



Mapas de fragilidade ambiental: conceito e método aplicados em estudo piloto

Environmental fragility maps: concept and method applied in a pilot study

Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe¹ ✉ - Filho, Oswaldo Augusto¹

Recibido: 12 de Julio de 2012 • Aceptado: 10 de Marzo de 2013

Resumen

Este trabajo aborda aspectos relacionados a la definición de conceptos de fragilidad ambiental, y presenta un método para evaluar los niveles de fragilidad ambiental. El método presentado también es aplicado en un estudio piloto para ilustrar los resultados que se pueden obtener. Los análisis fueron desarrollados para una parte del oleoducto San Paulo – Brasilia (OSBRA), usando un mapa topográfico en escala 1:10.000. Todos los análisis fueron realizados en Sistema de Información Geográfica (SIG) y fue utilizado el método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para realizar las ponderaciones. Los principales resultados permiten esclarecer el concepto de fragilidad ambiental y muestran la importancia de la definición y la ponderación de atributos utilizados en los métodos. Además el mapa final generado permite evaluar la sensibilidad del método aplicado.

Palabras Clave: *Fragilidad Ambiental; Sistema de Información Geográfica (SIG); Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).*

Resumo

Este trabalho aborda aspectos relacionados à definição do conceito de fragilidade ambiental, e apresenta um método para avaliar os níveis da fragilidade ambiental. O método apresentado também é aplicado em um estudo piloto para ilustrar os resultados que podem ser obtidos. As análises foram desenvolvidas em um trecho do Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), utilizando mapa topográfico na escala 1:10.000. Todas as análises foram realizadas em um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e foi utilizado o método de Processo de Análise Hierárquico (AHP), para realização das ponderações. Os principais resultados permitem esclarecer o conceito de fragilidade ambiental e mostrar a importância da definição e ponderação dos atributos utilizados nos métodos.

1. Escola de Engenharia de São Carlos - USP (Brasil)

✉ fbiaggioni@gmail.com

Além disso, o mapa final gerado permite avaliar a sensibilidade do método.

Palavras chave: *Fragilidade Ambiental; Sistema de Informação Geográfica (SIG); Processo de Análise Hierárquico (AHP).*

Abstract

This work addresses aspects related to the definition of the environmental fragility concept, and proposes a method to evaluate the levels of environmental fragility. The proposed method is also applied in a pilot study to show the results that may be obtained. The analysis were developed in a sector of the São Paulo - Brasília oil pipeline (OSBRA), using digital topographic map at the scale of 1:10,000. A Geographical Information System (GIS) software was used to perform the analysis and it was used the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to assign the weights. The obtained results elucidate the environmental fragility concept and show the importance of the weight assignment and selection of the attributes used in the method. Besides, the final map provided to evaluate the method sensitivity.

Keywords: *Environmental Fragility; Geographical Information System (GIS); Analytic Hierarchy Process (AHP).*

INTRODUÇÃO

A ocorrência de processos geológicos está relacionada à dinâmica natural do planeta, independente da interferência humana. Contudo, devido à ação antrópica intensa esses processos se tornaram muito mais frequentes, podendo ser potencializados pelo uso e ocupação inadequados do solo. Por esse motivo, se faz necessário o uso de ferramentas que auxiliem a descrição e caracterização dos processos geológicos naturais e também dos antrópicos.

Especialmente em relação aos oleodutos, há possibilidade de ocorrência de eventos perigosos de origem geológico-geotécnica, decorrentes da interação entre os dutos e o terreno. As tensões resultantes da interação (compressão, tração e cisalhamento) podem levar à ruptura dos dutos. Podem também ocorrer vazamentos relacionados ao processo corrosivo do solo. Além disso, a ação antrópica, traduzida pelo uso e ocupação inadequados, pode intensificar a ocorrência desses eventos (Augusto Filho, 2008).

Um conceito que vem sendo utilizado, relativamente há pouco tempo no Brasil, em estudos dos processos geológicos naturais e antrópicos é o de fragilidade ambiental. Este conceito tem sido utilizado especialmente em estudos para melhorar a gestão ambiental e geotécnica de oleodutos. Contudo, o conceito é utilizado por diferentes autores com diferentes definições, o que pode tornar sua aplicação confusa.

O mapa de fragilidade ambiental consiste no zoneamento do território em diferentes níveis hierárquicos, que representam os diferentes graus de fragilidade. Permite definir quais áreas são mais frágeis e podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente. Tem grande potencial para ser utilizado em estudos de impacto ambiental.

Mesmo com os constantes avanços nos sistemas de segurança operacional, sejam eles relativos à exploração ou ao transporte de petróleo e derivados, a ocorrência de acidentes nesse ramo de atividade ainda é muito frequente (Noernberg; Lana, 2002). Uma análise da frequência anual de acidentes em oleodutos localizados no estado de São Paulo, em um período de 26 anos, indica um aumento entre 1982 e 1999, principalmente entre os anos de 1996 e 1999, após os quais ocorre uma queda (Augusto Filho et al., 2010).

Por esses motivos, acidentes em oleodutos se constituem em importante ameaça para a qualidade ambiental tanto de re-

giões costeiras, como também de regiões interioranas. E são necessários estudos que permitam melhor gestão de áreas em que se pretende implantar ou que já esteja implantado este tipo de empreendimento. Neste contexto, os estudos de fragilidade ambiental constituem boa ferramenta para realizar tal tarefa.

O presente artigo se relaciona a uma pesquisa de mestrado em andamento, que se intitula "Mapa de Fragilidade Ambiental: Conceituação e Aplicação em um setor do Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA)". Nesta pesquisa foi feito um levantamento sistemático a cerca do conceito de fragilidade ambiental, bem como dos métodos de avaliação dos níveis de fragilidade ambiental, a fim de permitir sua aplicação em um trecho do oleoduto OSBRA.

O objetivo deste trabalho é abordar aspectos relacionados à definição do conceito de fragilidade ambiental, além de apresentar o método para avaliar os níveis da fragilidade ambiental. Todas as análises foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi utilizado o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), visando reduzir a subjetividade das análises.

Destaca-se que a aplicação do método apresentado foi realizada em um estudo piloto, na medida em que a área de estudo (oleoduto) apresenta uma dimensão relativamente reduzida. Dessa forma, o estudo piloto tem como principal função ilustrar a aplicação do método, pois é pouco representativo em relação a sua extensão.

É importante ressaltar que existem diferentes métodos de mapeamento cartográfico, com diferentes terminologias associadas a eles. Dessa forma, neste trabalho foi feita uma escolha em relação aos termos utilizados em cartografia de carta e mapa. Os produtos cartográficos gerados neste trabalho receberam a denominação de Mapa, de acordo com a classificação de Mathewson e Font (1974). Os documentos de outros autores, citados no trabalho, receberam o nome original da publicação.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Longitude 48°W, Latitude 22°S) compreende 205,8 km² e abrange 48,5 km de extensão e uma zona de amplitude de 2 km de cada lado do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA), no trecho entre os municípios de São Simão e Ribeirão Preto, no estado de São Paulo (Figura 1).

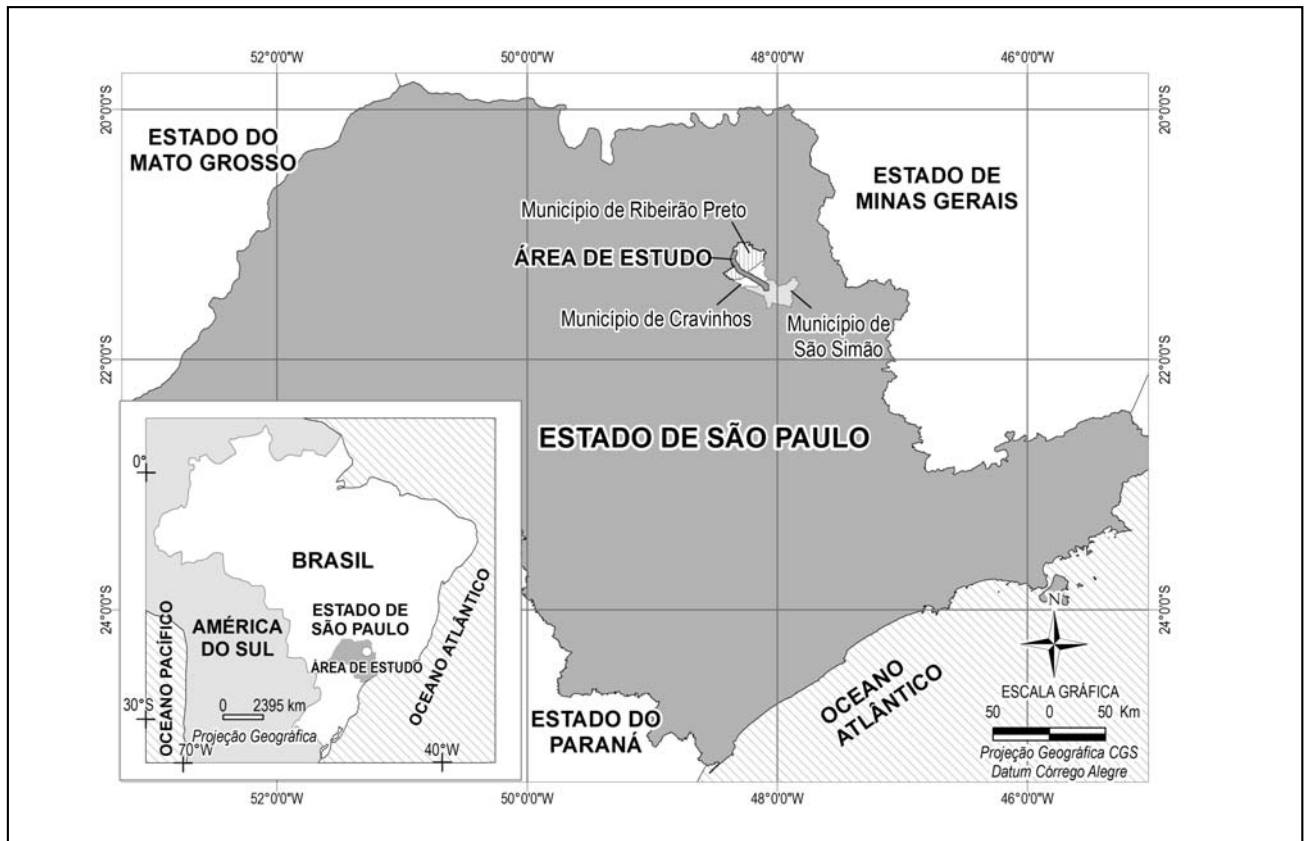


Figura 1. Localização da área de estudo.

A topografia da área de estudo é composta por colinas planas (< 200 m) com declividade moderada (3 - 7°), a elevação predominante do terreno encontra-se em uma faixa entre 620,5 e 785,5m, conforme pode ser observado na Figura 2, que mostra um recorte (representativo da área de estudo) do Modelo Digital do Terreno (MDT).

A geologia local consiste em arenitos eólicos com estratificação cruzada da Formação Botucatu e intrusões diabásicas da Formação Serra Geral, ambas do Período Jurássico-Cretáceo, sobrepostos por depósitos aluviais e coluviais Cenozóicos.

Quanto aos materiais inconsolidados existentes na área encontram-se Depósitos Aluvionares, Coberturas Arenosas, Solos Residuais de Basalto, Solos Residuais de Arenito Botucatu e Solos Residuais de Arenito Intertrapiano.

A área de estudo está contida em uma importante bacia hidrográfica do estado de São Paulo, a Bacia do Rio Pardo. Entretanto, o oleoduto pode ser isolado do Aquífero Guarani, um dos maiores armazenadores de água do mundo. A pluviosidade média da região é de 1350 mm/ano. Sendo a estação chuvosa entre Outubro e Março, quando as temperaturas médias variam entre 22 e 26 °C.

No período seco (entre Abril e Setembro), as temperaturas médias variam entre 13 e 16 °C (Augusto Filho et al., 2010).

Em relação aos tipos de uso existentes verifica-se a predominância de plantações de cana de açúcar, além disso, encontram-se também áreas de mata, reflorestamento, campo sujo, pastagem, culturas anuais e perenes, solo exposto, vias, linhas de transmissão, áreas urbanas, áreas industriais, propriedades rurais e loteamentos.

O oleoduto OSBRA é feito de tubos de aço corrugado, de diâmetro nominal de 5,04 m. O seguimento de oleoduto que será estudado foi construído entre 1998 e 1999 utilizando, principalmente, trincheiras abertas, com profundidades entre 1,5 - 2 m, e os dutos foram subsequentemente cobertos com preenchimento compactado.

Como a área de estudo total apresentava regiões muito homogêneas em relação a todos os atributos analisados nesta pesquisa, após terem sido realizados alguns ensaios piloto na área toda, reduziu-se a área de estudo para, aproximadamente, 40% da total, com 18 km de extensão.

Esta área final engloba todos os tipos de usos e também todos os materiais inconsolidados, desta forma, garante-se que será possível verificar a sensibilidade do método para as diferentes características da área. O recorte final da área de estudo é mostrado na Figura 3.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A palavra fragilidade provém do latim *fragilitatis* e é definida como caráter daquilo que é frágil, sendo frágil o que se pode danificar ou deteriorar facilmente, ou ainda, aquilo que é vulnerável (Larousse Cultural, 1998).

Pela própria definição do dicionário já é possível perceber que o conceito de fragilidade remete ao de vulnerabilidade, o que já indica que é possível que os termos se confundam. Por este motivo, buscaram-se na literatura científica definições e aplicações do conceito de fragilidade ambiental de forma esclarecer o real significado do conceito.

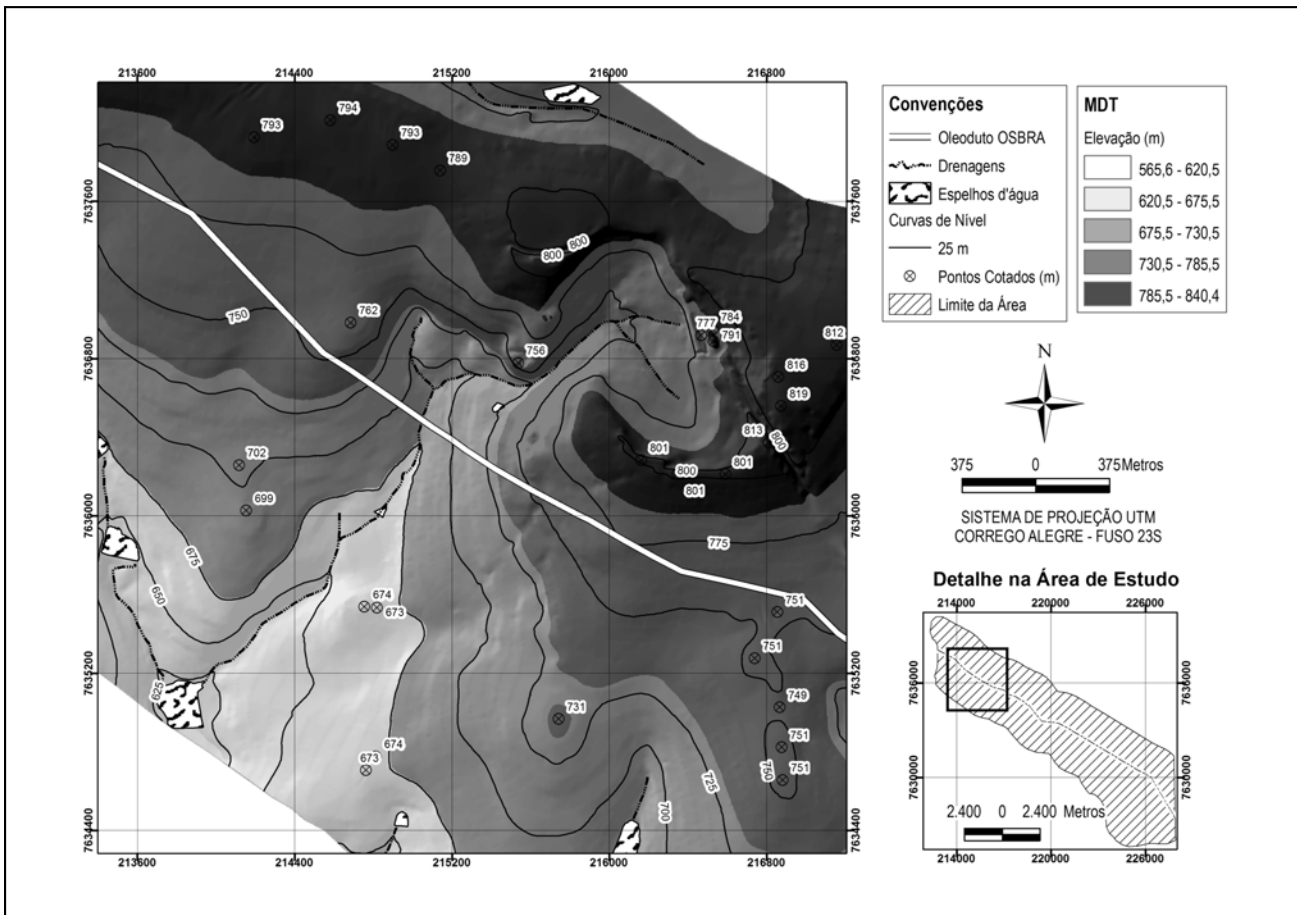


Figura 2: Recorte do Modelo Digital do Terreno (MDT).

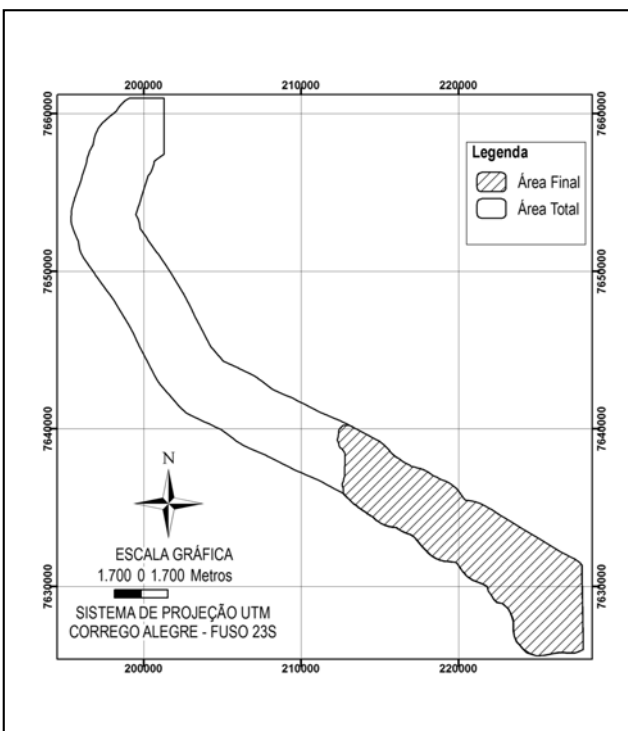


Figura 3. Representação da área de estudo final.

Ratcliffe (1971) descreve fragilidade como uma medida da sensibilidade intrínseca de um ecossistema às pressões ambientais (especialmente mudanças de gestão), combinada com a exposição à ameaça que poderia perturbar o equilíbrio existente. Este conceito foi utilizado no contexto de seleção de reservas naturais.

De acordo com *Ratcliffe (1977)*, a fragilidade ecológica reflete o grau de sensibilidade de um habitat às mudanças ambientais e, conseqüentemente, representa a combinação de fatores internos e externos. A fragilidade ecológica está relacionada com a ocorrência de eventos que podem potencialmente determinar modificações desfavoráveis no habitat. Particularmente, a fragilidade ecológica de um habitat é determinada pela combinação da sensibilidade ecológica e o real nível de eventos desfavoráveis nele.

Ainda no contexto de seleção de reservas naturais, *Smith e Theberge (1986)* definem fragilidade como o oposto à estabilidade, sendo estabilidade a velocidade com que um sistema retorna ao equilíbrio após uma perturbação. Os autores ainda destacam que a fragilidade pode ser natural ou induzida pelo ser humano e que a natural pode ser devida a fatores internos ou externos.

Estas definições consideram fragilidade como a desestabilização de um ecossistema, dada uma perturbação, que pode ser natural (intrínseca ou extrínseca) ou antrópica. E que para ser avaliada deve ser identificada a perturbação em questão e os

principais atributos que poderão ser afetados, tanto bióticos (fauna, flora) como abióticos (solo, recursos hídricos, etc.), dependendo do caso.

Goldsmith (1983) define uma área frágil como uma área com elevada sensibilidade inerente, como uma área alagada, uma duna costeira e regiões montanhosas, que são potencialmente fisicamente instáveis.

É feita ainda a distinção entre fragilidade e vulnerabilidade, assumindo que uma área é inerentemente frágil, mas é vulnerável a uma ameaça externa como mudança no uso do solo, por exemplo (*Goldsmith, op. cit.*).

De acordo com a definição deste autor, fragilidade é aquela devida apenas a fatores intrínsecos e esta fragilidade associada a perturbações provocadas por ações antrópicas é a vulnerabilidade do ambiente.

No Brasil, *Ross (1994)* introduziu o conceito de fragilidade ambiental em seu estudo intitulado *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados*. O autor afirma que a fragilidade dos ambientes naturais, dada uma intervenção antrópica, depende de suas características genéticas. A princípio, os ambientes naturais se encontravam em equilíbrio dinâmico até o início progressivo das intervenções humanas na exploração de recursos naturais.

Ross (op. cit.) baseou-se no conceito de Unidades Ecodinâmicas preconizado por *Tricart (1977)* para avaliar as fragilidades dos ambientes naturais. Definiu as Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente) como sendo aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente os ambientes naturais, enquanto as Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) são as que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana, encontrando-se em seu estado natural.

De acordo com *Ross (op. cit.)*, a carta de fragilidade potencial indica os graus de fragilidade, sob a ação dos processos morfogênicos atuantes na paisagem, resultantes da correlação de alguns dos componentes físico-naturais da paisagem: declividade do terreno, índice de dissecação do relevo e cobertura pedológica. E a carta de fragilidade emergente correlaciona as informações resultantes da fragilidade potencial com as informações de uso do solo, indicando os graus de fragilidade das unidades espaciais conforme a proteção do solo.

Percebe-se que há uma confusão geral dos termos relacionados à fragilidade ambiental, tanto internacionalmente quanto nacionalmente. Muitas vezes os termos são considerados sinônimos, o que pode ser entendido, uma vez que as próprias definições do dicionário são muito similares. Na maioria dos casos em que se procura diferenciar esses termos, os autores acabam sendo incoerentes com as definições. Um exemplo é denominar de fragilidade ambiental algo que considera apenas os aspectos físicos do meio ambiente.

Além disso, o que se verifica é que os primeiros registros de definição e utilização do conceito de fragilidade ambiental são contemporâneos à época em que os outros termos mais bem difundidos atualmente (susceptibilidade, vulnerabilidade, etc.) estavam se consolidando. Ao que tudo indica, é que ao decorrer do tempo, o conceito de fragilidade ambiental acabou sendo pouco utilizado e não se consolidou como os outros.

Observando as primeiras definições para o termo fragilidade encontradas na literatura científica internacional verifica-se um consenso que a fragilidade de um ambiente se traduz pela

desestabilização de um equilíbrio dinâmico preexistente. As divergências das diferentes definições se encontram nos fatores que causam este desequilíbrio.

Alguns autores consideram que a fragilidade é devida a fatores internos e externos, enquanto outros consideram que é apenas devido a fatores internos, sendo uma propriedade intrínseca do sistema.

MÉTODO

O método adotado no presente trabalho consiste basicamente nas seguintes etapas:

- Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foram estabelecidas as principais atividades a serem executadas;
- Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo, a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação do método;
- Aplicação do método: o método foi aplicado utilizando apenas dois mapas intermediários e o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), permitindo ilustrar o procedimento de geração do Mapa de Fragilidade Ambiental;
- Análise dos resultados: após aplicação do método, os resultados obtidos foram avaliados em função do se esperava;
- Conclusões: com os resultados avaliados foi possível elaborar as conclusões, evidenciando a relevância de estudos de fragilidade ambiental, bem como mostrando a sensibilidade do método adotado.

O método para análise da fragilidade ambiental foi desenvolvido pautado pelo conceito adotado como correto. Portanto, analisou-se a fragilidade ambiental considerando apenas fatores intrínsecos ao meio ambiente, e buscando, na medida do possível, englobar aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Foi utilizada uma abordagem dedutiva, partindo do mais geral para o mais específico. Portanto, para gerar o Mapa de Fragilidade Ambiental são necessários mapas de susceptibilidade intermediários que avaliam a susceptibilidade da área para os diferentes processos físicos que possam ocorrer (endógenos e exógenos) e também mapas de susceptibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos existentes.

A princípio foram elencados todos os processos possíveis de ocorrer no meio ambiente, porém alguns deles foram descartados por não ocorrerem na área de estudo, perdendo o sentido de analisá-los. Um exemplo é o processo endógeno de sismos, que não se aplica na área.

Logo, os mapas utilizados para a área de estudo foram os seguintes: Susceptibilidade à Erosão, Susceptibilidade à Movimentos de Massa, Susceptibilidade à Corrosividade, Susceptibilidade ao Escoamento Superficial, Susceptibilidade a Eventos Climáticos Intensos, Susceptibilidade à Colapsividade e Susceptibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Após terem sido definidos os mapas de susceptibilidade intermediários a serem utilizados para a área de estudo, foram definidos os atributos que deveriam ser analisados. Esses atributos foram definidos adaptando-se o método proposto por

Zuquette (1987). Em relação aos atributos do mapa de suscetibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos, estes foram definidos a partir do mapa de uso e ocupação, considerando as diferentes ocupações humanas, atividades econômicas desenvolvidas e a presença de áreas naturais existentes ou legalmente protegidas.

Finalmente, foram definidas as classes dos atributos previamente definidos. Alguns atributos já tinham suas classes previamente definidas (limitadas pela ocorrência na área) como é o caso da concavidade, materiais inconsolidados, uso, além de alguns valores numéricos como área da bacia, por exemplo.

As classes de declividade para erosão foram definidas baseadas no método de capacidade de uso do solo e as para movimentos de massa nas classes discutidas por Augusto Filho (2001). As classes de declividade para escoamento superficial foram adaptadas do proposto pela Embrapa (1979), ainda para o escoamento superficial as classes de tipo de solo foram agrupadas e classificadas de acordo o método proposto pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA).

As faixas de variação de nível d'água foram agrupadas em cinco considerando-se níveis raso, médio e profundo, com classes intermediárias entre raso e médio e médio e profundo. Os valores de eventos climáticos intensos foram extraídos do banco de dados digital disponível no Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo - SigRH (2012).

Para facilitar a visualização foram elaborados fluxogramas para cada mapa a ser gerado com seus diferentes atributos e respectivas classes, que serão apresentados nos resultados.

Uma vez definidos os atributos e classes de atributos a serem analisados foi necessário atribuir pesos a cada um deles. O método selecionado para realizar tal tarefa foi o Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), pois ao utilizá-lo se garante consistência em todas as ponderações realizadas.

Portanto, foram elaboradas matrizes para cada mapa a ser gerado correlacionando de forma pareada os atributos e as classes de atributo, de forma a permitir a análise da importância relativa de cada um dos fatores e obter os pesos finais.

Estes pesos finais foram então atribuídos a cada classe de atributo, no software ArcGIS 9.3, em uma tabela de atributos para ser possível realizar operações matemáticas para sobreposição dos fatores de interesse para cada mapa intermediário. O método matemático utilizado para realizar a sobreposição foi o de soma ponderada, discutido por Soares (2006).

As operações de soma ponderada foram realizadas com a ferramenta Single Output Map Algebra (disponível no software ArcGIS 9.3) para geração de cada mapa intermediário. As notas finais obtidas foram agrupadas em cinco classes (Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) e foi utilizado o método de classificação *Natural Breaks*.

Com os mapas intermediários gerados foi possível obter o Mapa de Fragilidade Ambiental pela sobreposição destes mapas com uma operação de soma simples. Adicionalmente, podem-se realizar diferentes combinações de mapas intermediários para verificar-se a sensibilidade da área de estudo aos diferentes fatores de análise.

RESULTADOS DISCUSSÃO

Neste artigo, além dos resultados a cerca do conceito e método para avaliar a fragilidade ambiental, são apresentados os resultados do ensaio piloto obtidos combinando dois dos mapas intermediários, o de Suscetibilidade à Erosão e o de Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Conceito de Fragilidade Ambiental

Tendo em vista tudo o que foi apresentado no item de fundamentação teórica, o presente trabalho adota como definição de fragilidade ambiental a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente. Para ilustrar a definição defendida neste trabalho adaptou-se um gráfico apresentado por Rossi (2001), mostrado na Figura 4.

De acordo com o gráfico, a fragilidade ambiental, que é representada pela inclinação da reta (α), representa uma característica intrínseca de um sistema. Os diferentes índices de α (1, 2 ou 3) representam sistemas diferentes, com fragilidade ambiental diferente. Tal conceito pode ser quantificado pelas características naturais dos sistemas (bióticas, abióticas e socioeconômicas).

A fragilidade ambiental será sempre a mesma para um dado sistema. Quando o sistema for afetado por fatores extrínsecos, representados pela interferência (na maioria das vezes antrópica), resultará em respostas diferentes, em função da fragilidade ambiental deste sistema. Esta resposta é traduzida pela alteração ambiental.

Seguindo esta definição, este trabalho considera que a fragilidade ambiental é equivalente ao conceito de vulnerabilidade, utilizado na análise de risco. Desta forma, quando se avaliarem as características naturais do meio, estará se avaliando a fragilidade ambiental. E quando se relacionar este resultado com informações da pressão antrópica, estarão sendo avaliadas as possíveis alterações ambientais que poderão ocorrer.

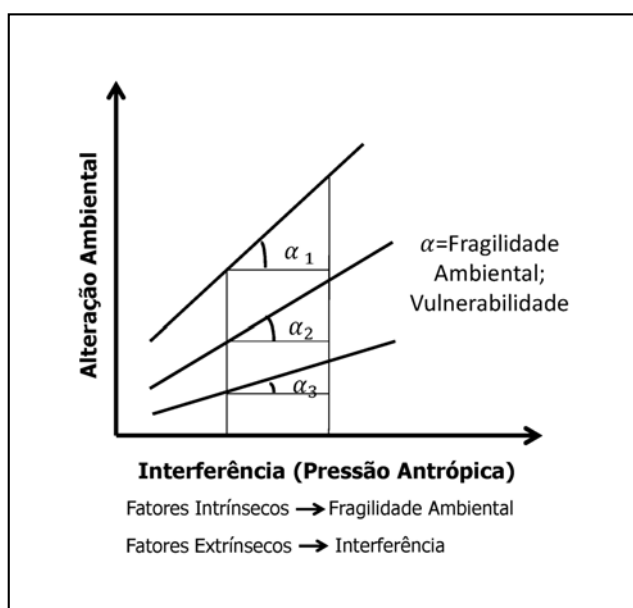


Figura 4. Modelo conceitual adotado de fragilidade ambiental. Adaptado de Rossi (2001).

Método de Análise dos Níveis de Fragilidade Ambiental

Como citado anteriormente, neste artigo são apresentados os resultados referentes à aplicação do método combinando apenas dois dos mapas intermediários: erosão e fatores bióticos e socioeconômicos.

Dessa forma, tão importante quanto os produtos cartográficos finais são os atributos utilizados no processo de geração dos mesmos. Portanto, na Figura 5 são mostrados os atributos que devem ser utilizados para confecção dos mapas de suscetibilidade à erosão e de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Em relação aos atributos utilizados para elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão, verifica-se que foram selecionados quatro que foram considerados como os mais importantes para esta análise. E as classes de atributos foram agrupadas visando manter no mesmo grupo as classes que apresentassem potencial de escoamento/infiltração semelhantes.

De fato, quando se verifica o resultado obtido percebe-se que o mapa se mostra coerente com aquilo que era esperado. Portanto, nota-se a importância da seleção dos atributos,

de forma que mesmo que não sejam utilizados todos os possíveis é importante selecionar os mais representativos para gerar resultados próximos da realidade.

Já o atributo e suas classes referentes ao mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos foram selecionados visando traduzir a importância dos elementos naturais existentes, bem como da ocupação antrópica e suas atividades desenvolvidas. Por isso, as classes de uso foram divididas separando áreas naturais existentes, legalmente protegidas, áreas de ocupação humana e também as áreas onde são desenvolvidas atividades econômicas.

Da mesma forma, a atribuição de pesos para os atributos e as classes de atributos é de vital importância para a qualidade final dos mapas gerados. Por isso, se faz necessário apresentar a estruturação das matrizes de ponderação do Método AHP, bem como os resultados de pesos finais obtidos. As ponderações foram realizadas pelos autores do trabalho.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as comparações paritárias, bem como os resultados obtidos (autovetores ou pesos) e também a análise da consistência das comparações, dada pela razão de consistência (RC).

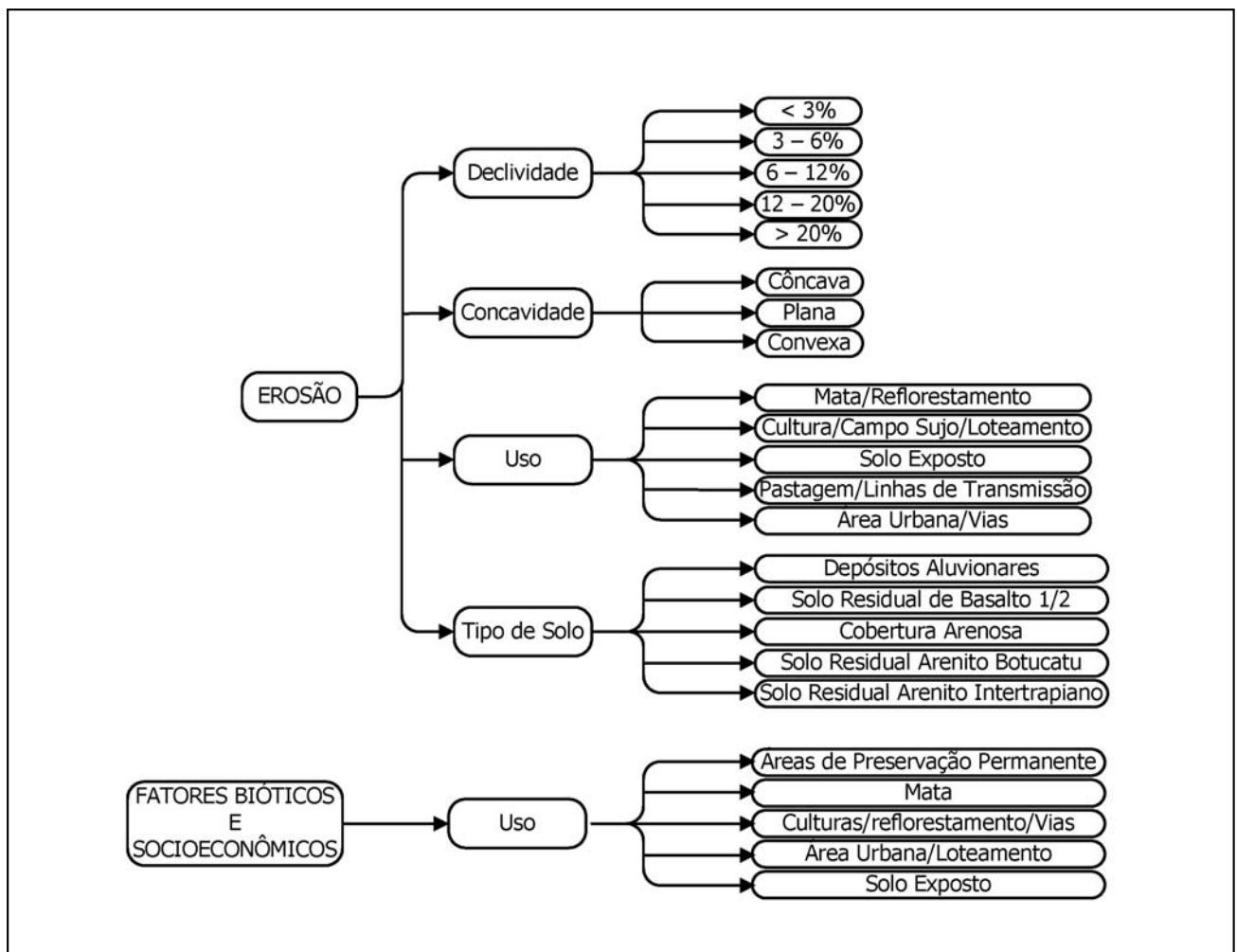


Figura 5. Atributos e classes de atributos definidos para os mapas intermediários.

Tabela 1. Matriz AHP elaborada para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA				
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo
Declividade	1/1	7/1	2/1	4/1
Concavidade	1/7	1/1	1/4	1/2
Uso	1/2	4/1	1/1	2/1
Tipo de Solo	1/4	2/1	1/2	1/1
SOMA	1,89	14,00	3,75	7,50

MATRIZ NORMALIZADA					
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,53	0,50	0,53	0,53	0,52
Concavidade	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
Uso	0,26	0,29	0,27	0,27	0,27
Tipo de Solo	0,13	0,14	0,13	0,13	0,14

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA	
λ máx	4,00
IC	0,00
ICR	0,90
RC	0,00
	0,12%

PESOS FINAIS					
Atributos	Classes				
Declividade	< 3%	3 - 6 %	6 - 12%	12 - 20%	> 20%
Pesos Finais	0,019	0,036	0,071	0,129	0,268
Concavidade	Côncava	Plana	Convexa		
Pesos Finais	0,054	0,006	0,010		
Uso	Mata / Reflorestamento Loteamento / Prop.	Cultura / Campo Sujo /	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.
Pesos Finais	0,018	0,036	0,136	0,070	0,009
Tipo de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertapiano
Pesos Finais	0,009	0,005	0,060	0,037	0,025

Em relação à erosão (Tabela 1), foi apresentada apenas a matriz de ponderação dos atributos, as matrizes referentes a cada classe de atributo foram omitidas para evitar repetições. Além disso, é apresentada uma matriz contendo os pesos finais, que consiste na multiplicação do peso do atributo pelas classes.

Ainda em relação à Tabela 1, verifica-se que na análise da consistência obteve-se valor de RC de 0,12%, que pode ser considerado baixo já que o método considera até o limite de 10%, isto é, as comparações realizadas foram coerentes e geraram resultados confiáveis.

Os autovetores obtidos, que indicam a ordem de importância dos atributos, classificaram em primeiro lugar a

Declividade (52%), seguida pelo Uso (27%), Tipo de Solo (14%) e por último a Concavidade (7%).

Em relação aos fatores bióticos e socioeconômicos (Tabela 2), verificou-se que o valor de RC foi de 3,24%. Valor um pouco maior do que o obtido para erosão, mas ainda dentro do limite aceitável.

Quanto à ordem de importância dos atributos obteve-se em primeiro lugar Áreas de Preservação Permanente (40,9%), seguido por Mata (23%) e Área Urbana/Loteamento (23%), Culturas/Reflorestamento/Estradas (9,8%) e por último Solo Exposto (3,3%).

Tabela 2. Matriz AHP elaborada para fatores bióticos e socioeconômicos.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	Área Urbana/ Loteamento	Solo Exposto
APP	1/1	2/1	5/1	2/1	9/1
Mata	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1
Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	1/5	1/3	1/1	1/3	5/1
Área Urbana/ Loteamento	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1
Solo Exposto	1/9	1/7	1/5	1/7	1/1
SOMA	2,31	4,48	12,20	4,48	29,00

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	Área Urbana/ Loteamento	Solo Exposto	AUTOVETOR
APP	0,43	0,45	0,41	0,45	0,31	0,41
Mata	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	0,09	0,07	0,08	0,07	0,17	0,10
Área Urbana/ Loteamento	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Solo Exposto	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA

$\lambda_{\text{máx}}$	5,15	
IC	0,04	
ICR	1,12	
RC	0,03	3,24%

PESOS FINAIS

Classes	Pesos
APP	0,41
Mata	0,230
Culturas / Reflorestamento / Estradas	0,098
Área Urbana/ Loteamento	0,230
Solo Exposto	0,033

Finalmente, puderam ser gerados os mapas intermediários em questão, conforme o método descrito anteriormente e, estes foram então combinados e geraram o Mapa de Fragilidade Ambiental. Para permitir uma melhor visualização dos resultados, foi selecionada uma região na área de estudo para serem apresentados em detalhe ambos os mapas intermediários e também a combinação final que gerou o mapa de fragilidade ambiental. Estes resultados estão exibidos na Figura 6.

Como é possível observar nos mapas apresentados, o mapa de suscetibilidade à erosão apresenta áreas mais críticas nas declividades elevadas, como era de se esperar uma vez que este é

o atributo com maior peso para este mapa (52%). De forma que o método utilizado para sobrepor os atributos (soma ponderada) foi eficiente, pois garantiu que os atributos mais importantes apresentassem maior influência.

Da mesma forma ocorreu no Mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos, no qual houve destaque para as áreas de preservação permanente (APP's) (40,9%), que pela ponderação realizada recebeu o valor mais elevado. Este resultado se mostra coerente, pois as APP's além de serem áreas que devem manter elementos naturais originais são áreas legalmente protegidas.

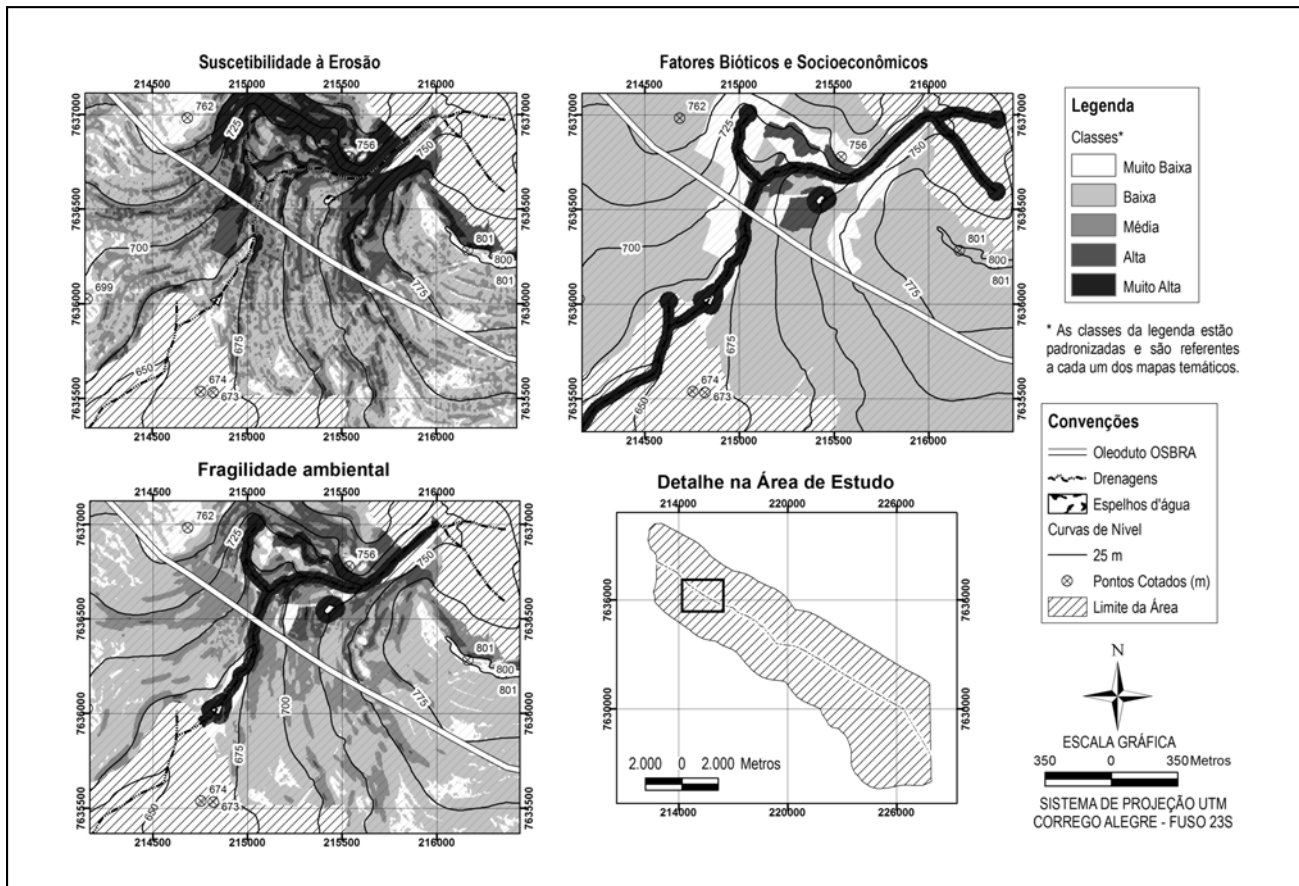


Figura 6. Mapas de erosão, fatores bióticos e socioeconômicos e de fragilidade ambiental.

O mapa final representa bem a combinação dos mapas intermediários, na medida em que destaca as áreas mais críticas de cada mapa e amortiza as áreas intermediárias. Isto reflete que os mapas intermediários apresentam a mesma importância (peso) na geração do mapa de fragilidade ambiental.

Além disso, o mapa de fragilidade ambiental, na medida em que combina os diferentes processos que podem ocorrer aos elementos bióticos e socioeconômicos afetados, representa as áreas que podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente devido a fatores intrínsecos. Este resultado é justamente o esperado, pois traduz fielmente a definição adotada neste trabalho.

É importante ressaltar que pelo método definido, a princípio, todos os mapas intermediários devem ser utilizados para elaboração do mapa final. Sendo que o apresentado neste artigo é apenas para ilustrar a aplicação do método, já que o objetivo primário do trabalho é apresentar o conceito e método de fragilidade ambiental. Podem ainda ser realizados testes com a combinação de diferentes mapas intermediários a fim de se verificar a sensibilidade do método e da área de estudo aos diferentes processos.

Cabe destacar ainda, que os mapas apresentados poderiam ter recebido tratamento cartográfico em relação à apresentação das áreas. Na medida em que existem fragmentos muito pequenos de determinadas classes, de forma que na escala apresentada eles se tornam pouco representativos. Esses fragmentos podem ser agrupados com um critério de área mínima e incorporados ao polígono de maior área no qual está

contido. Gerando um mapa final com áreas mais contínuas e que possa ser mais facilmente utilizado para gestão ambiental e geotécnica da área.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o conceito que melhor define o termo Fragilidade Ambiental é o que considera a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente. Além disso, que para avaliar seus diferentes níveis é importante considerar, na medida do possível, aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Verificou-se também a importância da seleção cuidadosa de todos os atributos e classes de atributos que serão considerados na geração dos mapas finais. É necessário englobar todos os aspectos do meio ambiente, mas que também sejam coerentes com a área de estudo.

Além disso, o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP) se mostrou bastante interessante para a classificação da importância relativa de cada atributo e obtenção dos pesos finais. Através do método é possível assegurar-se que todos os julgamentos realizados foram coerentes, gerando resultados mais confiáveis.

O mapa de fragilidade ambiental gerado para ilustrar a aplicação do método se mostrou bastante condizente com os mapas intermediários usados para gerá-lo. Tal fato indica que o método proposto é adequado à definição conceitual defendida neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- AUGUSTO FILHO, O. 2001.
Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para implantação de seguros em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP).
Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 196p.
- AUGUSTO FILHO, O. 2008.
Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP).
Relatório Científico Final. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 142p.
- AUGUSTO FILHO, O.; HIRAI, J. N.; OLIVEIRA, A. S. E LIOTTI, E. S., 2010.
GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline.
Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print), v. 69, p. 631-641.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1979.
Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos.
In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10. Rio de Janeiro - RJ. 83 p.
- GOLDSMITH, F. B., 1983.
Evaluating Nature. In: Warren A. e Goldsmith F.B. (eds.).
Conservation in Perspective. John Wiley and Sons, Chichester. pp. 233-246.
- LAROUSSE CULTURAL. 1998.
Grande Enciclopédia.
Volume 11. Nova Cultural Ltda.
- MATHEWSON, C. E FONT, R. G. 1974.
Geologic environment: forgotten aspects in the land use planning process.
The Geological Society of America - Engineering Geology Case Histories, 10:23-38.
- NOERNBERG, M. A. E LANA, P. C., 2002.
A sensibilidade de manguezais e marismas a impactos por óleo: fato ou mito? Uma ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas costeiros a derrames de óleo.
In: Geografares, Vitória, n. 3, jun.
- RATCLIFFE, D. A. 1977.
A Nature Conservation Review.
Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- RATCLIFFE, D. A., 1971.
Criteria for the selection of nature reserves.
Advancement of Sciences, 27. pp. 294-296.
- ROSS, J. L. S. 1994.
Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.
Revista do Departamento de Geografia. Nº 8. pp. 63-74.
- ROSSI, O. 2001.
Introduzione.
In: Rossi O. (Ed.), Cartografia multiscalare della Natura. Supergrafica. Parma, Itália. pp. 11-20.
- SAATY, T. L. 1980.
The Analytic Hierarchy Process.
McGraw Hill International.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2012.
Banco de dados Hidrometeorológicos.
Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_carrega.exe?f=index/informe_files/dados_dae.html, último acesso em 26 de Abril de 2012.
- SMITH, P. G. R. E THEBERGE, J. B., 1986.
A review of criteria for evaluating natural areas.
Environment Management 10, pp. 715-734.

- SOARES, S. R. 2006.
Gestão e Planejamento Ambiental.
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC.
- TRICART, J. 1977.
Ecodinâmica.
Rio de Janeiro (RJ). FIBGE/SUPREN.
- ZUQUETTE, L. V. 1987.
Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.
Tese de Doutorado. EESC, São Carlos - SP. 673p.