

EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA DIMENSÃO FRACTAL DAS MATAS CILIARES NA ALTA BACIA DO RIO PASSA CINCO, IPEÚNA – SP

Thiago Salomão de AZEVEDO¹

Marcos César FERREIRA²

Resumo

Este trabalho apresenta uma discussão sobre os conceitos fundamentais utilizados em pesquisas voltadas ao estudo de ecologia de paisagem, através da dimensão fractal. Os resultados referentes à evolução espaço temporal das matas ciliares no período de 1962 a 1995, mostrou que D não teve grande variação. Entretanto, quando avaliamos a dimensão fractal dos fragmentos florestais de matas ciliares correlacionadas à unidades geomorfológicas, as variações foram significativas.

Palavras Chaves: Dimensão Fractal; Ecologia da Paisagem e Matas Ciliares

Abstract

Spatial and temporal change of the fractal dimension of the gallery forests in the high watershed of Passa Cinco river, Ipeúna - SP

This paper presents a theoretical discussion about landscape ecology and fractal geometry. Basic topics of landscape ecology and fractal geometry are reviewed, and different ways of interpreting landscape ecology by using fractal geometry (D) as an index of environmental change are herein proposed. The results of spatial and temporal change of the riparian landscapes in the 1962 – 1995 period showed that D are not present variation. Although when evaluate the variation of fractal dimension correlated with geomorphological units presents significative variations.

Key words: Fractal Dimension; Landscape Ecology and Gallery Forests

¹ Ecólogo, Ms. em Geografia, Unesp Rio Claro – SP. - e-mail: azevedots@bol.com.br

² Instituto de Geociências, Unicamp, Campinas – SP. - e-mail: macferre@ige.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Os ecossistemas naturais vêm sofrendo perturbações ambientais antes do surgimento da agricultura, quando o fogo e a caça eram utilizados. Com o surgimento da agricultura e da pecuária, o desmatamento tem provocado uma rápida diminuição da cobertura vegetal natural nas regiões tropicais e subtropicais.

As formações vegetais que mais sofreram com o desmatamento, provocado pela ação antrópica no Estado de São Paulo, foram às florestas de galeria que fitogeograficamente eram providas de diferentes formações vegetais com fisionomias e composições florísticas distintas, devido a grande diversidade da configuração geomorfológica dos locais onde se desenvolveram (BENDIX, 1994).

A estrutura e a dinâmica de um fragmento florestal varia em função de uma série de fatores como: o histórico de perturbação; a forma do fragmento; o tipo de vizinhança e o grau de isolamento. Um fragmento florestal apresenta uma série de características que o diferenciam da floresta contínua da qual se originou (SHELHAS e GREENBERG, 1996). Segundo Forman e Godron (1996) e Turner (2001), estas características são resultantes de complexas interações biológicas, físicas e sociais que são responsáveis pela origem de padrões espaciais.

A análise espacial dos padrões espaciais das paisagens florestais, baseados na geometria euclidiana, tem se mostrado insuficiente para identificar a diversidade e a complexidade dos padrões espaciais de sua estrutura.

Na tentativa de suprir esta dificuldade, em ecologia de paisagem, a geometria fractal, tem sido utilizada, como um método analítico para identificar padrões hierárquicos e comportamentos caóticos da dinâmica espacial e temporal de paisagens (LAM, 1990). A capacidade de quantificar a complexidade e a heterogeneidade da dinâmica espacial dos fenômenos espaciais e temporais em um único índice, independente da escala, fez com que a geometria fractal tivesse se difundido em várias áreas das ciências ambientais, mostrando-se como um método de análise espacial mais preciso (REX; MALANSON, 1990; MALANSON, 1995).

Muitos autores têm sugerido que as paisagens antrópicas exibem padrões mais simples que as paisagens naturais, quando medidas pela dimensão fractal. Quando influenciadas por perturbações naturais, as paisagens possuem padrões espaciais diferentes daquelas que são influenciadas por perturbações antrópicas. Para Burrough et al. (1981); Krummel et al. (1987), este fenômeno ocorre devido ao aumento da complexidade da paisagem.

Krummel et al. (1987), sugerem que a utilização da geometria fractal na quantificação da paisagem pode ajudar a formular hipóteses sobre os processos das interações espaciais dos padrões de sua estrutura. Esta técnica pode auxiliar na análise de dados, com base nas variações dos valores da dimensão fractal, tendo implicações imediatas nas mudanças ambientais de grandes áreas. Segundo Azevedo (2003), a paisagem ripária, localizada no setor do alto curso da Bacia do Rio Passa Cinco, vem sofrendo forte perturbação durante os últimos 40 anos. Considerando o ano de 1962 com referência, quando a vegetação ciliar possuía 1.678,85 ha, constata-se que em 1978 a vegetação diminuiu para 1.072,43 ha, isto é aproximadamente 63 % da cobertura vegetal ciliar foi desmatada.

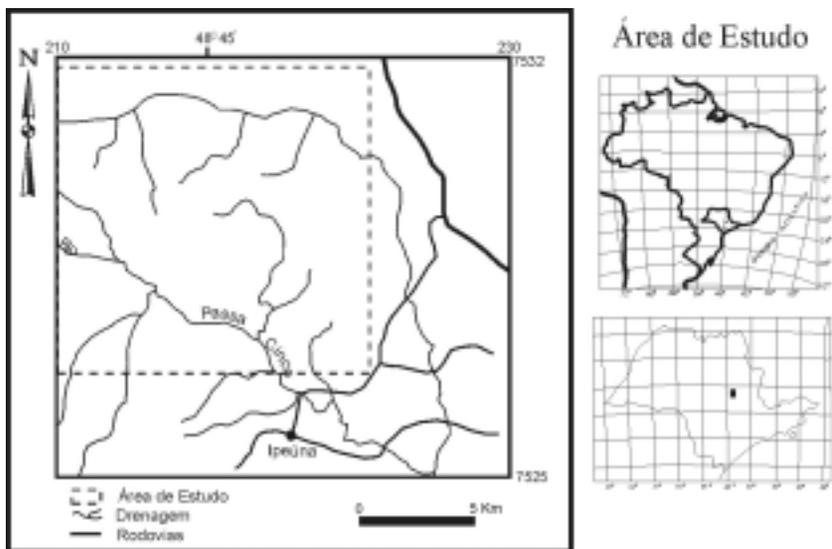
Estes dados reforçam as hipóteses de Dean (1996); Garcia (1998), em que a degradação das matas ciliares está correlacionada à mudança do uso das terras, que ocorreu devido a industrialização e a urbanização no Estado de São Paulo, que teve início após a Segunda Guerra Mundial, estendendo-se até meados da década de 70.

Para Rodrigues (1991), a degradação das matas ciliares, na década de 70 até meados da década de 80, está relacionada principalmente à agricultura extensiva de

cana-de-açúcar. No entanto, a vegetação ciliar teve um aumento de aproximadamente 41%, totalizado 1.524,25 ha, de cobertura vegetal.

Em função das observações expostas acima, o objetivo deste trabalho baseou-se na utilização de uma abordagem que busca identificar as perturbações sofridas pelos fragmentos de matas ciliares nas nascentes do Rio Passa Cinco (Figura 1), durante o período de 1962 a 1995, através de metodologias baseadas na análise fractal.

Figura 1 - Localização da área de estudo



GEOMETRIA FRACTAL: CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A geometria fractal busca considerar parâmetros propondo-nos uma nova concepção e organização do mundo, desvincilhada da mentalidade linearizada que costumeiramente estamos sujeitos. (PEITGEN et al., 1992). Neste contexto Mandelbrot (1983) nos lembra que “nuvens não são esferas, montanhas não são cones, árvores não são lisas, nem os raios viajam em uma linha reta”. Estas observações derrubam toda a nossa visão da geometria convencional (Euclidiana).

Para nossas mentes habituadas à geometria euclidiana, o conceito de dimensão topológica é tido com valores inteiros, isto é, a representação do espaço que contém um ponto ou uma linha é expresso por um valor numérico real (n); um espaço bidimensional, representado por um plano é expresso por dois números reais (n^2); um espaço tridimensional, representado por um cubo e expresso geometricamente por três valores reais (n^3) (MANDELBROT, 1983).

A dimensão fractal por Mandelbrot (1983) transcende o espaço euclidiano, onde os valores da dimensão fractal (D) completam a dimensionalidade da representação clássica em números inteiros (PEITGEN et al., 1992). Desta forma, por definição, um

fractal é um conjunto cuja dimensão de Hausdorff–Besicovitch é estritamente maior que a sua dimensão topológica.

De modo genérico, segundo Christofolletti (1999, p.68) podemos dizer:

- os valores fractais entre 0 e 0,99 correspondem a estruturas com base em pontos, como por exemplo, dados sobre precipitação em um determinado lugar;
- os valores fractais entre 1 e 1,99 correspondem a estruturas espaciais de lineamentos, considerando por exemplo, as tortuosidades e as sinuosidades das linhas costeiras, assim como os meandros dos cursos fluviais e o formato de bacias hidrográficas;
- os valores fractais entre 2 e 2,99 correspondem a estruturas espaciais de fenômenos espacialmente distribuídos na superfície terrestre, incluindo informações de ordem volumétrica. Aplicam-se para este exemplo a modelagem topográfica de bacias hidrográficas.

Os conjuntos fractais possuem duas características importantes que são consideradas como seus verdadeiros atributos: o escalante “scaling” e a auto-similaridade (PEITGEN et al., 1992).

O escalante fractal tem a propriedade de apresentar feições similares em diferentes escalas, acompanhado por um outro atributo denominado de auto-similaridade. Isto é, se ampliarmos uma imagem fractal, verificamos que a imagem ampliada é uma cópia exata de toda a figura. (STEWART, 1991).

Segundo Mandelbrot (1983) os objetos euclidianos ortodoxos perdem sua estrutura quando ampliados, um círculo, por exemplo, torna-se uma linha reta vista de uma distância menor. De maneira geral a auto-similaridade implica em padrão dentro de padrão, obedecendo a regras de escala “scaling”, ou seja, os objetos auto-similares são cópias idênticas em todas as escalas (MILNE, 1988).

Segundo Milne (1990) a propriedade de auto-semelhança possui extrema importância na mensuração dos padrões espaciais da paisagem, pois é através da auto-similaridade que podemos quantificar a dinâmica da paisagem em diferentes escalas.

Neste nível de compreensão, a estrutura espacial da paisagem mensurada em uma dada escala, pode ser extrapolada para uma outra escala, isto é, estruturas quantificadas em uma pequena escala, podem apresentar estruturas auto-similares em grandes escalas. Esta propriedade dos fractais representa um avanço na tentativa de compreensão dos processos ecológicos (MILNE, 1988, 1990; LI, 2000).

MATERIAIS E MÉTODOS

Elaboração dos mapas

A elaboração da base cartográfica foi efetuada através da compilação das cartas topográficas na escala 1:50.000 (Folha Itirapina e Rio Claro) e na escala 1:10.000 (Folhas Rio Passa Cinco, Ribeirão da Lapa, R. Monjolo Grande, Morro do Bizigueli, Jardim Ubá e Bairro Ipê), onde foi selecionada a área de estudo. A compilação dos mapas da vegetação ciliar foi realizado inicialmente a partir da interpretação de fotografias aéreas, na escala 1:25.000, 1:35.000 e 1:40.000, nos anos de 1962, 1972, 1978, 1988 e 1995, utilizando-se estereoscópio de espelhos. Depois de concluída a interpretação das fotografias aéreas, foi elaborada a legenda, definindo a classe “ma-

tas ciliares”, com base nas características de cor, tonalidade, textura e localização da vegetação em relação à drenagem, onde a mata ciliar foi definida, por possuir cor escura e textura rugosa quando comparada com as outras classes de uso do solo.

Além das fotografias aéreas também foi efetuada a interpretação da imagem SPOT (Cena Rio Claro, Órbita/Ponto 2020.76). A seleção, da banda mais apropriada para interpretar dados de vegetação baseou-se nas afirmações de Pereira, et al. (1992) e Crosta (1992), onde a banda 3 é a mais apropriada para este tipo de análise, pois possibilita uma melhor visualização da vegetação, devido as suas feições espectrais que são mais sensíveis para o olho humano, possibilitando a identificação das variações de textura com mais facilidade.

Concluída a interpretação visual da imagem SPOT e das fotografias aéreas, foram efetuadas saídas a campo que tiveram a finalidade de eliminar algumas dúvidas que não puderam ser sanadas na fase de escritório, devido à confusão da classe “mata ciliar” com outras categorias de uso das terras, por causa do efeito de sombra, que dificultou a identificação de algumas manchas de matas ciliares, pois não permitiu uma ampla percepção da textura da vegetação, não diferenciando as matas ciliares de outros tipos vegetacionais.

Nesta etapa também foi efetuada a espacialização dos fragmentos de vegetação ciliar para o período de tempo estudado. Assim, as fotografias aéreas e a imagem SPOT, já interpretadas, foram justapostas formando um mosaico, na qual insere-se a área de estudo.

Após este procedimento, os mapas da vegetação ciliar, foram compilados e escaneados no scanner A0 (Summagraphics LD 5000) do Laboratório de informática do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA – UNESP, Rio Claro). Os mapas escaneados, referente aos anos de 1962, 1972, 1978, 1988 e 1995 foram exportados para o software Auto Cad R14 (AUTODESK, 1998), onde foi digitalizado (vetorizado).

Após a digitalização, foram feitas correções nos mapas das matas ciliares, pois quaisquer fontes de dados que sejam oriundas de fotografias aéreas ou de imagem de satélite, estão sujeitas a uma série de distorções espaciais, isto é, estes dados não possuem precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos representados, que acarretam em mudanças na escala da imagem, causando distorções (Crosta, 1992; Chuvielo 2000 e D’alge 2001). Para corrigir estes erros foram efetuadas correções baseadas no estabelecimento de propriedades de escala e de projeção nos mapas digitalizados, através do georreferenciamento. Esta técnica parte do princípio de que as diferenças de posicionamento de pontos nos mapas digitalizados possam ser estimados e corrigidos (D’ALGE, 2001).

Para efetuar este procedimento, primeiramente foi necessário estabelecer pontos de controle, baseados em feições homólogas às cartas topográficas, às fotografias aéreas e à imagem SPOT. Após o estabelecimento dos pontos de controle e das coordenadas geográficas, o mapa, das matas ciliares, foi exportado para o software Auto Cad Map R14 (AUTODESK, 1998), onde foi efetuada a operação de registro geométrico, utilizando a função *Rubber Sheeting*, existente no módulo MAP. Este procedimento consistiu na realização de um ajuste da base de dados, possibilitando o referenciamento da mesma a um sistema de projeção cartográfica, através da correspondência entre os pontos de controle, estabelecidos no mapa digitalizado, com as coordenadas, coletadas pelo GPS. Com isto, o conjunto de dados registrados estarão referenciados ao mesmo sistema de coordenadas e as distorções de escala e de deslocamento existentes no mapa das matas ciliares foram corrigidos, com uma precisão de 10 metros.

Os mapas dos fragmentos de matas ciliares foram convertido para o formato raster no Sistema de Informação Geográfica Idrisi (EASTMAN, 1999). Em seguida

foram calculados valores de área e perímetro dos fragmentos de matas ciliares. Nesta etapa foram considerados apenas fragmentos com área superior a 10 ha. Este procedimento foi utilizado por Silva (2002) na avaliação dos fragmentos florestais do médio vale do Rio Paraíba do Sul. Segundo Tabarelli et al. (1999), este procedimento faz-se necessário, pois 10 ha (hectares) é área mínima para que um fragmento apresente significativas variações de complexidade de forma.

Cálculo das métricas de ecologia de paisagem das matas ciliares na alta bacia do rio Passa Cinco

Nesta etapa, foram efetuados o cálculo da dimensão fractal (D) e do índice de perturbação (I_p) das matas ciliares, nas datas 1962, 1972, 1978, 1988 e 1995, discriminado por unidades geomorfológicas.

O cálculo da dimensão fractal (D), foi utilizado um método baseado na relação área/perímetro. Este método utilizado foi desenvolvido por Clark (McGARRIGAL, 1995) e baseia-se na relação:

$$D = 2 \ln(0,25P) / \ln(A) \quad (1)$$

onde: D = Dimensão Fractal

$\ln(P)$ = logaritmo neperiano do Perímetro multiplicado por uma constante

$\ln(A)$ = logaritmo neperiano da Área

Neste método a constante K é responsável pela homogeneização dos padrões de invariância escalar de fragmentos, mantendo a proporção da dimensão fractal entre pequenos e grandes fragmentos.

O índice de perturbação adotado nesta pesquisa foi o mesmo utilizado por O'Neill et al (1988) e Luque et al (1994), sendo expresso pela seguinte relação:

$$I_p = A_{nmc} / A_{mc} \quad (2)$$

onde: I_p = Índice de perturbação

A_{nmc} = porcentagem da área de matas ciliares esperada em uma determinada unidade geomorfológica

A_{mc} = porcentagem da área de matas ciliares em uma unidade geomorfológica

A área de matas ciliares esperada corresponde à área máxima onde potencialmente deveriam ocupar sem interferência antrópica. Estes valores foram estimados a partir das constatações de Troppmaier e Machado (1974), considerando as condições topográficas condicionantes da distribuição espacial na área de estudo.

Para a obtenção destes valores, primeiramente gerou-se um mapa de distâncias de drenagem no módulo *Distance Operators*, através da função *Distance*. Este procedimento teve a finalidade de efetuar o cálculo de zonas de distâncias ("buffer") a partir da rede hidrográfica. Em seguida efetuou-se a sobreposição deste mapa de distâncias ao mapa geomorfológico utilizando-se a função *Overlay* do módulo *Mathematical Operators* do Idrisi 32 (EASTMAN, 1999).

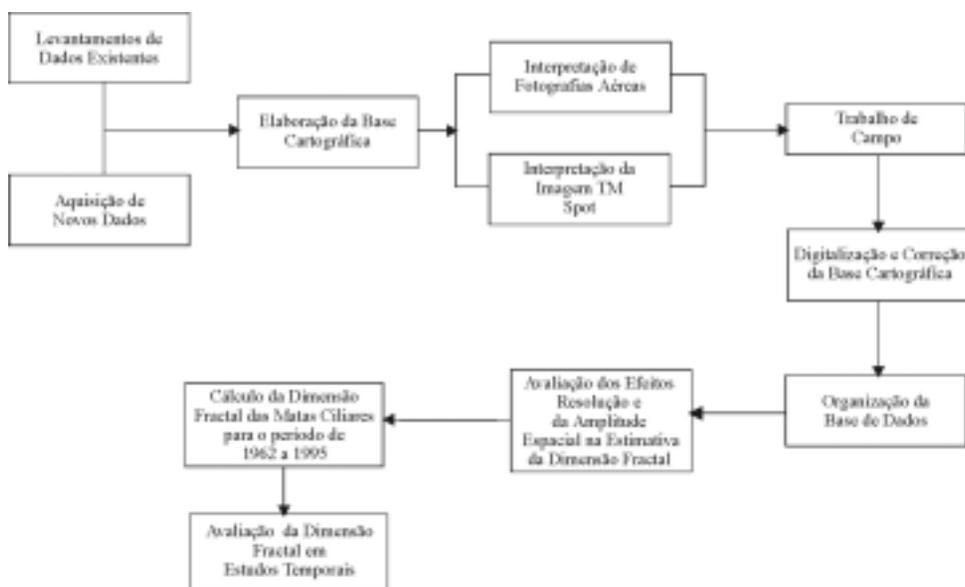
A combinação do mapa de distâncias da drenagem com o mapa geomorfológico originou um mapa que contém as zonas de distâncias da drenagem, em relação à rede hidrográfica contidas nas unidades geomorfológicas.

A próxima fase consistiu-se na elaboração das zonas de ocupação esperada das matas ciliares. Nesta fase foram aplicadas técnicas de sobreposição de mapas, no módulo *Mathematical Operators* do SIG Idrisi. Através da função *Overlay*, o mapa de vegetação ciliar do ano de 1962, fonte de dados mais antiga que obtivemos, foi sobre-

posto ao mapa de distância de drenagem, discriminando as unidades geomorfológicas. Este procedimento permitiu a visualização da extensão das matas ciliares em cada unidade geomorfológica.

A análise temporal da dimensão fractal das matas ciliares foi efetuada utilizando-se técnicas de comparação múltipla entre mapas. Os mapas de vegetação ciliar (1962, 1972, 1978, 1988, 1995), foram superpostos ao mapa geomorfológico da área de estudo, compilado a partir do mapa elaborado por Lopes (2000), sendo responsável pela avaliação das relações ecológicas dos fragmentos de matas ciliares no período de 1962 a 1995. A seqüência metodológica no desenvolvimento deste trabalho é sistematizada na figura 2.

Figura 2 - Seqüência metodológica



DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da análise estatística da evolução espaço-temporal da dimensão fractal (D) durante o período de 1962 a 1995 são apresentados na tabela 1.

Na tabela 1, observamos que o coeficiente de variação (CV) da dimensão fractal (total), das matas ciliares é pequena, apresentando 1,807 %.

Os resultados mostram que o desmatamento responsável pela modificação da estrutura da paisagem ripária nem sempre apresentam altos valores de variação, pois a forma dos fragmentos de matas ciliares e conseqüentemente a dimensão fractal, estão correlacionadas a diferentes fatores, como por exemplo, o grau de perturbação antrópica, a topografia, o uso do solo, dentre outros.

A quantificação das configurações espaciais no tempo denotam um conjunto de conceitos que são responsáveis pela detecção das variações espaço-temporais dos fragmentos da paisagem.

Tabela 1 - Estimativa do coeficiente de variação da dimensão fractal para o período de 1962 – 1995

Data	Vales Fechados	Colinas	Vales Abertos	Dimensão Fractal	Área (ha) da matas ciliares
				Total das Matas Ciliares	
1962	1,197	1,134	1,204	1,178	1678,85
1972	1,204	1,144	1,104	1,151	1498,72
1978	1,197	1,154	N/D*	1,176	1072,43
1988	1,190	1,164	1,131	1,161	1480,45
1995	1,199	1,158	1,181	1,179	1524,25
Média dos valores de D					
durante o período de 1962 - 1995	1,198	1,151	1,155	1,168	
Desvio Padrão	0,005	0,011	0,045	0,020	
CV (%)	0,443	1,018	3,961	1,807	

N/D*: como a amostra não possui um conjunto amostral representativo, estes dados

Para Pfaltz e Fresch (1994), a representação das variações espaço-temporais não são bem compreendidas. A habilidade de representar a dinâmica temporal de um determinado fenômeno, em contraste aos sistemas estáticos, depende de um conjunto de condições prévias que estão relacionadas à dinâmica dos processos ecológicos.

Segundo Dunn e Sharpe (1994), as variações espaço-temporais dos padrões da paisagem são oriundas da combinação das perturbações antrópicas e naturais. Estas perturbações, por sua vez, podem ser mais significativas somente em uma determinada escala de tempo. Em cada unidade de paisagem, a variação espaço-temporal pode exibir comportamentos distintos dependendo da escala temporal.

Segundo Magnuson (1990, apud TURNER et al., 2001), o padrão flutuante da escala temporal pode ser classificado como *"the invisible present"* (o presente invisível), e em muitos casos, pode influenciar a quantificação dos padrões espaciais da paisagem.

Entretanto, Forman e Godron (1983), alertam que os arranjos espaciais podem apresentar determinados padrões espaciais em uma determinada escala temporal, que acabam, por sua vez, por não representar corretamente a dinâmica da paisagem, mascarando assim os processos ecológicos.

As influências que têm os cursos d'água sobre as florestas dependem de características geológicas, geomorfológicas, climáticas, edáficas, hidrológicas e hidrográficas, tanto em escalas locais e regionais (RODRIGUES, 2000; RODRIGUES; SHEPHED, 2000).

A topografia pode influenciar a riqueza e a distribuição das espécies vegetais que compõem o ecossistema ripário e pode influenciar no grau de perturbação dos fragmentos florestais de matas ciliares (EVERSON; BOUCHER, 1998).

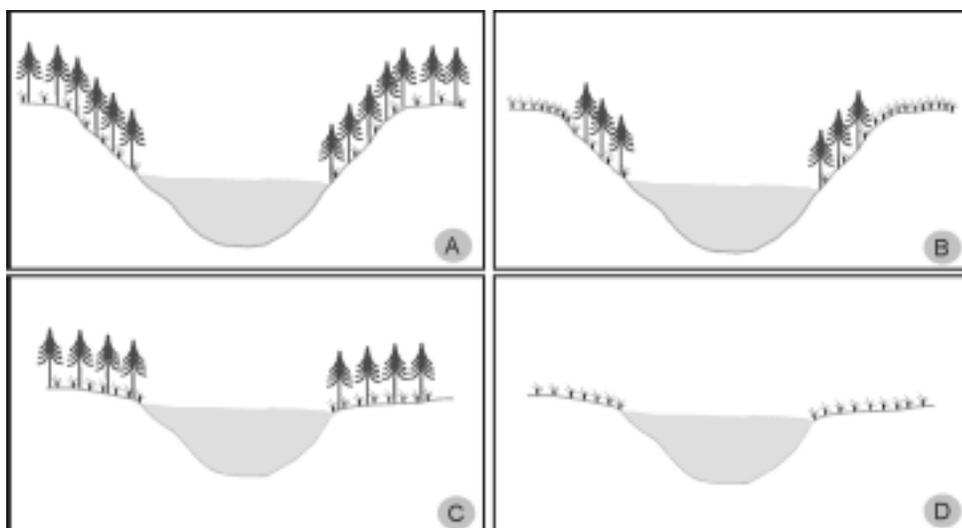
Segundo Malanson (1995), o ecossistema ripário apresenta dois gradientes direcionais de perturbação: o longitudinal e o lateral.

O gradiente longitudinal divide o ecossistema ripário em zonas discretas, em que considera o ecossistema fluvial como um ecossistema contínuo, da nascente a foz, onde os processos ecológicos possuem características distintas dependendo das condições físicas do ambiente (BOON, 1992).

O gradiente lateral é responsável pela manutenção dos ciclos hidrobiológicos e hidrogeomorfológicos dos ecossistemas. Neste sentido, este gradiente pode providenciar a estruturação de novos habitats, assim como na regularização da temperatura, da umidade, do fluxo de nutrientes, na ocorrência de erosão, etc. (BOON, 1992). O gradiente lateral, aliado às condições geomorfológicas da paisagem, pode servir como barreira às perturbações antrópicas.

Desta forma, as matas ciliares localizadas em vales abertos, com ampla planície de inundação, tendem a sofrer mais intensivamente as pressões antrópicas, do que as matas ciliares localizadas em vales fechados e em colinas (Figura 3).

Figura 3 - Modelo dos tipos de influência da topografia na distribuição das matas ciliares, proposto para Alta Bacia do Rio Passa Cinco



Na figura 3, observa-se que as matas ciliares situadas em vales abertos foram totalmente dizimadas pela ocupação agrícola (3C e 3D). Todavia, este processo de degradação foi menos intenso nas matas ciliares situadas nos vales fechados (3A e 3B), pois a declividade foi um fator atenuante, dificultando a ocupação antrópica para fins agrícolas.

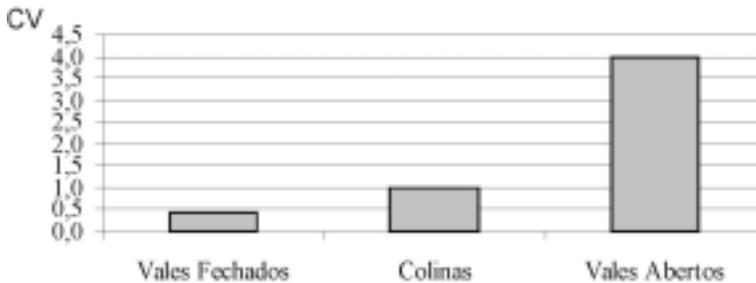
Este tipo de comportamento da cobertura vegetal é uma particularidade das matas ciliares, pois as florestas de "terra firme", exceto por fator de declividade acentuada, não apresentam esta maior resistência à ação antrópica.

Sendo assim, em estudos de ecologia da paisagem os aspectos topográficos podem influenciar no resultado dos indicadores utilizados para quantificar os padrões espaciais da vegetação. Neste sentido, a geomorfologia pode atuar como um regulador natural da variação da dimensão fractal no tempo. Este tipo de comportamento, por sua vez, seria o responsável pela pequena variação dos valores de dimensão fractal em escalas temporais antrópicas.

Estas constatações podem ser observadas em nosso estudo através do coeficiente de variação da dimensão fractal das matas ciliares, discriminadas em unidades

geomorfológicas. Nos vales fechados, nas colinas e nos vales abertos, o coeficiente de variação de D é respectivamente de 0,443; 1,018 e 3,961 % (Figura 4).

Figura 4 - Valores do coeficiente de variação (CV) de D, correspondentes ao período 1962 - 1995, segundo as unidades geomorfológicas



Os vales abertos apresentam os maiores valores do coeficiente de variação de D para as matas ciliares, se comparados às colinas e aos vales fechados. Isto acontece porque os vales abertos apresentam extensas áreas planas que facilitam as atividades agropecuárias, o mesmo não acontecendo com as colinas e os vales fechados onde as declividades são maiores. Estas condições topográficas funcionam como fatores limitantes à atividade agropecuária, preservando os fragmentos de mata ciliar.

Segundo Penteadó (1968), a degradação das matas ciliares é mais contundente nos vales abertos, pois além de possuir áreas extensas com pouco declive, esta unidade geomorfológica possui solos com maior potencialidade agrícola, sendo aproveitados para o cultivo de arroz e de cana-de-açúcar, além das pastagens.

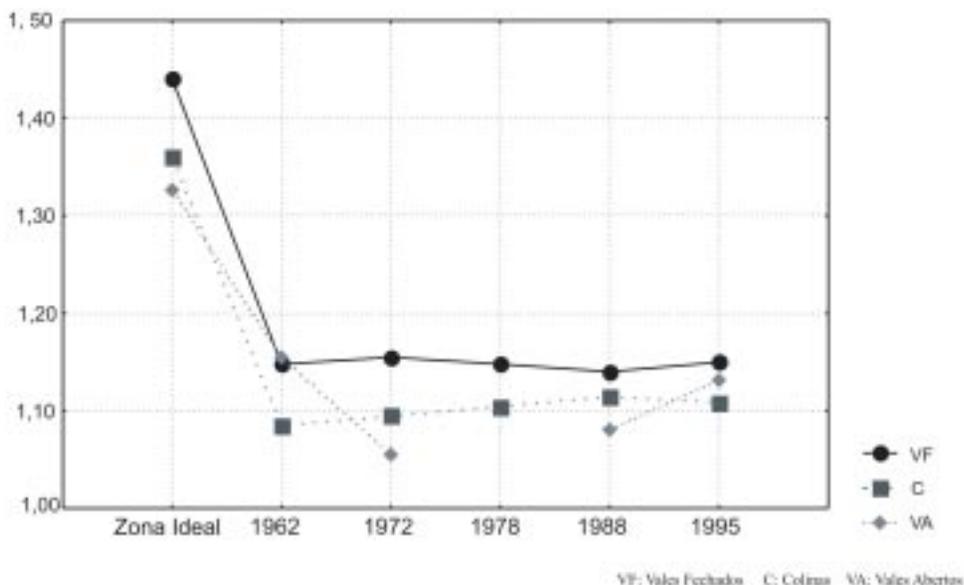
Estas constatações podem ser observadas na figura 5, onde as curvas da evolução espaço-temporal da dimensão fractal da mata ciliar assume comportamentos diferentes de acordo com a unidade geomorfológica. Nesta figura, notamos também que a diferença dos valores de D, entre os vales abertos, os vales fechados e as colinas, deve-se também à maior suscetibilidade ao desmatamento nos vales abertos, no início do período estudado.

Nos vales abertos, os valores de D situam-se entre 1,10 e 1,20; nas colinas estes valores posicionam-se entre 1,13 e 1,16 e por fim, nos vales fechados, os valores de D variam de 1,19 a 1,20. Estas amplitudes de variação devem-se às características das unidades geomorfológicas que influenciam a morfologia dos canais e conseqüentemente na configuração espacial das matas ciliares.

Os fragmentos florestais com grande influência antrópica possuem formas ortogonais com baixos valores de dimensão fractal. Contudo, nos vales fechados, os valores de D variam de 1,19 e 1,20, apresentando assim, maior complexidade morfológica, devido à tortuosidade do canal fluvial e à declividade local, se comparados aos fragmentos de matas ciliares localizados nos vales abertos, geralmente com valores de D inferiores a 1,16.

A unidade colinas, por sua vez, apresenta-se em uma posição intermediária aos vales abertos e fechados. Desta forma os valores de D para as matas ciliares apresentam fragmentos florestais mais retinizados, com valores de D próximos a 1,13, e fragmentos florestais com formas mais complexas, com valores de D próximos a 1,16.

Figura 5 – Evolução Espaço Temporal de D de Mata Ciliar: 1962-1995



Com base na figura 5, nota-se que nos vales fechados o valor de D teve uma pequena diminuição de 1962 a 1988, porém um pequeno aumento entre 1988 e 1995. As colinas por sua vez, apresentam um comportamento distinto deste, o valor de D aumenta de 1962 a 1978 e diminui no período seguinte, de 1988 a 1995. Nos vales abertos observamos dois comportamentos: durante o período de 1962 a 1972, notamos que os valores de D, dos fragmentos superiores a 10ha, diminuíram chegando a desaparecer completamente em 1978, e voltando a expandirem no período posterior (1988 a 1995).

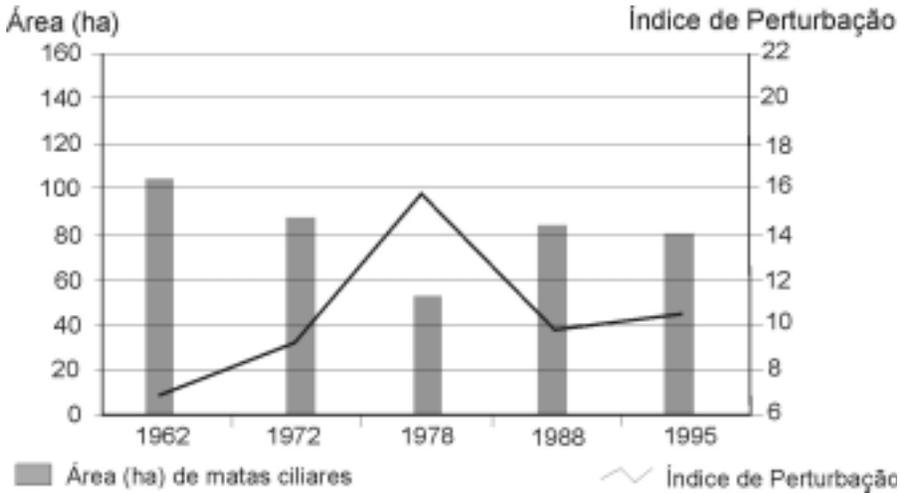
Estes resultados mostram que os vales abertos foram às unidades que mais sofreram intervenções antrópicas durante o período estudado.

Na tabela 2 e nas figuras 6, 7 e 8, relacionamos a degradação da mata ciliar com um índice de perturbação.

Tabela 2- Valores do índice de perturbação para o período de 1962 a 1995

Data	Índice de Perturbação		
	Vales Fechados	Vales Abertos	Colinas
1962	2,2	7,6	5,4
1972	2,5	9,4	6,9
1978	3,9	15,4	7,8
1988	2,6	9,6	7,9
1995	2,3	10,3	7,3

Figura 6 – Relação entre a evolução dos valores do índice de perturbação e da área dos fragmentos de mata ciliar, no período de 1962 a 1995, na unidade de vales abertos



Na figura 6 observa-se que no período de 1962 a 1978, a mata ciliar sofre degradação passando de 106 ha para 56 ha. Esta degradação é refletida pelo índice de perturbação, uma vez que à medida que ocorre a diminuição das matas ciliares, os valores do índice de perturbação variam de 8 para 15.

No período de 1978 a 1988, nota-se que com o aumento da vegetação ciliar de 56 ha para 86 ha, com valor de 9,6. Em 1995, a degradação da matas ciliar continuou, passando a 81 ha, onde o índice de perturbação aumentou para 10,3.

Nas colinas (Figura 7) observa-se que à medida que ocorre a degradação da mata ciliar, de 1601 ha para 115 ha, no período de 1962 a 1988, o índice de perturbação aumentou, passando de 5,4 a 7,9. No período de 1988 a 1995, nota-se que a vegetação ciliar aumentou para 123 ha e o índice de perturbação diminuiu para 7,3.

Nos vales fechados (Figura 8) observa-se que à medida que ocorre a degradação da mata ciliar, de 1381 ha para 903 ha, o índice de perturbação aumentou, passando de 2,2 a 3,9. No período de 1988 a 1995, notamos que a vegetação ciliar aumentou para 1307 ha e o índice de perturbação diminuiu para 2,3.

Figura 7 – Relação entre a evolução dos valores do índice de perturbação e da área dos fragmentos de mata ciliar, no período de 1962 a 1995, na unidade colinas

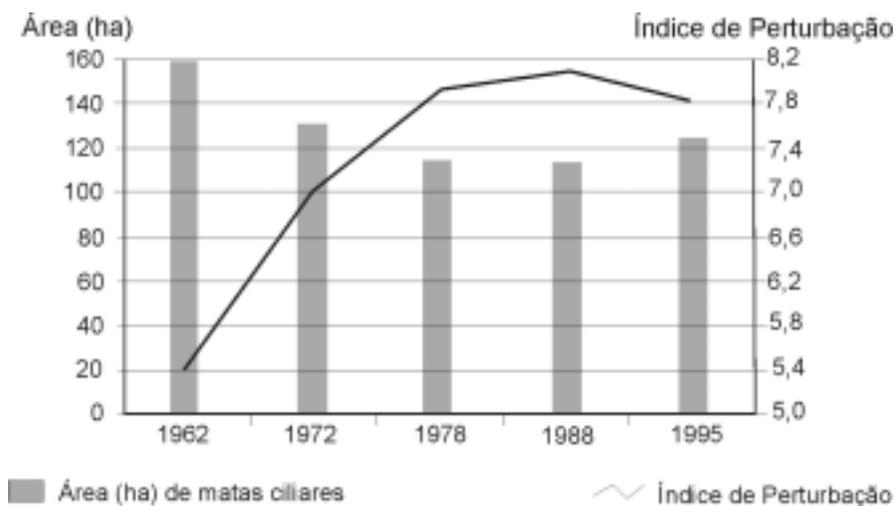
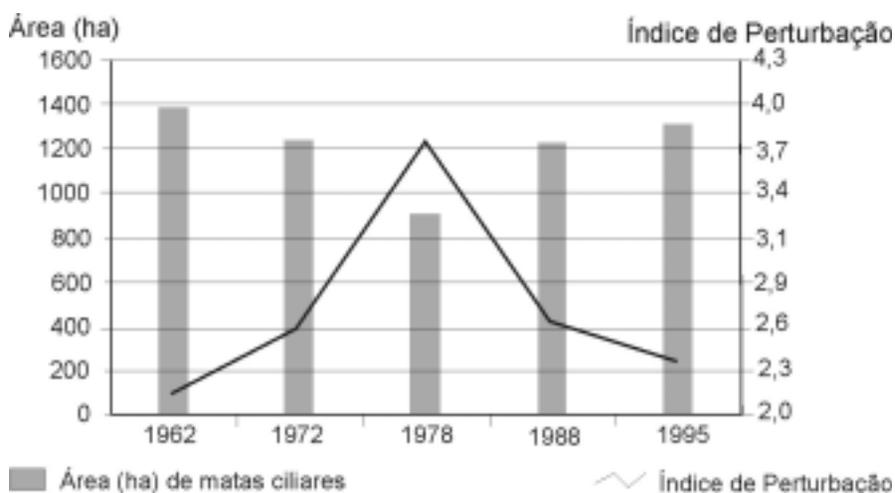


Figura 8 – Relação entre a evolução dos valores do índice de perturbação e da área dos fragmentos de matas ciliares, no período de 1962 a 1995, na unidade de valores fechados



A tabela 2 e as figuras 6, 7, e 8 também mostram que os maiores valores do índice de perturbação situam-se nos vales abertos e nas colinas, onde a magnitude do índice de perturbação varia de 7,6 a 15,4 nos vales e 5,4 a 7,3 nas colinas respectivamente. Os vales fechados, por sua vez, apresentam menor intensidade de degradação das matas ciliares, apresentando o índice de perturbação com magnitude de 2,2 a 3,9.

Estes resultados confirmam a hipótese de que os vales abertos foram os locais que mais sofreram influência antrópica. As colinas estão em um estado intermediário de degradação e os vales fechados, apresentam-se como local de menor interferência antrópica.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados da análise espaço-temporal das matas ciliares, discriminados segundo unidades geomorfológicas, foram encontrados resultados distintos. A mata ciliar localizada nos vales fechados são as que menos sofrem interferência antrópica. Em um estado intermediário, as colinas, apresentaram um grau de perturbação médio. Por fim, nos vales abertos, a mata ciliar sofreu a maior perturbação antrópica.

Os resultados apresentados e discutidos neste trabalho constituem-se em contribuição aos estudos a serem desenvolvidos por outros pesquisadores, na área ecologia da paisagem e teoria dos fractais.

Contudo, deve ser salientado, que a teoria dos fractais, como qualquer outro modelo matemático apresenta limitações. O sucesso deste tipo de pesquisa depende principalmente da qualidade e da disponibilidade dos dados. Não se pode deixar de considerar que a natureza do objeto pode influenciar no resultado das variações temporais e também que, pequenas variações de D podem representar mudanças significativas na paisagem, principalmente quando são incorporados dados biológicos. Sendo assim, caberá ao pesquisador ter à mão um bom conhecimento teórico-metodológico para decidir qual será o equilíbrio entre esses extremos.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP (processo 00/08517-2)

REFERÊNCIAS

- AUTODESK, Inc. **AUTOCAD MAP Release 2: user's guide**, EUA. 1998.
- AZEVEDO, T. S. **Evolução Espaço Temporal da Dimensão Fractal de Matas Ciliares na Alta Bacia do Rio Passa Cinco – Centro Leste do Estado de São Paulo**. 2003. 161f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

- BENDIX, J. Scale, Direction, and Pattern in Riparian Vegetation – Environment Relationships. **American Geographers**, Oxford, v. 84, n. 4, p. 652–665, 1994.
- BOON, P. J. Essential Elements in the case for river conservation. In: BOON, P. J.; CALOW P.; PETTS, G. E. **River Conservation and Management**: New York: Wiley, 1992. p. 1–10
- BURROUG, P. A. Fractal dimensions of landscapes and other data. **Nature**, New York, v. 294, n. 5838, p. 240–242, 1981.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236p.
- CHUVIECO, E. Tratamiento digital de imágenes: Correcciones y Realces. In: _____ **Fundamentos de Teledetección Espacial**. Madrid: Rialp, 2000. p. 207–318.
- CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: Editora da Unicamp, 1992. 170p.
- D'ALGE, J. C. L. Cartografia para Geoprocessamento. In: CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; D'ALGE, J. C. L. (Eds) **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE. 2001. Disponível em:
<<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser300/referências.html>>. Acesso em: 28 jul. 2001.
- DEAN, W. **A Ferro e fogo: a história da devastação da mata atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1996. 484p.
- DUNN, C. P.; SHARPE, D. M. Methods for analyzing temporal changes in landscape pattern, In: TURNER, M.; GARDNER, R. **Quantitative Methods in Landscape Ecology**: New York: Springer Verlag, 1994. p.173–198
- EASTMAM, J. R. **Idrisi for Windows: user's guide**. Worcester: Department of Geography of Clark University, 1999. 2v.
- EVERSON, D. A.; BOUCHER, D. H. Tree species-richness and topographic complexity along the riparian edge of the Potomac river. **Forest Ecology and Management**, New York, v. 109, p. 305–314, 1998.
- FORMAN, R. T. T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. New York: Wiley, 1986. 619p.
- GARCIA, L. B. R. **Ocupação e Desenvolvimento Econômico da Bacia do Corumbataí – Século XVII a XX**. Rio Claro: UNESP, 1998. 70p.
- KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. H.; SUGIHARA, G.; O'NEILL, R. V.; COLEMAN, P. R. Landscape patterns in a disturbed environment. **Oikos**, Copenhagen, v. 48, p. 321–324, 1987.
- LAM, N. S. N Description and measurement of Landsat TM images using fractals. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 56, n. 2, p. 187–198, 1990.
- LI, BAI-LAN Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. **Ecological Modeling**, Copenhagen, v. 132, p. 33–50, 2000.
- LOPES, P. M. **Estudo dos atributos do meio físico como base para o zoneamento geoambiental das Bacias do Rio Passa Cinco e Rio da Cabeça: escala 1:50.000**. 2000. 136f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Instituto, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos
- LUQUE, S. S.; RATHROP, R. G.; BOGNAR, J. A. Temporal and spatial changes in an area of the New Jersey Pine Barrens landscape. **Landscape Ecology**, Haugue, v. 9, n. 4, p. 287–300, 1994.

- MALANSON, G. P. **Riparian Landscapes**. New York: Cambridge University Press, 1995. 293p.
- MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. San Francisco: Freeman, 1983. 468 p.
- McGARIGAL, K.; MARKS, B. J. **Fragstats**: Spatial pattern analysis program for quantifying structure. Portland: Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995. 122 p.
- MILNE, B. T. Measuring the fractal geometry of landscapes. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 27, p. 67–79, 1988.
- _____. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M.; GAEDNER, R. (Ed.) **Quantitative Methods in Landscape Ecology**: The Analysis and Interpretation of Landscape Heterogeneity. New York: Springer Verlag, 1990. p. 199-235.
- MLADENOFF, D. GERALD, J. N.; MARK, A. W. Effects of changing landscape pattern and U.S.G.S. land cover data variability on ecoregion discrimination across a forest-agriculture gradient. **Landscape Ecology**, Amsterdam, v. 12, p. 379–396, 1997.
- O'NEILL, R. V.; KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. H.; SUGIHARA, G.; JACKSON, B.; De ANGELIS, D. L.; MILNE, B. T.; TURNER, M. G.; ZYGMUNT, B.; CHRISTENSEN, S. W.; DALE, V. H.; GRAHAM, R. L. Indices of Landscape pattern. **Landscape Ecology**, Hague, v. 1, n. 3, p. 153-162, 1988.
- PEITGEN, H. O. P; JÜRGENS, H.; SAUPE, D. **Fractals of the Classroom**. Part One: Introduction to Fractals and Chaos. New York: Springer-Verlag, 1992, 450p.
- PENTEADO, M. M. **Geomorfologia do Setor Centro-Ocidental da Depressão Periférica Paulista**. 1968. 160f. Tese (Doutorado em Geografia), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1968.
- PEREIRA, M. et al. **Cobertura e uso da terra através de sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1989. 115p.
- PFALTZ, J. L.; FRENCH, J. C. Representing spatial change in environmental databases. **In: Environmental Information Management and Analysis**: ecosystem to global scales. New York: Taylor & Francis, 1994. p. 127-140.
- REX, K. D.; MALANSON, G. P. – The fractal shape of riparian forest patches. **Landscape Ecology**, Amsterdam, v. 4 p. 249 – 258, 1990.
- RODRIGUES, R. **Análise de um remanescente da vegetação natural as margens do Rio Passa Cinco, Ipeúna- S.P.** 1991. f. 9-25. Tese (Doutorado em Ecologia), Instituto de Biociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.
- RODRIGUES R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. **Matas Ciliares**: conservação e recuperação. São Paulo: Edusp, 2000. 320 p.
- RODRIGUES R. R.; SHEPHERD, G. Fatores condicionantes da vegetação ciliar. In: RODRIGUES R. R.; LEITÃO FILHO, H. F. **Matas Ciliares**: conservação e recuperação. São Paulo: Edusp, 2000. p. 101–108.
- RUSS, J. C. **Fractal Surfaces**. New York: Plenum Press, 1994. 309 p.
- SHELHAS, J.; GREENBERG, R. **Forest Patches in Tropical Landscapes**. Washington D.C.: Islands Press, 1996. p. 151-167.
- SILVA, V. V. **Médio Vale do Paraíba do Sul**: fragmentação e vulnerabilidade dos remanescentes da Mata Atlântica. 2002. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2002.

STEWART, I. **Será que deus joga dados:** a nova matemática do caos. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1991. 336 p.

TABARELLI, M.; MANTOVANI, W.; PERES, C. A. Effects of habitat fragmentation on plant guild structure in the montane Atlantic forest of southeastern Brasil. **Biological Conservation**. New York, v. 91, p. 119–127, 1999.

TROPPEMAIR, H.; MACHADO, M. L. A. Variação da estrutura da mata galeria na bacia do Rio Corumbataí (SP) em relação à água do solo, do tipo de margem e do traçado do rio. **Biogeografia**, São Paulo, v. 8, p. 1-28, 1974.

TURNER, M. G.; Gardner, R. H.; O'NEILL, R. V. **Landscape ecology in theory and practice:** pattern on process. New York: Springer Verlag, 2001. 401p.

Recebido em setembro de 2004

Revisado em maio de 2005

Aceito em junho de 2005