

Aplicação de um sistema baseado em conhecimento e lógica *fuzzy* para o mapeamento da fragilidade ambiental em relação às atividades florestais

Lorena Stolle¹
Christel Lingnau¹
Julio Eduardo Arce¹
Itamar Antonio Bognola²

¹Universidade Federal do Paraná – Departamento de Ciências Florestais
Av. Prof. Lothário Meissner, 900 - 80210-170 - Curitiba – PR, Brasil
lorenastolle@yahoo.com.br, lingnau@ufpr.br, jarce@ufpr.br

²EMBRAPA Florestas
Caixa Postal 319 - 83411-000 – Colombo – PR, Brasil
iabog@cnpf.embrapa.br

Abstract. The objective of this study was to determine and map the levels of environmental fragility considering the physical aspects of soil and implementation of silvicultural practices in an area with planting of *Pinus taeda* L. The analysis included two groups of variables: “state” and “pressure”. The “state” includes the slope and some physical aspects of the soil: amount of clay on the surface and subsurface layer, horizon “A” depth and effective depth. The “pressure” refers to the impact of forest activities (maintenance, soil preparation, marking/planting, which can be manual or mechanized, harvesting with chainsaw/tractor and harvesting with feller/skidder) and the protection by vegetation coverage. The method consisted in using a decision support system based on dependency networks and fuzzy logic as a tool for classification of areas on the degree of fragility. The results showed that 78,1% of the planting area belonged to the intermediate class of fragility where all forest activities were simulated. For the low fragility class, activities were divided into four areas: a) 14% to the activity of manual maintenance; b) 6,6% for manual activities, such as maintenance, soil preparation, marking; c) 1,3% for the maintenance, soil preparation, marking manuals and mechanized maintenance, and d) 0,1% to all previous activities plus chainsaw harvesting.

Palavras-chave: EMDS, fuzzy logic, soils forests, EMDS, lógica nebulosa, solos florestais.

1. Introdução

O termo fragilidade ambiental pode ser entendido como “o grau de suscetibilidade ao dano, ante a incidência de determinadas ações, ou ainda como o inverso da capacidade de absorção de possíveis alterações sem que haja perda de qualidade” (Diccionario de la Naturaleza, 1987).

A análise empírica da fragilidade ambiental proposta por Ross (1994) fundamenta-se no conceito das Unidades Ecodinâmicas preconizado por Tricart (1977), onde se parte do pressuposto que na natureza a troca de energia e matéria se relacionam em um equilíbrio dinâmico. De acordo com este conceito, Tricart (1977) considera que os ambientes são estáveis quando estão em equilíbrio dinâmico e foram poupados da ação humana, encontrando-se em estado natural. Entretanto, quando este equilíbrio sofre as intervenções antrópicas, passa a ser denominado como unidade instável.

A maioria dos trabalhos existentes de mapeamento de fragilidade ambiental adota uma metodologia simples de cruzamentos de mapas (planos de informações). A representação rígida da classificação *booleana*, normalmente utilizada nestes cruzamentos efetuados nas operações de manipulação em SIG, provocam a propagação de erros e resultados não confiáveis. No exemplo citado por Meirelles (1997), onde se faz uma avaliação para o risco de erosão através de uma intersecção *booleana* (AND) com os seguintes parâmetros: declividade maior que 10%, textura do solo é igual a areia e a cobertura vegetal é menor que 25%, verifica-se que o sistema será testado em seus atributos fornecendo uma resposta verdadeira ou falsa, ou seja, se o polígono não satisfizer as três condições simultaneamente,

ele não será considerado. Este tipo de modelagem é equivocado, pois deve-se considerar que o risco de erosão ainda continuará existindo se a declividade for ligeiramente menor que 10%.

Os valores de pertinência *fuzzy* dados de forma relativa e os operadores *fuzzy* permitem uma grande flexibilidade na modelagem. Em outras palavras, as limitações impostas pelos modelos convencionais (classificação *booleana*), podem ser eliminadas pelos modelos *fuzzy*, devido à flexibilidade dos seus operadores. Além disto, a possibilidade de se utilizar valores *fuzzy* relativos, simultaneamente, à importância do mapa e da classe, permite, de forma inovadora, a variação dos pesos de acordo com as características conjuntas da região. Isto é extremamente importante no caso de Planejamento Regional ou de Recursos Naturais, pois possibilita a análise integrada do ambiente, fornecendo um modelo muito próximo à realidade (Meirelles, 1997).

O presente estudo visou determinar e mapear os níveis de fragilidade ambiental considerando isolada e conjuntamente os aspectos físicos do solo e a execução de práticas silviculturais em uma área com plantio de *Pinus taeda* L..

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia adotada neste trabalho utiliza a modelagem por lógica *fuzzy*, onde primeiramente foram selecionadas algumas das variáveis disponíveis para o estudo. Em seguida estas variáveis foram espacializadas para finalmente poder prosseguir com o mapeamento da fragilidade ambiental na área de estudo.

2.1 Variáveis consideradas na avaliação

Para a análise da fragilidade inerente ao meio físico foram utilizadas cinco variáveis: % de argila na camada superficial, % de argila na camada subsuperficial, espessura do horizonte A, profundidade efetiva do solo e declividade do terreno. Na avaliação, este grupo de variáveis é denominado como “estado”. Para representar a influência antrópica no meio físico, denominada como “pressão”, foram consideradas duas variáveis: o valor de impacto das atividades florestais (Tabela 1) e a proteção exercida pela cobertura vegetal ao solo. Para representar a cobertura vegetal determinou-se arbitrariamente que uma superfície 100% coberta corresponde a áreas com floresta densa e dossel fechado, como em uma floresta natural, e 0% para áreas sem cobertura. As superfícies onde são realizadas a maioria das atividades deste estudo (exceto a manutenção das estradas, que se refere a uma área sem cobertura vegetal) correspondem a locais que apresentam alguma cobertura vegetal. Embora seja um valor indeterminado, sabe-se que ela existe e é proporcionada pela presença de floresta desbastada, regeneração de gramíneas e/ou pioneiras. As atividades florestais consideradas para este estudo, receberam valores de impacto que variaram de 4 a 8 (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de impacto atribuídos às atividades florestais.

Atividades	Valor de impacto	Cenários
Preparo do solo mecanizado	8	8
Preparo do solo manual	5	5
Marcação e plantio mecanizado	8	8
Marcação e plantio manual	5	5
Manutenção mecanizada	6	6
Manutenção manual	4	4
Colheita Motosserra/TC	7	7
Colheita Feller/Skidder	8	8
Manutenção de Estradas	8	8

Fonte: Plano de Gestão de impactos ambientais, Battistella Florestal (2003) citado por STOLLE (2008).

Assim, combinações entre o “estado” e a “pressão” fornecem cenários do que pode ocorrer com o ambiente quando determinada atividade florestal é realizada. No entanto, a fragilidade em relação ao grupo “estado” é constante, uma vez que os atributos físicos dos solos e a declividade não se alteram com a “pressão”. Portanto, o mapa de fragilidade ambiental em relação às atividades florestais representa uma simulação de fragilidade ambiental condicionada a um determinado uso.

2.2 Espacialização dos dados

Os dados utilizados para a análise da fragilidade ambiental devem estar representados em planos de informações (mapas vetoriais) para toda área de plantio com *Pinus taeda*. Desta forma, a partir de 554 pontos amostrais onde foram coletadas informações dos solos foram elaborados os mapas dos atributos físicos do solo (interpolação) e de declividade a partir das curvas de nível.

Muitos dos métodos tradicionais de interpolação incorporados em sistemas de informações geográficas (SIG) são baseados em funções matemáticas. Burrough (1986) apresenta vários métodos de interpolação espacial, tais como: método da poligonal, triangulação, média local das amostras e método da distância inversa. Em geral, estes métodos são facilmente implementados e razoavelmente rápidos, porém consideram que as amostras são independentes.

Câmara et al. (2004) citam que técnicas geoestatísticas podem ser utilizadas para se fazer a interpolação de dados e representar uma superfície contínua, considerando um comportamento homogêneo da estrutura de correlação espacial na área estudada e sua dependência espacial.

Os métodos de krigagem usam a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima, ou seja, são estimadores ótimos muito usados no estudo da distribuição espacial de atributos do solo (Vieira, 2000).

Desta forma, as predições dos atributos físicos do solo para áreas não amostradas foram realizadas através da técnica geoestatística denominada de Krigagem. Primeiramente foi efetuada uma análise descritiva dos dados para avaliar a homogeneidade, pontos discrepantes e a normalidade dos dados. A estimação por krigagem apresenta melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (Paz-Gonzalez et al., 2001). Para verificar a existência de dependência espacial foram realizadas as análises exploratórias de cada variável através do semivariograma experimental.

Para os cálculos, produção dos gráficos e ajuste do semivariograma foi utilizado o programa estatístico R e o pacote GeoR (Ribeiro e Diggle, 2001). Para a krigagem propriamente dita foi utilizada a extensão *Geoestatistical Wizard* do programa (*ArcGIS 9.0*), onde os parâmetros ajustados através da função de Máxima Verossimilhança do programa “R” foram digitados nos campos respectivos.

2.3 Mapeamento da fragilidade ambiental

O mapeamento da fragilidade ambiental consistiu basicamente em duas etapas: (a) elaboração das redes de dependência e atribuição dos valores da função de pertinência *fuzzy* para cada uma das variáveis no programa *NetWeaver* e (b) execução e a avaliação final através da extensão *EMDS* para o *ArcGIS 9.0*.

No programa *NetWeaver* a base do conhecimento é representada por objetos que são arranjados hierarquicamente e expressos graficamente por redes.

Para este estudo considerou-se que a rede “fragilidade ambiental” é dependente de outras duas redes: a rede “estado” e a rede “pressão”.

A rede “estado” por sua vez é dependente dos *data links*, que neste caso são: percentagem

de argila da camada superficial, percentagem de argila da camada subsuperficial, espessura do horizonte “A”, profundidade efetiva do solo e declividade. Já a rede “pressão” é dependente dos *data links* cobertura vegetal e atividades florestais (Figura 1).

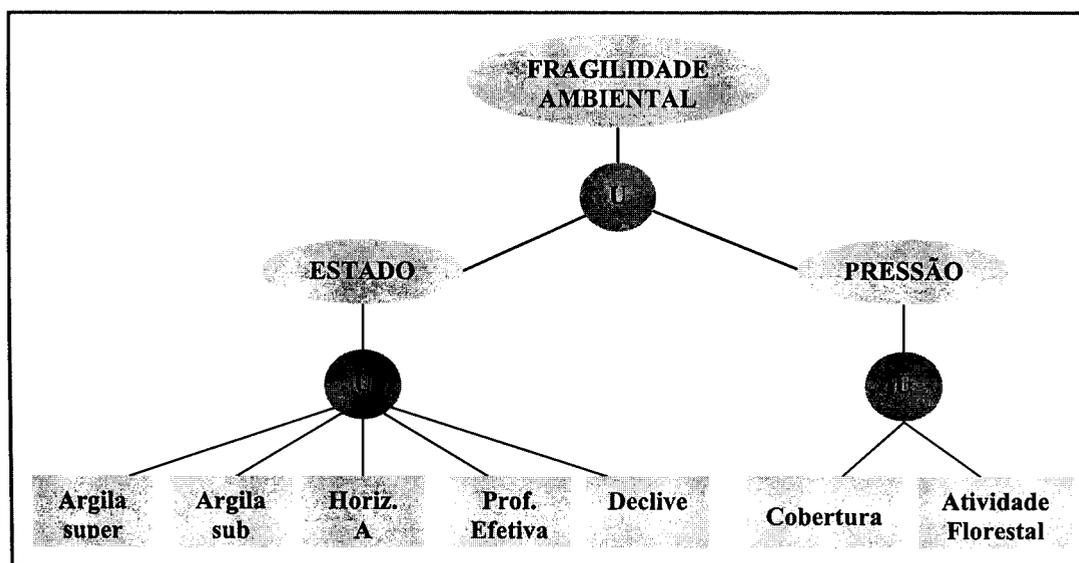


Figura 1. Esquema gráfico da rede de dependência elaborada no programa *Netweaver* (STOLLE, 2008).

Quando um *data link* é criado, define-se os argumentos de como os dados serão avaliados, que podem ser do tipo clássico (*crisp*) ou nebuloso (*fuzzy*). Um argumento do tipo clássico é baseado na lógica bivalente, onde o valor “verdade” de uma proposição é totalmente verdadeiro ou totalmente falso. Já no argumento tipo nebuloso os dados são comparados a um argumento *fuzzy* definidos por uma função de pertinência (Tabela 2), onde o valor “verdade” resultante da rede é expresso pelo grau com que aquele dado suporta a proposição definida, ou seja, pode-se ter valores parcialmente verdadeiros ou parcialmente falsos. Neste trabalho foi utilizado um argumento do tipo *fuzzy* para a proposição: “fragilidade ambiental em relação às atividades florestais”.

Tabela 2. Domínio das funções de pertinência *fuzzy* dos dados.

DADOS	VALOR VERDADEIRO	VALOR FALSO
Argila da camada superficial (%)	60	15
Argila da camada subsuperficial (%)	60	15
Profundidade efetiva do solo (cm)	100	25
Espessura do horizonte A (cm)	60	10
Declividade (°)	1,72	36,87
Cobertura (%)	100	0
Atividade Florestal (pesos unitários)	4	11

Fonte: STOLLE (2008)

Todos estes objetos, a rede e os *data links*, são conectados entre si através de operadores lógicos. Neste estudo foi utilizado o operador *UNION* (Equação 1), o qual trata seus antecedentes como uma evidência que contribui na sustentação de uma proposição, sendo que cada argumento pode compensar o outro, dependendo da utilização de pesos ou não.

$$UNION = \frac{(valor_1 * peso_1 + valor_2 * peso_2 + \dots + valor_n * peso_n)}{peso_1 + peso_2 + peso_n} \quad (1)$$

Para evitar que uma variável extremamente negativa compense outra igualmente positiva, foram adotados pesos diferenciados para cada uma das variáveis da rede “estado”. Assim considera-se que elas contribuem de maneira diferente na representação da fragilidade (Tabela 3). Para a rede “pressão” não foi determinado nenhum peso, pois não há informações suficientes para afirmar qual variável contribui mais para a fragilidade ambiental, se é a falta de cobertura ou o impacto das atividades florestais.

Tabela 3. Pesos utilizados para as variáveis da rede “estado”.

Variáveis	Peso
Declividade	5
Argila da camada superficial	4
Profundidade Efetiva	3
Espessura do horizonte A	2
Argila da camada subsuperficial	1

Fonte: STOLLE (2008)

A análise da fragilidade ambiental propriamente dita foi realizada através da extensão *EMDS* para o *ArcGIS* 9.0, tendo-se primeiramente, adicionado todos os planos de informação (mapas vetoriais) da área de estudo e, em seguida efetuado-se a leitura da base de conhecimento elaborada no *NetWeaver* para finalmente executar a análise.

3. Resultados e Discussão

3.1 Espacialização dos dados

Os parâmetros do semivariograma foram ajustados pelo Método de Máxima Verossimilhança, executado no programa “R”, onde foi utilizado o modelo exponencial para todas as variáveis.

O coeficiente de efeito pepita dado através do índice de dependência espacial (DE%) sugere que as variáveis argila superficial e argila subsuperficial apresentam forte dependência espacial (DE% >75%) até uma distância de 1.598 m e de 1.847 m definidos através dos parâmetros $\phi = 0,5329$ e $\phi = 0,6157$ respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativas dos parâmetros do modelo exponencial para as variáveis dos atributos físicos do solo.

Variáveis	nº Obs.	β	$\tau^2 (C_0)$	$\sigma^2 (C_1)$	$\phi (a)$	DE%
Argila Superficial (%)	554	4,8161	0,0876	0,3607	0,5329	80,5
Argila Subsuperficial (%)	554	5,0725	0,0740	0,4362	0,6157	85,5
Horizonte A (cm)	554	40,4243	95,6302	153,5154	0,6653	61,6
Profundidade Efetiva (cm)	554	63,0330	249,9760	303,4040	1,4170	54,8

As variáveis espessura do horizonte “A” e profundidade efetiva apresentam moderada dependência espacial, com valores de DE% entre 75 e 25% com um alcance de até $\phi = 0,6653$ e $\phi = 1,417$ equivalentes a 1.996 m e 8.502 m respectivamente (Tabela 4).

Com os resultados obtidos através do ajuste do modelo exponencial foi possível produzir os mapas dos atributos físicos dos solos através de Krigagem Ordinária.

3.2 Isoladamente – Aspectos físicos do solo e declividade

Neste trabalho, os valores resultantes da análise (valores verdade) foram divididos em três classes: alta fragilidade (-1 a -0,401) representando as áreas de extrema vulnerabilidade; fragilidade intermediária (-0,400 a 0,400); e de baixa fragilidade (0,401 a 1) representando as áreas mais estáveis ambientalmente e com menor risco à degradação (Figura 2). Verificou-se que 4,6% da área total foram considerados como de alta fragilidade, 86,4% como de fragilidade intermediária e 9% como de baixa fragilidade.

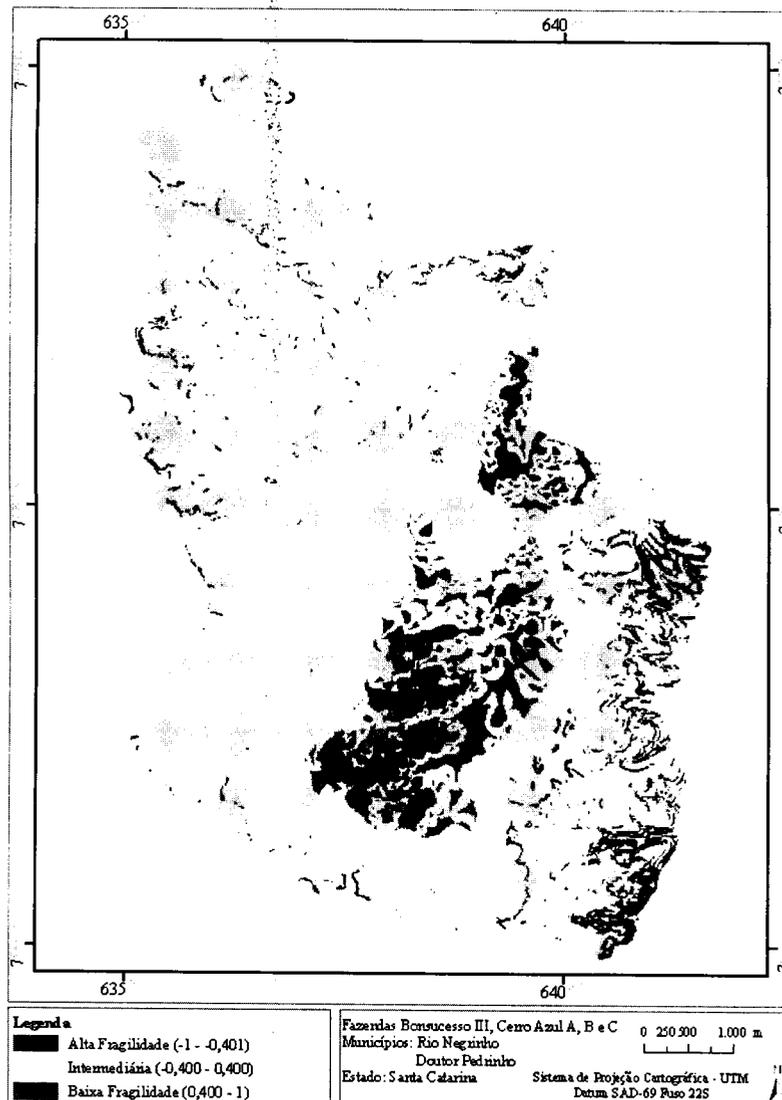


Figura 2. Mapa de fragilidade para a rede “estado”.

De uma forma geral, na classe de alta fragilidade estão incluídas as áreas mais vulneráveis a degradação, sobretudo por apresentarem simultaneamente declividades mais acentuadas e solos com textura média. Já a classe intermediária de fragilidade diz respeito às áreas que apresentam uma combinação de solos mais estáveis com declividade acentuada ou solos mais instáveis e declividade mais suave. A classe de baixa fragilidade representa áreas mais estáveis ambientalmente e com menor risco de degradação por apresentar, em sua maioria, relevo plano e solo com textura argilosa.

3.2 Em relação às atividades florestais

Analisando simultaneamente todas as atividades nas áreas de plantio, verificou-se que 78,1% da área de plantio incluem-se na classe de fragilidade ambiental intermediária para as atividades com valores de impacto de 4 a 8; 14% apresentaram baixa fragilidade ambiental para o cenário com valor de impacto igual a 4; 6,6% para os valores 4 e 5; 1,3% para valores de impacto de 4 a 6 e apenas 0,1% para os cenários com valores de impacto de 4 a 7 (Figura 3).

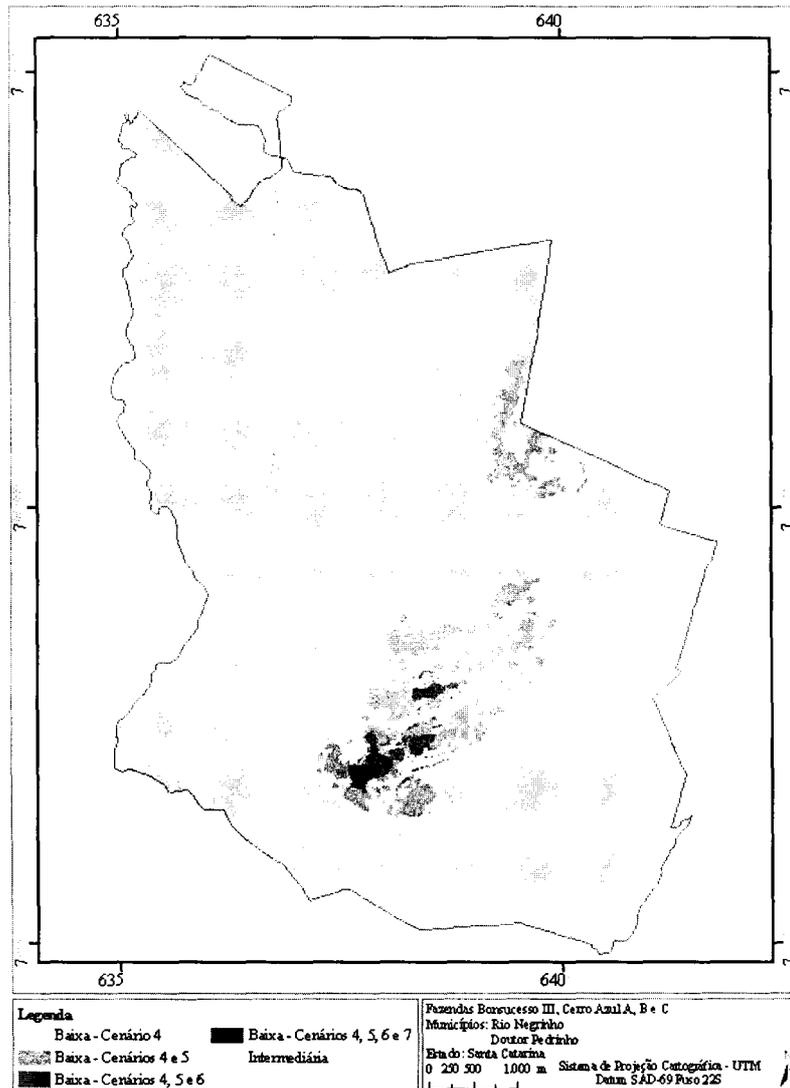


Figura 3. Mapa de fragilidade ambiental considerando todas as atividades florestais simultaneamente.

De um modo geral, pode-se constatar que à medida que os valores de impacto aumentam, diminui o valor “verdade” e conseqüentemente há um aumento da fragilidade ambiental. Por outro lado, as áreas de alta fragilidade no mapa da rede “estado” tiveram um aumento no seu valor “verdade”, ou seja, uma diminuição da fragilidade ambiental, pois se considera a presença de alguma cobertura vegetal sobre o solo proporcionando uma maior proteção sobre o mesmo.

No cenário correspondente à atividade de manutenção nas estradas, onde se considera que

não há proteção no solo pela cobertura vegetal, são encontradas 4,1% da área das estradas na classe de alta fragilidade ambiental e o restante 95,9% na classe de fragilidade intermediária.

Na classe de alta fragilidade ambiental verifica-se a ocorrência de 2,4% das áreas das estradas com fragilidade “estado” intermediária, e na classe de fragilidade ambiental intermediária, 13,2% de áreas de fragilidade “estado” baixa, ou seja, houve um decréscimo dos valores “verdade” destas áreas e conseqüentemente um aumento da fragilidade ambiental proporcionado pelo aumento do valor de impacto e pela ausência da cobertura vegetal.

4. Conclusões

a) O mapa de fragilidade ambiental serve de apoio à tomada de decisão para a seleção das técnicas de manejo, assim como, quais práticas conservacionistas devem ser adotadas;

b) Todas as áreas consideradas de fragilidade alta no mapa da rede “estado” foram classificadas como de fragilidade ambiental intermediária, por ter sido considerada a variável cobertura vegetal;

c) A fragilidade ambiental aumenta à medida que os valores de impacto das atividades florestais também aumentam, sendo menor para a atividade de manutenção manual e maior para a manutenção das estradas.

5. Referências Bibliográficas

Burrough, P.A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. New York: Oxford University Press, 1986.

Câmara, G; Monteiro, A.V.M.; Druck, S.; Carvalho, M.S. Análise espacial e geoprocessamento. In: Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.M.(Ed.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

Diccionario de la Naturaleza, Hombre, Ecologia, Paisaje. Madrid: Espasa-Calpe S.A., 1987.

Meirelles, M.S.P. **Análise integrada do ambiente através do geoprocessamento: uma proposta metodológica para a elaboração de zoneamentos**. 1997. 192 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1997.

Paz-Gonzalez, A.; Taboada Castro, M. T.; Vieira, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, p. 469-479, 2001.

Ribeiro Júnior, P.J.; Diggle, P.J. geoR: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v.1, n.2, p.15-18, 2001.

Ross, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63-73, 1994.

Stolle, L. **Simulação e espacialização da fragilidade ambiental em relação às atividades florestais**. 2008. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

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

Vieira, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V, V. H.; Schaefer, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2000. p.1-54.