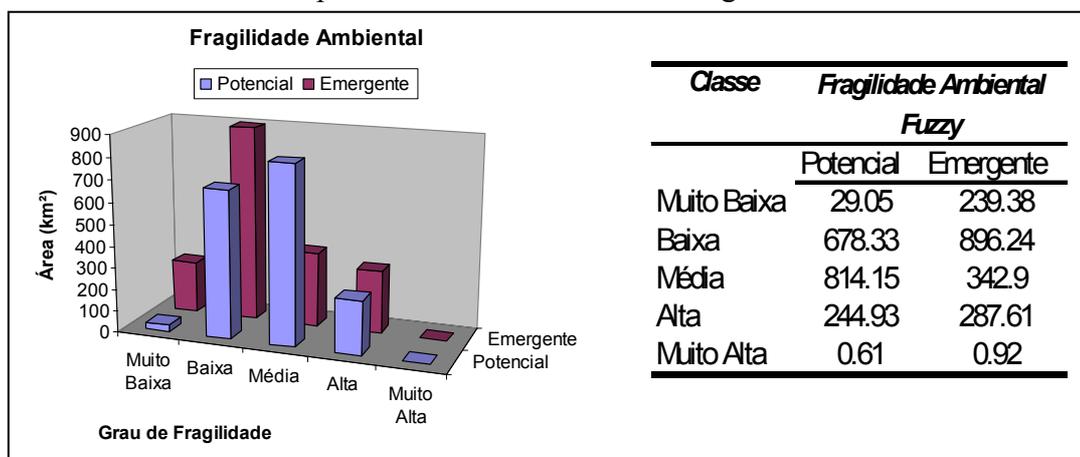
### 3. Resultados e Discussão

O **Quadro 8** apresenta os resultados obtidos com a metodologia proposta para as diferentes classes de fragilidade ambiental potencial e emergente. Observou-se que a carta de fragilidade potencial apresentou uma distribuição normal com 46% da área na classe média de fragilidade, seguidas da classe Baixa com 38% e a Alta com 14%, sendo que a classe Muito Alta praticamente não foi observada.

Para a fragilidade emergente observou-se uma inversão no padrão de distribuição das classes de fragilidade, sendo que a classe predominante foi a Baixa com 51% seguido da Média com 19%, sendo que a Classe Muito Baixa e Baixa tiveram um acréscimo relativo à fragilidade potencial de 720% e 30% respectivamente. Esse resultado mostra quão importante é o efeito da cobertura vegetal no grau de proteção, uma vez que 45% da área apresentam-se sob Mata Atlântica, representando os últimos fragmentos de Mata Atlântica em São Paulo e um dos mais significativos do país (WWF-Brasil, 2005).

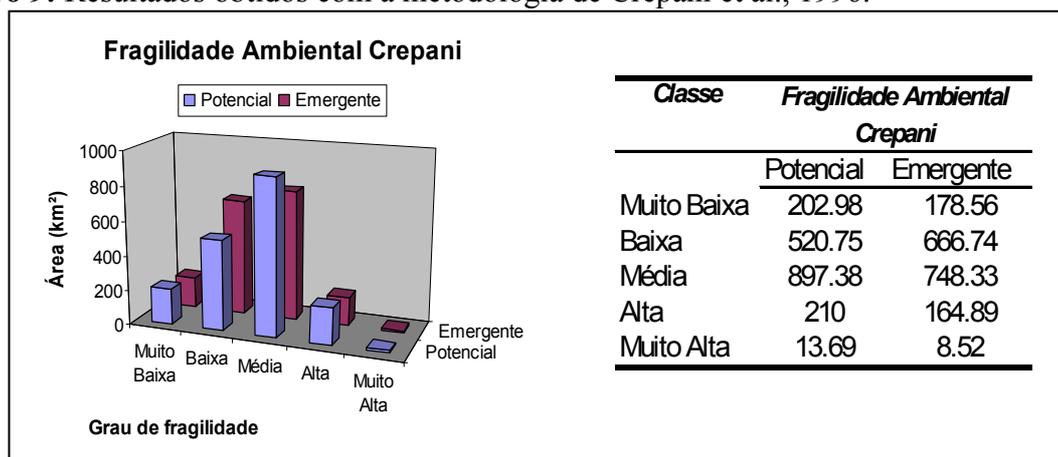
Em relação à classe Alta e Muito Alta houve também um incremento de área relativo à fragilidade potencial, na ordem de 17% e 50% respectivamente, mostrando o efeito do uso do solo na acentuação da fragilidade emergente do ambiente, já que a área ocupada pela agricultura, por não serem adotadas práticas conservacionista e por ocupar áreas inaptas, contribui para acentuar o efeito da erosão e a contaminação dos recursos hídricos.

**Quadro 8:** Resultados obtidos para as diferentes classes de fragilidade ambiental.



Para efeito de comparação foram geradas as cartas de fragilidade pela metodologia de Crepani et al. (1996), o **Quadro 9** apresenta os resultados.

**Quadro 9:** Resultados obtidos com a metodologia de Crepani et al., 1996.



Como observado nos resultados obtidos pela metodologia de Crepani tanto a fragilidade potencial como a emergente apresentaram o mesmo padrão de distribuição normal, sendo que não foi possível observar o efeito do uso/cobertura do solo no comportamento da fragilidade ambiental, já que não houve incremento nas classes Muito Baixa e Muito Alta, da Emergente em relação a Potencial, isso se deve ao fato de que todos os fatores têm igual contribuição na determinação da fragilidade; no entanto na metodologia proposta os diferentes fatores são ponderados de acordo com seu grau de importância na análise.

Esses resultados corroboram com Spörl (2001), mostrando que a metodologia que considera o mesmo peso para as diferentes variáveis da análise, pode vir a “mascarar” ou atenuar os resultados da fragilidade. Dessa forma, a metodologia proposta neste trabalho se mostrou bastante promissora, pois a padronização dos temas foi feita a partir de limiares não rígidos das classes de fragilidade, considerando-se a importância relativa de cada tema.

Contudo se faz necessária a validação do modelo em campo para avaliar a correlação entre as diferentes classes de fragilidade, o risco de erosão, assoreamento dos cursos d’água e a conseqüente degradação ambiental. Ressalta-se ainda a importância da escala de trabalho e da base de dados compatível. É fundamental que o analista conheça, em detalhe, a área de trabalho, tanto para identificar os fatores a serem utilizados na análise quanto para valorá-los.

O cálculo relacional *fuzzy* oferece a estrutura matemática necessária para tratar de problemas onde a incerteza na representação de ambientes naturais não pode ser negligenciada. Isso introduz uma vantagem considerável para a manipulação de bases de dados relacionais, tornando-se um importante instrumento na tomada de decisão.

#### 4. Conclusão

- A metodologia proposta se mostrou promissora na determinação das cartas de fragilidade ambiental potencial e emergente, pois incorpora à análise a distância dos recursos hídricos e das nascentes, assim como pondera os diferentes fatores de acordo com sua importância na análise;
- Foi verificado que a metodologia de Crepani et al. (1996) atenuou o padrão de distribuição das classes de fragilidade;
- É necessário a validação da metodologia em campo, com intuito de avaliar se as respectivas classes de fragilidade estão correlacionadas com a realidade.

#### 5. Referências Bibliográficas

Burrough, P. A. **Development of intelligent geographical information system**. In: International Journal of Geographical Information Systems. (1): 1 – 11, 1992.

Burrough, P. A. e McDonnell, R. A. **Principles of Geographic Information Systems**. Oxford: Oxford University, 1998.

CREPANI, E; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T & BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2000.

GHEZZY, A. O. **Avaliação e mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Xaxim, Baía de Antonina-PR, com o auxílio de geoprocessamento**. (Dissertação mestrado) UFParaná 2003

GUAPYASSSÚ, M. DOS S; HARDT, L. P. A. **Avaliação de fragilidade ambiental: uma nova abordagem metodológica para Unidades de Conservação de uso indireto em áreas urbanas**. Revista: Floresta e Ambiente Vol. 5(1): 55-67. jan. /dez. 1998.

KAWAKUBO, Fernando Shinji, Rúbia Gomes Morato, Kleber Cavaça Campos, Ailton Luchiar, Jurandyr Luciano Sanches Ross. **Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2203-2210.

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

SPÖRL, Christiane. **Análise da Fragilidade Ambiental Relevô-Solo com Aplicação de Três Modelos Alternativos nas Altas Bacias do Rio Jaguari-Mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: FFLCH – USP, 2001.

SPÖRL, C. & ROSS, J.L.S. **Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos**. GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, Nº 15, pp.39-49, 2004

TRICART, J. “**Ecodinâmica**”. FIBGE, Rio de Janeiro, 1977.

WWF-Brasil. **Projetos de Lei podem afetar Juréia e Jacupiranga**. Disponível em: <<http://www.wwf.org.br>>. Acesso em 10 de agosto de 2006.