

Zoneamento da fragilidade ambiental utilizando Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico - AHP: o caso da bacia hidrográfica do Rio Anil, em São Luís - MA

Jessflan Rafael Nascimento Santos¹
Celso Henrique Leite Silva Junior^{2,3}
Dagolberto Calazans Araujo Pereira¹

¹Laboratório de Geotecnologias, Universidade CEUMA - UniCEUMA
Rua Josué Montello, nº 1, Renascença II - 65075-120 – São Luís - MA, Brasil
jessflan@ymail.com; dagolberto@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil
celsohlsj@gmail.com

³Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC Minas
Av. Trinta e Um de Março, nº 1020, Dom Cabral - 30535-000 - Belo Horizonte - MG, Brasil
celsohlsj@gmail.com

Abstract. The River Basin Anil (TRBA) currently has the largest urban area on the city of St. Louis, and is the most urbanized basin of the island of Maranhão. Becomes paramount to qualify and quantify the impacts of land occupation by the characterization of the capacity of land use and development processes of the activities employed there. This study aimed to zone areas of environmental fragility in TRBA from the use of mathematical models such as Fuzzy Logic and Analytic Hierarchy Process - AHP and the Geographic Information System Quantum GIS tools. Data from use and land cover, population density, soils, geology, geomorphology and hypsometry, resulting in the following areas: Consolidated Urban Zone (CUZ), formed by 33,368% of the area, Conservation Zone (CZ), formed by 9,305 % and Multiple Use Zone (MUZ), the largest, consisting of 57,327% of the basin. The generated data helped in the sustainable management of the basin.

Palavras-chave: watershed, zoning, environmental fragility, geographic information systems, environmental planning, sustainability.

1. Introdução

A questão da influência antrópica no ambiente é, ou deveria ser, motivo frequente de preocupação social. Nesse contexto, torna-se primordial qualificar e quantificar os impactos da ocupação territorial pela caracterização da capacidade do uso do solo e dos processos de desenvolvimento das atividades ali empregadas (CESSA; SOARES, 2013).

O desenvolvimento tecnológico, científico e econômico das sociedades humanas contribui, indubitavelmente, com o avanço da exploração dos recursos naturais. Em função disto, torna-se cada vez mais urgente o planejamento físico territorial, não só com enfoque socioeconômico mas, também, ambiental, levando-se em consideração não apenas as potencialidades, mas principalmente a fragilidade das áreas com intervenções antrópicas (DONHA, SOUZA; SUGAMOSTO, 2006).

Nesse contexto da ação do homem sobre a natureza surge a necessidade do planejamento ambiental que de acordo com Ross (1990) apud Donha, Souza e Sugamosto (2006) não pode ser formulado a partir de uma leitura estática do ambiente, mas inserida no entendimento do processo de ocupação que norteia o desenvolvimento e a apropriação do território e de seus recursos. Segundo Oliveira, Rodrigues e Rodrigues (2008) o planejamento ambiental fundamenta-se na interação e integração dos sistemas que compõem o ambiente. Tem o papel de estabelecer as relações entre os sistemas ecológicos e os processos da sociedade, das necessidades socioculturais a atividades e interesses econômicos, a fim de manter a máxima integridade possível dos seus elementos componentes.

Como uma importante ferramenta de planejamento e gestão ambiental surge o mapeamento ou zoneamento de áreas com fragilidades ambientais que norteiam na definição de áreas potenciais para exploração e conservação.

A Bacia Hidrográfica do Rio Anil (BHRA) concentra atualmente a maior área urbanizada relativa ao município de São Luís, além de ser a bacia mais urbanizada da Ilha do Maranhão. Mesmo sendo densamente urbanizada, apresenta ainda um grande contingente de ecossistemas naturais, como o ecossistema manguezal. A sua urbanização é resultado do seu processo histórico de ocupação e caracterizado pela ausência de planejamento ambiental e urbano adequado. Bezerra (2008) estimou que no ano de 2000 a bacia apresentava uma população estimada de 300.000, já em 2010 a bacia apresentava uma população de 394.140 pessoas, com um crescimento aproximado de 31,38% em 10 anos (IBGE, 2010). Nesse contexto o zoneamento da fragilidade para a BHRA é de muita importância, uma vez, que através dele é possível a definição de áreas para conservação quanto áreas onde o processo de urbanização já está consolidado.

Em todo esse contexto destacam-se a lógica fuzzy, “também conhecida como lógica nebulosa e difusa” (AGUADO; CANTANHEDE, 2010, p. 1; ZADEH, 1965), juntamente com o Processo Analítico Hierárquico, do inglês Analytic Hierarchy Process – AHP (SAATY, 1980) que tem por objetivo o tratamento de erros inerentes ao uso de conhecimento de especialista, que foram utilizados para alcançar o objetivo do presente trabalho que foi obter as áreas de fragilidade ambiental da BHRA e definir zonas de uso.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

A BHRA, localiza – se no quadrante NW da Ilha do Maranhão no município de São Luís - MA, tendo como rio principal o Anil, que possuindo cerca de 13,8 Km de extensão, suas nascentes estão localizadas no bairro Aurora descendo ao nível do mar aproximadamente 9,5 Km em linha reta com o eixo orientado de SE para NW a partir das nascentes, a sua calha caracteriza – se por apresentar um perfil meândrico, cortando a porção NE do centro urbano de São Luís – MA no trajeto em direção à desembocadura (ALCÂNTARA, 2004) (Figura 1).

Essa bacia concentra a maior área urbanizada relativa da Ilha do Maranhão com uma área total de 41 Km², e está localizada entre as coordenadas 2° 29” S; 44° 12” O e 2° 34” S; 44° 18” O. Apresenta como limites, ao norte a Bacia Litorânea, ao Sul a Bacia do Rio Bacanga, ao Leste a Bacia do Rio Paciência e ao Oeste a Baía de São Marcos (COELHO, 2008).

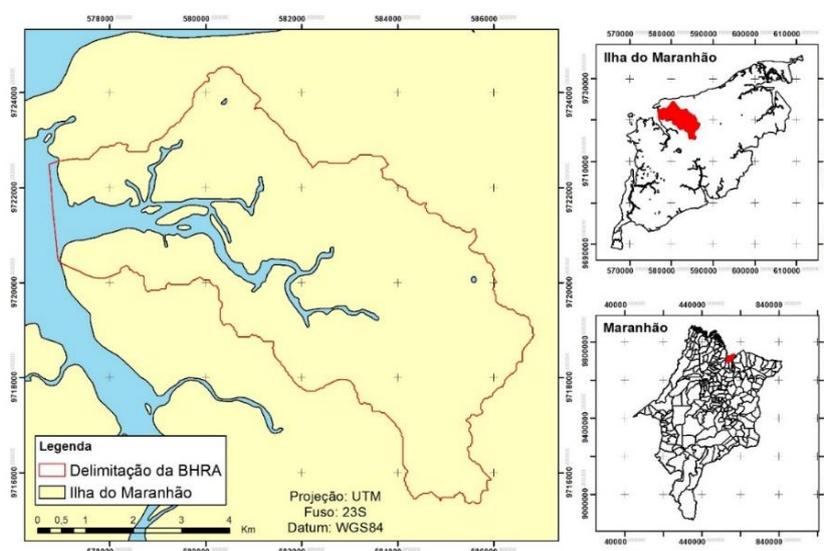


Figura 1. Mapa de localização.

2.2. Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos foram divididos em quatro etapas distintas: levantamento bibliográfico e de dados, organização dos dados, processamento dos dados e atividades em campo.

Levantamento bibliográfico e de dados: foi realizado o levantamento bibliográfico e metodológico utilizando diversas fontes como Teses, Dissertações, Monografias, Livros, e Artigos de Periódicos. No levantamento dos dados foram utilizadas diversas fontes, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o United States Geological Survey (USGS), entre outras, com o objetivo de levantar dados relativos aos tipos de solos, geologia, geomorfologia, imagens de satélite, etc.

Organização dos dados: foram organizados os dados obtidos anteriormente. Os componentes ambientais utilizados para o zoneamento da suscetibilidade constaram de declividade, geologia, solos, geomorfologia, formas do terreno, uso e cobertura do solo, adensamento populacional e hipsometria. Para cada componente em formato de arquivo de vetor (Shape File) foi inserido uma coluna em suas tabelas de atributo com o objetivo de inserir e vincular cada valor dos membros Fuzzy atribuídos. Nessa etapa também foram definidos os pesos através da técnica AHP para cada componente ambiental e suas respectivas classes ambientais. Para tal ponderação dos dados ambientais foi utilizado o Software PriEsT 2.0 (SIRAJ et al., 2013) com base em conhecimento já gerado na literatura a respeito das fragilidades dos ambientes quanto na ocorrência de deslizamento para a calibração dos pesos (Tabela 1). Todos os valores de RC obtidos foram abaixo de 0,1, que é considerado um valor aceitável de inconsistência. Para o ponderação entre os componentes ambientais utilizou-se o conhecimento empírico já disponível gerado por Massa e Ross (2012), Ross (2012), Bispo et al. (2011), Spörl e Ross (2004), Crepani et al. (2001) e Ross (1994), em relação as fragilidades dos ambientes. A abordagem empírica também foi utilizada para a ponderação das classes ambientais de seus respectivos componentes ambientais. Para as classes ambientais utilizou-se a opção de normalização dos valores atribuídos pelo PriEsT 2.0, utilizando o AHP de maneira que cada classe apresentasse um valor equivalente numa escala de 0 a 1.

Tabela 1. Tabela dos temas ambientais com suas respectivas classes e membros Fuzzy.

Componentes Ambientais (CA)	Pesos AHP (P_{AHP})	Classes	Membros Fuzzy
Uso e Cobertura do Solo	0,307	Água	0,004
		Vegetação Arbórea	1,000
		Vegetação Arbustiva	0,562
		Vegetação Rasteira	0,234
		Área Antropizada	0,234
Densidade Populacional	0,219	0-5000 hab./Km ²	0,173
		5000-10000 hab./Km ²	0,287
		10000-15000 hab./Km ²	0,398
		15000-20000 hab./Km ²	0,604
		20000-25000 hab./Km ²	1,000
Solos	0,213	Neossolo Quartzarênico Órtico	0,173
		Gleissolo Tiomófico Órtico	0,287
		Latossolo Amarelo Distrófico	0,398
		Latossolo Amarelo Distrófico*	0,604
		Neossolo Quartzarênico Órtico	1,000
Geologia	0,169	Formação Barreiras	0,714
		Depósitos de Pântanos e Mangue	1,00
Geomorfologia	0,049	Litoral de Mangues e Rias	0,137
		Tabuleiros Costeiros Maranhenses**	0,584
		Tabuleiros Costeiros Maranhenses***	1,000

Hipsometria	0,042	0 – 5 m	1,000
		5 – 10 m	0,703
		10 – 15 m	0,482
		15 – 20 m	0,482
		20 – 25 m	0,482
		25 – 30 m	0,482
		30 – 35 m	0,482
		35 – 40 m	0,389
		40 – 45 m	0,437
		45 – 50 m	0,471
		50 – 55 m	0,561
55 – 60 m	0,885		

*Com frações de Plintossolo Pétrico Concrecionado; **Forma de dissecação; ***Forma de aplanamento.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Processamento dos dados: para a operacionalização dos operadores Fuzzy e cruzamento dos componentes ambientais considerados na pesquisa foi utilizado a ferramenta “Calculadora Raster” presente no SIG Quantum GIS 2.2 (QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM, 2014). Para possibilitar o uso dos dados que antes estavam em formato de vetor (Shape file) foi utilizada a ferramenta do Quantum GIS 2.2 “Rasterizar (Vetor para raster)” para sua conversão em imagens do tipo Tiff File. Em cada tabela de atributos dos arquivos de vetor foi criada uma coluna contendo o valor fuzzy de cada classe ambiental, essa coluna foi utilizada para a conversão dos vetores em imagens em escala de cinza correspondentes aos valores Fuzzy. A equação utilizada é apresentada abaixo (Equação 1).

$$Fr_A = \frac{\sum_{i=1}^8 F_A P_F}{\sum_{i=1}^8 P_F} \quad (1)$$

Onde:

Fr_A : Fragilidade Ambiental.

F_A : Peso do Fator Ambiental.

P_{AHP} : Peso AHP do Fator Ambiental (Solo, Geologia, Geomorfologia, Vegetação, Declividade, Altimetria, Formas do Terreno).

Após os processamentos realizados foi gerada uma imagem monocromáticas com tons de cinza que variam de 0 a 1. Cada imagem foi fatiada de maneira equidistante com o objetivo de se obter as classes (zonas) (Tabela 2). Para o fatiamento foi utilizada a ferramenta “r.reclass” presente no Quantum GIS 2.2, onde a imagem a ser fatiada é transformada em uma nova imagem com as novas informações baseadas nos intervalos de fatiamento. Posteriormente as imagens fatiadas geradas foram convertidas em vetores através do uso da ferramenta do Quantum GIS 2.2 “Poligonizar (Raster para vetor)”, gerando um arquivo Shape File.

Tabela 2. Fatiamento das classes (zonas) de suscetibilidade.

Intervalo de fatiamento	Zona de suscetibilidade
0,000 – 0,200	Suscetibilidade Muito Baixa
0,200 – 0,400	Suscetibilidade Baixa
0,400 – 0,600	Suscetibilidade Moderada
0,600 – 0,800	Suscetibilidade Alta
0,800 – 1,000	Suscetibilidade Muito Alta

3. Resultados e Discussão

A tabela 3 demonstra a distribuição das áreas de cada classe de fragilidade mapeada. É possível observar que as duas classes mais significativas são a baixa e a moderada enquanto as outras classes são menos expressivas (Figura 2).

Tabela 3. Área das zonas mapeadas.

Zona de fragilidade	Área (Km ²)	Área (%)
Fragilidade Muito Baixa	0,026	0,064
Fragilidade Baixa	13,655	33,304
Fragilidade Moderada	23,504	57,327
Fragilidade Alta	3,466	8,453
Fragilidade Muito Alta	0,349	0,852
Total	41,000	100,000

Nas classes baixa e muito baixa são áreas que apresentam principalmente áreas urbanas já consolidadas, com uma alta densidade populacional. Nas áreas de classe moderada, há ainda a presença de vegetação de extrato muita das vezes herbáceo e gramíneas de pequeno porte às áreas com solo exposto.

Nas áreas de fragilidade alta e muito alta, há a presença de vegetação de grande porte, sendo algumas áreas constituídas por mangue, nessas áreas são encontrados solos mais frágeis o que conferem a essas áreas essa classificação.

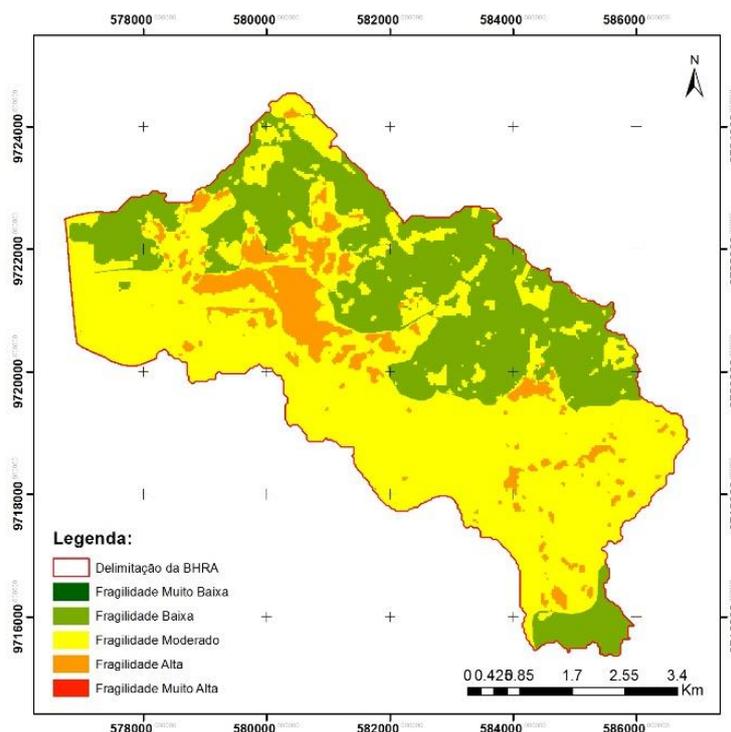


Figura 2. Distribuição espacial das classes de fragilidade.

3.1. Proposta de Zoneamento Quanto ao Uso

A tabela 4 demonstra a distribuição das áreas das zonas definidas (Figura 3). Essas zonas foram obtidas, a partir da reclassificação das áreas de fragilidade ambiental.

Tabela 4. Área das zonas uso mapeadas.

Zona	Área (Km ²)	Área (%)
Urbana Consolidada (ZUC)	13.681	33.368
Conservação (ZC)	3.815	9.305
Uso Múltiplos (ZUM)	23.504	57.327
Total	41,000	100,000

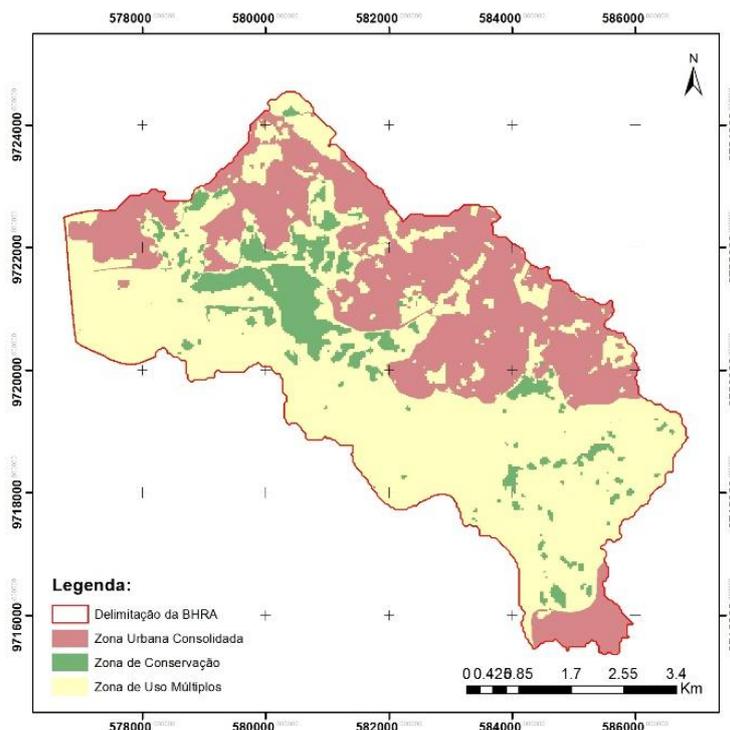


Figura 3. Distribuição espacial das zonas.
 Fonte: Elaborada pelos autores.

3.1.1. Zona Urbana Consolidada (ZUC)

Por serem áreas de estado avançado de urbanização e um alto adensamento populacional, essas áreas destinam-se ao desenvolvimento urbano, sendo porem necessário observar questões como os efluentes e resíduos sólidos que podem causar poluição no solo e nos recursos hídricos. Nessas áreas é permitida o desenvolvimento urbano observando as regras municipais e a legislação ambiental (Figura 4).



Figura 4. Área de ZUC no Bairro do São Francisco.

3.1.2. Zona de Conservação (ZC)

Nessas áreas devido a sua importância ambiental e grande maioria dessas áreas serem constituídas de mangue que por si só são áreas de preservação permanente, também nessas áreas estão pequenos remanescentes de vegetação que no alto curso do Rio Anil constituem a mata de galeria que protege as suas nascentes, áreas essas encontradas nos bairros da Aurora e Vila Isabel Cafeteira. Devido a essas características nessas não é permitida qualquer atividade ou uso (Figura 5).



Figura 5. Distribuição espacial das zonas.

3.1.3. Zona de Uso Múltiplos (ZUM)

Nas áreas de ZUM é permitida a realização de atividades e uso das áreas sempre observando limitações e as legislações ambientais (Figura 6).



Figura 6. Área de ZUM no Sítio Santa Eulália.

4. Considerações Finais

A sobreposição de mapas é uma importante ferramenta para a geração de dados secundários com o objetivo de análises de dados espacializados para as ciências ambientais. Nesse contexto essa ferramenta se demonstrou eficiente para o mapeamento de áreas ambientalmente frágeis e também para a definição de zonas de uso.

O uso da Lógica Fuzzy e do AHP foram imprescindíveis para o tratamento das incertezas inerentes ao conhecimento empírico.

O uso de geoprocessamento se demonstrou eficiente para a manipulação e análise dos dados ambientais aqui empregados.

Com o presente mapeamento de zonas o poder público do Município de São Luís vai poder melhor gerir os recursos naturais da BHRA.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Maranhão – FAPEMA, pela bolsa de Iniciação Científica concedida para a realização da presente pesquisa.

Referências Bibliográficas

- AGUADO, A. G.; CANTANHEDE, M. A. **Lógica Fuzzy**. 2010. Disponível em: <http://www.ft.unicamp.br/liag/wp/monografias/monografias/2010_IA_FT_UNICAMP_logicaFuzzi.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2013.
- ALCÂNTARA, E. H. Mudanças climáticas, incertezas hidrológicas e vazão fluvial: o caso do estuário do Rio Anil. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 12, p. 158–173, 2004.
- BEZERRA, D. D. S. **O Ecossistema Manguezal em Meio Urbano no Contexto de Políticas Públicas de Uso e Ocupação do Solo na Bacia do Rio Anil, São Luís, Maranhão**. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente) - Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA. 2008.
- BISPO, P. da C. et al. Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial. **Geociências**, v. 30, n. 3, p. 467–478, 2011.
- CESSA, R. M. A.; SOARES, M. H. Potencial de fragilidade ambiental no município de Santa Terezinha- (MT) identificado a partir do uso e ocupação da terra e da declividade dos terrenos. **Revista Agrogeoambiental**, v. 5, n. 3, 2013.
- COELHO, C. J. D. C. **Lógica Fuzzy e Geoprocessamento na Determinação da Vulnerabilidade à Ocupação Direta dos Mangues na Bacia Hidrográfica do Anil, na Ilha de São Luís-MA**. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade de Ecossistemas) - Centro de Ciências Biológicas e da Saúde da Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA. 2008.
- CREPANI, E. et al. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. **INPE-8454-RPQ/722**, 2001.
- DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175–181, 2006.
- IBGE. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em: 22 out. 2013.
- MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 24, n. 2012, p. 57–79, 2012.
- OLIVEIRA, P. C. A. De; RODRIGUES, G. S. de S. C.; RODRIGUES, S. C. Fragilidade ambiental e uso do solo da bacia hidrográfica do Córrego Pindaíba, Uberlândia, MG, Brasil. **Revista Ambiente e Água**, v. 3, n. 1, p. 54–67, 2008.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. **Guia do utilizador do QGIS**. 2014. Disponível em: <http://www.qgis.org/pt_PT/docs/user_manual/>. Acesso em: 1 jan. 2014.
- ROSS, J. L. S. ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS. **Revista do Departamento de Geografia - USP**, v. 8, p. 63–74, 1994.
- ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: potentialities and fragilities. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. especial, p. 38–51, 2012.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.
- SIRAJ, S. et al. PriEsT: an interactive decision support tool to estimate priorities from pairwise comparison judgments. **International Transactions in Operational Research**, n. 2013, p. 1–19, 2013.
- SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. **Revista GEOUSP**, n. 15, p. 39–49, 2004.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.