

## MAPEAMENTO DA FRAGILIDADE POTENCIAL: USO E APLICAÇÕES NA SILVICULTURA DE PRECISÃO

### POTENTIAL FRAGILITY MAP: USES AND APPLICATION IN FORESTRY PRECISION

Lorena Stolle<sup>1</sup>, Christel Lingnau<sup>2</sup>, Julio Eduardo Arce<sup>2</sup>, Itamar Antonio Bognola<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Engenheira Florestal, M. Sc., Professora CPCS, UFMS, Antiga estrada para Fazenda Campo Bom, CEP: 79560-000, Chapadão do Sul –MS, lorenastolle@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Engenheiro (a) Florestal, Dr. (a)., Professor (a) do DECIF, UFPR, Av. Lothário Meissner 900, CEP: 80210-170, Curitiba-PR, lingnau@ufpr.br; jarce@ufpr.br

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Pesquisador EMBRAPA Florestas, Estrada da Ribeira km 111, Caixa Postal 319, CEP: 83411-000, Colombo-PR, iabog@cnpf.embrapa.br

#### RESUMO

O objetivo deste trabalho consistiu em elaborar um mapa de fragilidade potencial para apoiar o planejamento da execução de atividades florestais com maior precisão e menor risco de degradação ambiental. Técnicas de SIG (Sistemas de Informações Geográficas), geoestatística (Krigagem) e lógica *fuzzy* foram utilizadas para a geração dos mapas. Foram utilizadas variáveis físicas dos solos (porcentagem de argila superficial, porcentagem de argila subsuperficial, profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte A) e a declividade do terreno para gerar o mapa de fragilidade potencial. Os resultados mostraram que o modelo adotado serve como uma ferramenta para a identificação de áreas com maior susceptibilidade à degradação, permitindo que as atividades de maior impacto pudessem ser executadas com maior cautela e identificando as áreas prioritárias para a adoção de medidas conservacionistas com precisão.

*Palavras-chave:* krigagem; solos florestais; lógica fuzzy.

#### ABSTRACT

The objective of this study was to develop a potential fragility map to support the implementation of forestry activities with greater precision and less risk of environmental degradation. Techniques of GIS (Geographic Information Systems), geostatistical (kriging) and fuzzy logic were used to generate the maps. Soil physical and the slope variables were considered to generate the potential fragility map. The results showed that the adopted model serves as a tool to identify areas with increased susceptibility to degradation, allowing for greater impact activities could be performed with greater care and identifying priority areas for the adoption of conservation measures accurately.

*Keywords:* kriging, forest soils, fuzzy logic.

#### INTRODUÇÃO

A maioria das atividades florestais necessita de informações básicas do meio para o seu planejamento. Uma das informações mais relevantes é o levantamento pedológico, onde o profissional poderá obter dados de variáveis físicas do solo, que irá auxiliar na escolha do local mais adequado para a execução destas atividades, e quando não for possível, pode auxiliar na identificação dos locais onde devem ser realizadas medidas preventivas para a conservação dos solos.

Atualmente, ferramentas computacionais avançadas fazem parte do universo do planejamento florestal, atuando principalmente no campo da silvicultura de precisão, onde no caso deste estudo áreas mais susceptíveis a degradação podem ser mapeadas em qualquer escala desejada.

A susceptibilidade à degradação pode ser entendida como fragilidade ambiental, sendo citada em vários estudos (ROSS, 1994; SANTOS, 2005; KAWAKUBO *et al.*, 2005; GONÇALVES, *et al.*, 2009). Os mesmos autores citam que a fragilidade ambiental pode ser caracterizada como potencial, quando se refere à fragilidade intrínseca do meio, considerando variáveis como: classe de solo, declividade e geomorfologia, e emergente quando são inseridas variáveis do uso do solo, incluídas as atividades realizadas pelo homem, ou seja, variáveis modificadoras do ambiente em sua forma natural, como áreas de agricultura e pecuária.

Neste trabalho, propõe-se mapear a fragilidade potencial, utilizando os mapas de declividade e de algumas variáveis físicas dos solos (porcentagem de argila superficial, porcentagem de argila subsuperficial, profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte A), para apoio na tomada de decisões quanto ao planejamento das atividades florestais.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em uma propriedade de 4.352,3 ha, localizada no planalto norte de Santa Catarina, nos municípios de Rio Negrinho e Doutor Pedrinho (Figura 1).

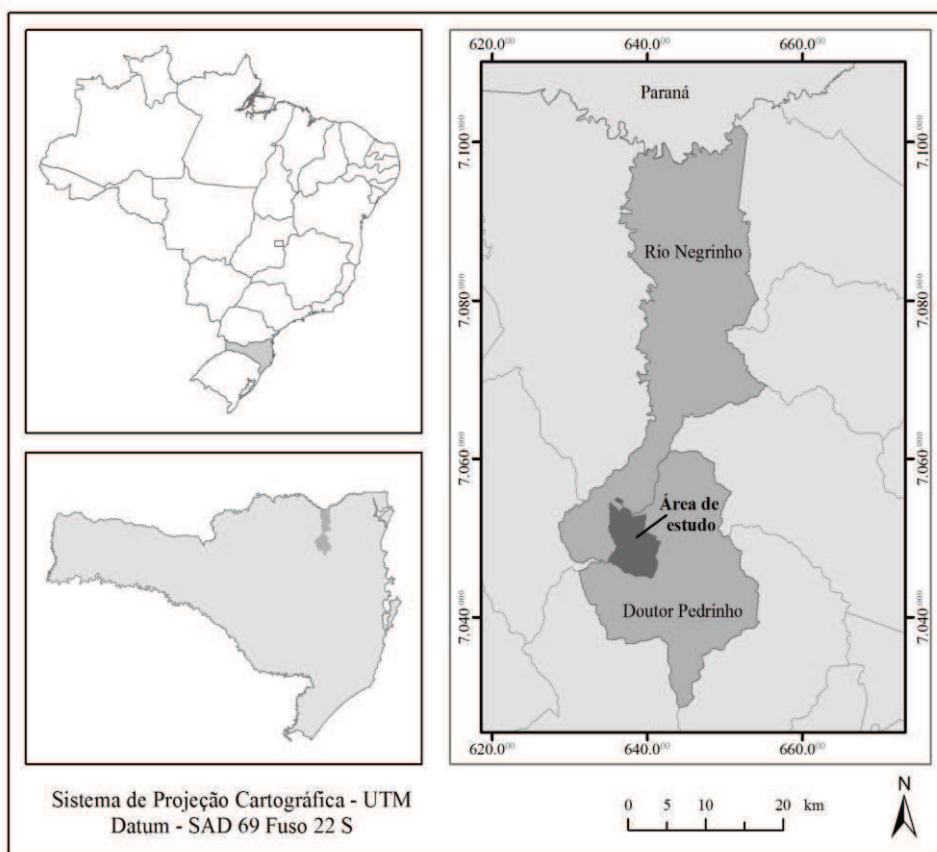


Figura1. Localização da área de estudo.  
Figure 1. Study área location.

O mapa de fragilidade potencial foi elaborado por meio de um operador *fuzzy* onde valores das variáveis físicas dos solos e da declividade foram combinados. Foram utilizados os programas *NetWeaver (Rules of Thumb, Inc.)*, o qual permite, entre outros, a conversão dos valores da função *fuzzy*, e o *ArcGis 9.0 (Esri)* para a geração dos mapas em ambiente SIG. A conexão entre um programa e o outro é dada por meio da

extensão para o *ArcMap EMDS (Ecosystem Management Decision Support)* desenvolvido pelo Serviço Florestal Americano e o Instituto da Universidade de Redlands – EUA.

As variáveis físicas dos solos utilizadas foram: porcentagem de argila superficial, porcentagem de argila subsuperficial, profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte A, as quais foram obtidas a partir de 554 amostras. As previsões das variáveis para áreas não amostradas foram interpoladas pelo método da krigagem. Para os cálculos, produção dos gráficos e ajuste do semivariograma utilizou-se o programa estatístico R e o pacote GeoR (RIBEIRO e DIGGLE, 2001), sendo ambos os programas livres dentro da licença internacional GPL (*General Public Licence*).

Primeiramente foi efetuada uma análise descritiva dos dados dos solos para avaliar homogeneidade, pontos discrepantes e normalidade dos dados. A estimativa 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 análises exploratórias de cada variável através do semivariograma experimental.

O mapa de declividade foi elaborado através do modelo numérico do terreno (MNT) gerado a partir de um arquivo de curvas de nível com equidistância de 10 metros.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a análise descritiva dos dados foi observado na área de estudo que o teor de argila da camada superficial está entre 8 e 58%; a da camada subsuperficial entre 10 e 62%; a espessura do horizonte A possui de 5 até 100 cm; e a profundidade efetiva do solo está entre 15 e 130 cm (Tabela 1). Pode-se observar todas as variáveis apresentam coeficiente de variação acima de 30%, indicando uma acentuada dispersão dos seus valores em torno da média (Tabela 1).

Tabela 1. Medidas quantitativas dos atributos físicos dos solos.

Table 1. Quantitative soils physical attributes measurements.

Variável	n° Obs.	Mínimo	Máximo	Mediana	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Argila Superficial (%)	554	8	58	24	25,16	7,76	30,83
Argila Subsuperficial (%)	554	10	62	27	28,63	9,03	31,53
Horizonte A (cm)	554	5	100	40	42,79	16,02	37,45
Profundidade Efetiva (cm)	554	15	130	70	71,07	22,55	31,75

A necessidade de transformação dos dados foi verificada através do gráfico Box-Cox (BOX e COX, 1964). O gráfico sugere que o valor de  $\lambda$  esteja entre 0,1 e 0,4 para a variável argila superficial (Figura 2a) e entre 0,1 e 0,5 para a argila subsuperficial (Figura 2b). Desta forma, optou-se por utilizar  $\lambda = 0,25$  (transformação raiz quarta) para as duas variáveis que possuem a mesma grandeza.

Já para a variável profundidade efetiva do solo e espessura do horizonte “A”, o gráfico Box-Cox mostra que o valor 1 está contido no intervalo de confiança para  $\lambda$  (Figura 2c e 2d), indicando que a não transformação dos dados atingirá resultados tão próximos quanto a utilização do valor de  $\lambda$  que maximiza esta função.

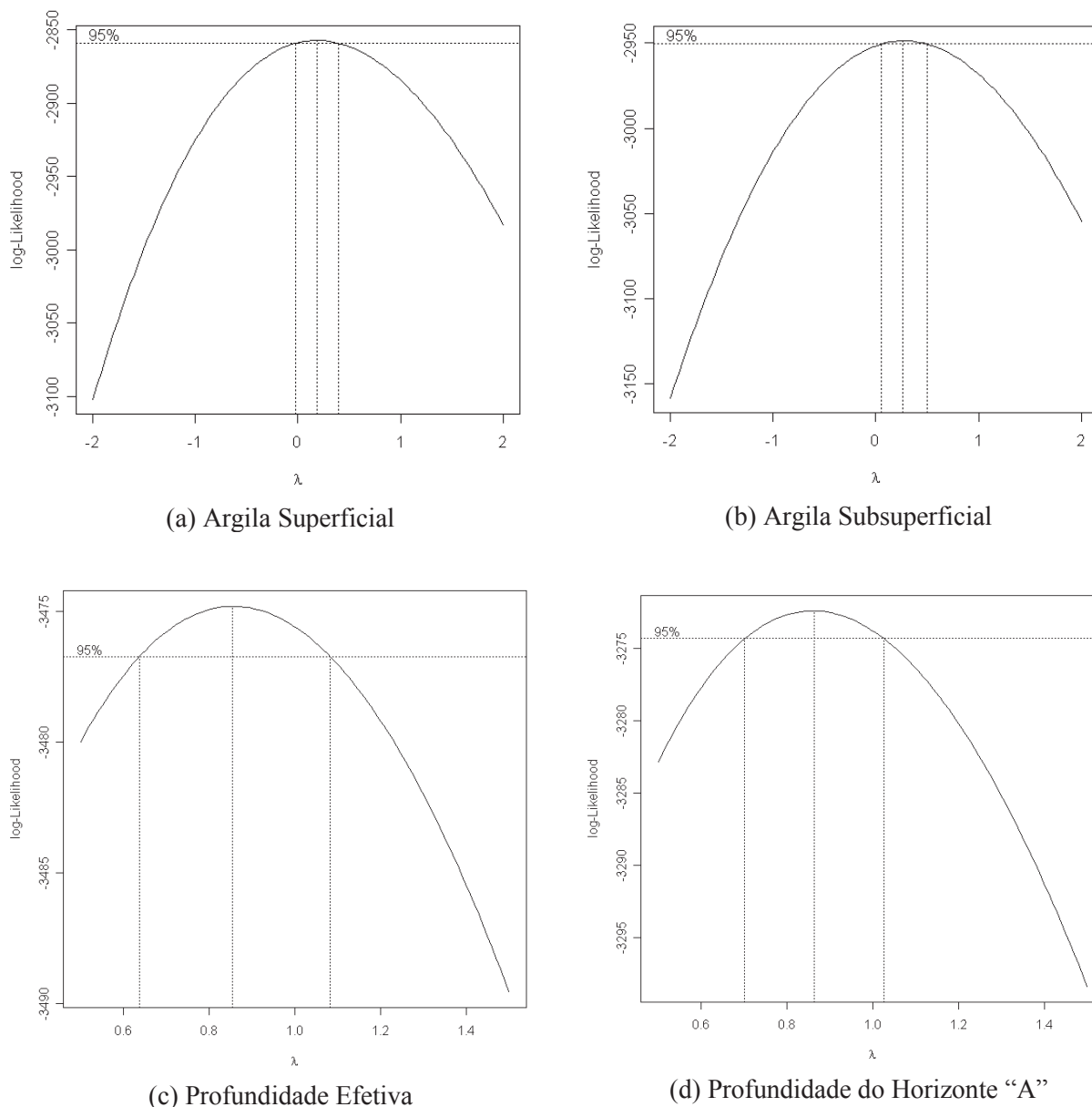


Figura 2. Gráficos Box-Cox para as variáveis dos atributos físicos dos solos.  
 Figure 2. Box-Cox charts for the soils physical attributes variables.

Após a análise exploratória dos dados, o próximo passo consistiu em ajustar o semivariograma utilizando o modelo exponencial para todas as variáveis, por se apresentar mais adequado ao formato da curva dos dados. Os parâmetros do semivariograma foram ajustados pelo Método de Máxima Verossimilhança, executado no programa “R”. MELLO (2004), trabalhando com dados para fazer estimativas volumétricas de eucalipto, encontrou melhores resultados de ajuste pelo método da verossimilhança do que pelo método dos mínimos quadrados ponderados, vantagem também apontada por DIGGLE e RIBEIRO JUNIOR (2000).

O coeficiente de efeito pepita ( $C_0$ ) dado por meio 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  $\theta = 0,5329$  e  $\theta = 0,6157$  respectivamente (Tabela 2).

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  $\theta = 0,6653$  e  $\theta = 1,417$  equivalentes a 1.996 m e 8.502 m respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos parâmetros do modelo exponencial para as variáveis dos atributos físicos do solo.  
 Table 2. Parameters estimates of the exponential model for the variables of soil physical attributes.

Variáveis	nº Obs.	$\beta$	$\tau^2 (C_0)$	$\sigma^2 (C_1)$	$\theta (a)$	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	63,033	249,976	303,404	1,417	54,8

Os resultados obtidos com o ajuste do modelo exponencial permitiram produzir os mapas dos atributos físicos dos solos por meio da Krigagem Ordinária (Figura 3).

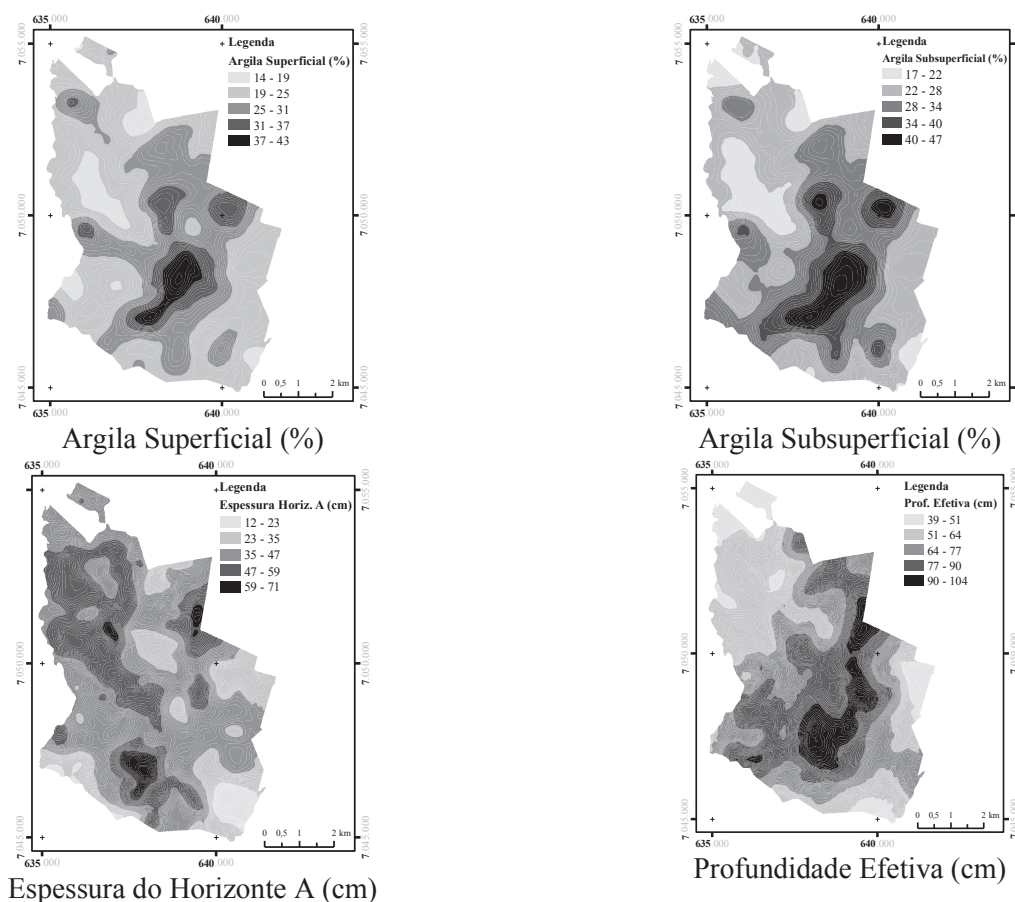


Figura 3. Interpolação espacial por krigagem dos atributos físicos do solo.  
 Figure 3. Spatial interpolation by kriging for soil physical attributes.

A Figura 4 mostra o mapa de declividade gerado a partir das curvas de nível.

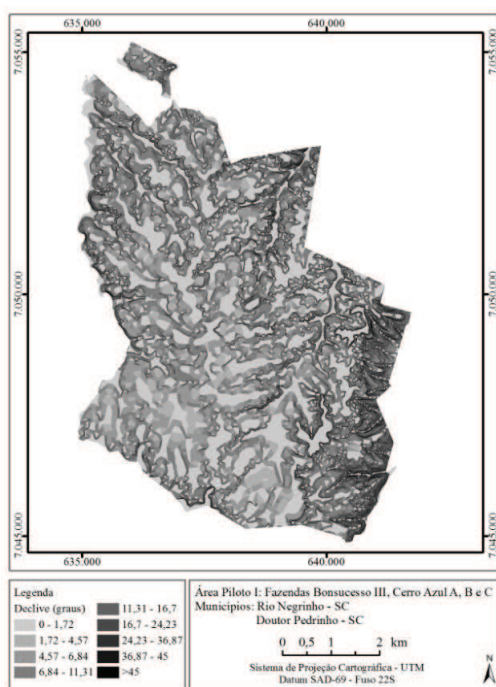
O mapa de fragilidade potencial (Figura 5), dado pela combinação das variáveis (argila superficial, argila subsuperficial, espessura do horizonte “A”, profundidade efetiva do solo e declividade), mostrou que os valores *fuzzy* de fragilidade variaram de -0,748 (mais frágil) até 0,740 (menos frágil).

As áreas de maior fragilidade (valores *fuzzy* próximo a -0,748) são caracterizadas predominantemente por apresentar declividades superiores a 36,87°, textura arenosa a média (valor de argila de até 35%) e nenhum solo com mais de 100 cm de profundidade e nem espessura do horizonte A com mais de 60 cm. A maior parte (80,6%) da área com valores “verdade” de até -0,401 são ocupadas por remanescentes de floresta nativa.

Por outro lado, as áreas consideradas menos frágeis (valores verdade próximo a 0,740) em cinza mais claro, apresentam em sua maioria relevo plano, nenhuma área com declividade igual ou superior a 36,87°, textura

argilosa ou muito argilosa (no mínimo 36% de argila), solos profundos (em torno de 100 cm) ou muito profundos (mais de 130 cm) e com espessura do horizonte A de no mínimo 60 cm.

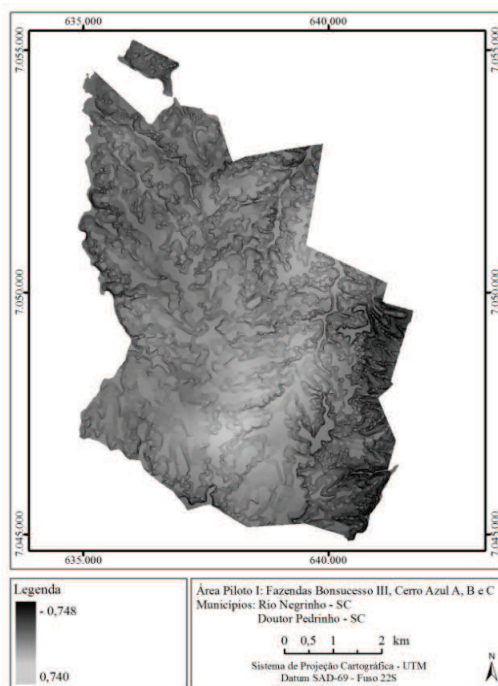
O mapa de fragilidade potencial sugere que as áreas de tonalidades mais próximas de cinza claro, são mais estáveis ambientalmente e podem ser utilizadas com menor risco de degradação.



A

Figura 4. Mapa de classes de declividade em graus.

Figure 4. Slope map in degrees.



A

Figura 5. Mapa de fragilidade potencial.

Figure 5. Potential fragility map.

## CONCLUSÕES

- a) A utilização da lógica *fuzzy* permite uma análise detalhada e flexível da fragilidade potencial onde se observa um gradiente de fragilidade em função dos valores observados *in loco*;
- b) O mapa de fragilidade potencial, com as técnicas aqui apresentadas, mostra-se adequado como uma ferramenta para a seleção das técnicas de manejo e para o planejamento das atividades florestais com precisão.

## REFERÊNCIAS

- BOX, G.E.P; COX, D.R. An analysis of transformations (with Discussion). **Journal of the Royal Statistical Society**, United Kingdom, v. 26, p. 211-252, 1964.
- DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JÚNIOR, P.J. Model-based geostatistics. In: Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística, 14., 2000, Caxambu. **Resumos...**192 p.
- GONÇALVES, G.G.G.; DANIEL, O.; COMUNELLO, E.; VITORINO, A.C.T.; PEREIRA, H.H.G.; ARAI, F.K. Caracterização empírica da fragilidade ambiental em bacias hidrográficas - o caso da bacia do Rio Dourados – MS. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2., 2009, Corumbá. **Anais...** Corumbá: CNPTIA/EMBRAPA/INPE, 2009. p. 422-432.
- KAWAKUBO, F.S.; MORATO, R.G.; CAMPOS, K.C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J.L.S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005. p. 2203-2210.
- MELLO, J.M. **Geostatística aplicada ao inventário florestal**. 110 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- 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**, United Kingdom, 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.
- SANTOS, E. **Mapeamento da fragilidade ambiental da Bacia do Rio Jirau, Município de Dois Vizinhos – Paraná**. 127 p. Dissertação (Mestrado Geografia - Gestão e Análise Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- STOLLE, L. **Simulação e espacialização da fragilidade ambiental em relação às atividades florestais**. 78 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.