

Espacialização de análise multicriterial em SIG: prioridades para recuperação de Áreas de Preservação Permanente²

Carlos Eduardo da Silva Francisco ¹

Ricardo Marques Coelho ²

Roseli Buzanelli Torres ²

Samuel Fernando Adami ²

¹ Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical-Instituto Agrônomico
Alameda Manaus, 485 – Esplanada do Carmo-13240-000-Jarinu-SP
carlos_francisco@itelefonica.com.br

² Instituto Agrônomico - IAC
Caixa Postal 28 - 13012-970 - Campinas - SP, Brasil
{rmcoelho, rbtorres, samuel}@iac.sp.gov.br

Abstract. This work aimed the spatial application of multicriteria analysis for ranking degraded permanent preservation areas of São Quirino creek, Campinas, SP, Brazil, for environmental recovery. The studied watershed is largely degraded and its land use lacks compliance with State environmental rules. Two multicriteria analysis (MCA) methods, Compromise Programming (PC) and Cooperative Game Theory (CGT), were spatialized using a rasterized geographical information system. Spatial application of both MCA methods were accomplished successfully. The two methods showed different results. PC selected a greater extension of areas with high recovery priority, whereas CGT selected larger areas with low and medium recovery priority. Land uses with higher priorities in both methods were bare soil and annual crop, especially those located in headwaters, followed by those bordering stream channels. Both MCA methods proved useful, but PC is more recommended for use in case environmental recovery requires a more urgent implementation.

Palavras-chave: programação por compromisso, planejamento ambiental, suporte à tomada de decisão, compromise programming, cooperative game theory, environmental planning, decision making support.

1. Introdução

A tomada de decisão em planejamento ambiental necessita de grande número de variáveis do meio físico, biológico, social e econômico, quantificáveis ou não, cujas combinações podem produzir diferentes alternativas de uso. Nesse contexto, ferramentas de análise que permitam reunir essas variáveis, atribuir pesos e valores às mesmas, dando prioridade às diferentes alternativas, facilitam a tomada de decisão. A análise multicriterial é um método de análise de alternativas para resolução de problema que utiliza vários critérios relacionados ao objeto de estudo, sendo possível identificar as alternativas prioritárias para o objetivo considerado. Distintos métodos de análise multicriterial representam diferentes formas de aproximação para a tomada de decisão. Segundo Zuffo (1998) e Fidalgo (2003), a seleção do método depende do problema particular considerado, das preferências do tomador de decisão e de muitos outros fatores.

Os métodos de análise multicriterial podem ainda ser trabalhados em ambiente SIG, facilitando e tornando mais factíveis os trabalhos dos tomadores de decisão em planejamento ambiental. Thinh e Hedel (2004) descrevem uma extensão da “programação de compromisso” (PC) que chamaram de “programação de compromisso” *fuzzy* (FCP). Para isso, combinaram a

² Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor em Gestão de Recursos Agroambientais, do curso de Pós-graduação em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agrônomico (IAC).

modelagem *fuzzy*, a “programação de compromisso” (PC) e o SIG, criando um ambiente *fuzzy* de “programação de compromisso” para avaliação ecológica de opções de uso da terra com um programa AML.

Apesar da espacialização da análise multicriterial com o uso de SIG ser usualmente realizada por alguns autores, como por exemplo, Valente (2005); Thinh e Hedel (2004), bem como alguns pacotes de SIG permitirem esta operação, conforme Sharifi e Retsios (2003), em função da especificidade dos métodos de análise multicriterial e da rigidez dos pacotes computacionais, muitas vezes o método de análise multicriterial oferecido não é o mais adequado à análise proposta.

A espacialização da análise multicriterial em SIG pode ser útil no planejamento ambiental de áreas degradadas e de outras áreas que necessitem maior atenção com enfoque ambiental, dentre as quais as Áreas de Preservação Permanente (APPs). As APPs, são definidas em Brasil (2001), como: “localizadas em cada posse ou propriedade, são bens de interesse nacional e espaços territoriais especialmente protegidos, cobertos ou não por vegetação, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”. As mesmas são protegidas pela Lei Federal 4771/65, alterada pela lei 7803/89 e medida provisória 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, artigo 2º, e Resolução CONAMA 302/02 e 303/02, que define as larguras e situação de APPs localizadas ao longo de cursos d’água; represas artificiais e lagos naturais; nascentes, topo de morro entre outras, segundo Brasil (1989) e Brasil (2002), respectivamente.

As APPs do ribeirão das Anhumas, que tem suas cabeceiras influenciadas por atividades antrópicas em áreas urbanas e rurais do município de Campinas, SP, encontram-se bastante degradadas e, em grande parte, com uso inadequado.

O presente trabalho, realizado no âmbito do Projeto Anhumas³, tem por objetivos a espacialização da análise multicriterial em sistema de informação geográfica e a elaboração de mapa de priorização de Áreas de Preservação Permanente para recuperação na bacia do córrego São Quirino (**Figura 1**).

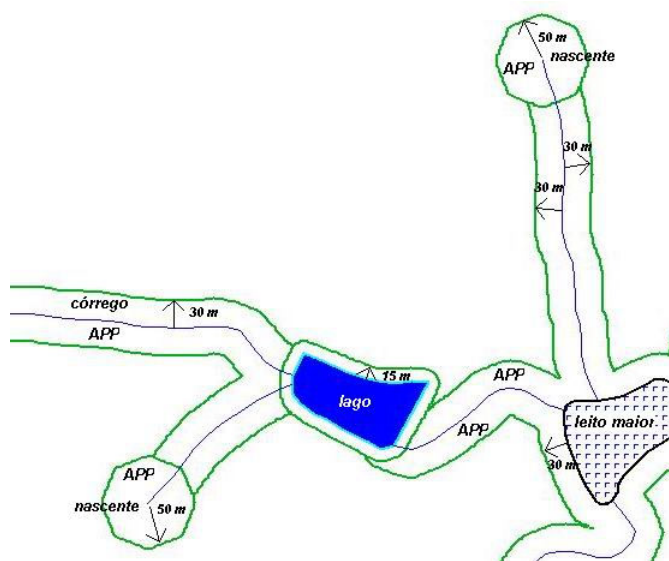


Figura 1: Situação das Áreas de Preservação Permanente na bacia do córrego São Quirino

³ Recuperação Ambiental, Participação e Poder Público: Uma Experiência em Campinas (processo Fapesp 01/02952-1).

2. Materiais e métodos

A bacia hidrográfica do córrego São Quirino, afluente do ribeirão das Anhumas, está delimitada pelas coordenadas 22°50'47" a 22°52'50" S e 46°59'38" a 47°01'54" W e corresponde a uma superfície de 14,82 km², totalmente inserida no município de Campinas, SP.

Como planos de informação (PI) iniciais, utilizou-se a base cartográfica planialtimétrica digital com precisão à escala 1:10.000 compilada por São Paulo (2005) e dados de malha viária, hidrografia, uso da terra, solos, vegetação nativa remanescente, etc., levantados ou adaptados pelo Projeto Anhumas conforme Torres et al. (2006), bem como mapas derivados destes primeiros, a exemplo do mapa de erodibilidade e do mapa de aptidão agrícola.

Para priorização das APPs para recuperação foram utilizados dois métodos da família "Programação Matemática Multiobjetivo" definida por Pardalos et al. (1995) como: o da Programação por Compromisso (PC) e o da Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT).

Método Programação de Compromisso - PC

Este método baseia-se no conceito do Teorema de Pitágoras (distância métrica), onde entre dois pontos as coordenadas são conhecidas. O método procura minimizar a distância de todos os pontos possíveis de ocorrer em relação a um determinado ponto selecionado pelo responsável de tomar a decisão (DM), caracterizado como "ponto ideal". O tomador de decisão, segundo Zuffo (1998), é o responsável por executar a decisão.

O método PC pode ser definido pela equação:

$$l_s(x) = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i^s \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right|^s \right)^{1/s} \quad (1)$$

em que:

α_i é o peso atribuído a cada critério i ;

$f_{i,w}$ é o pior valor obtido para o critério i ;

f_i^* é o melhor valor obtido para o critério i ;

$f_i(x)$ é o resultado da implementação da decisão x considerando o critério i ;

$l_s(x)$ é a distância entre a solução obtida com o cenário x e a solução ideal; e

S é uma proporcionalidade aplicada aos desvios, sendo $1 \leq S \leq \infty$. Neste trabalho foi escolhido o valor $S = 1$, de forma a manter todos os desvios de f_i^* proporcionais às suas magnitudes.

Método da Teoria dos Jogos Cooperativos -CGT

No método da Teoria dos Jogos Cooperativos (CGT), ao contrário do método PC, a solução ideal é aquela que maximiza a distância de um determinado ponto de nível mínimo, onde a medida de distância utilizada é a geométrica, conforme Gershon e Duckstein (1983).

A função da distância utilizada é dada por:

$$l_s(x) = \prod_{i=1}^n |f_i(x) - f_i^*|^{\alpha_i} \quad (2)$$

onde:

$f_i(x)$ é o resultado da implementação da decisão x considerando o critério i ;

f_i^* é o menor valor obtido para o critério i ;

α_i é o peso atribuído a cada critério i ;

$l_s(x)$ = distância entre a solução obtida com o cenário x e a solução ideal.

Pesos e valores dos critérios

Ambos os métodos fazem uma ponderação de cada critério, que diz respeito à importância deste para o objetivo desejado. Este fator de ponderação variou de zero a três, zero significando que a variável é irrelevante para o objetivo considerado. Para estimativa dos pesos dos critérios foi enviada uma mensagem eletrônica para profissionais de diferentes áreas de atuação (licenciamento/fiscalização ambiental, geoprocessamento, ecologia da paisagem, conservação de solo e recuperação de áreas degradadas), com um resumo do projeto e um questionário a ser preenchido, onde os pesos deveriam ser atribuídos na escala de 0 a 3.

Além desta ponderação, cada critério recebeu uma valoração que expressa a faixa de valor que o critério assume em cada situação estudada. Assim, os critérios receberam valores (em números inteiros) de 1 a 5, sendo 1 os valores mínimos e 5 os valores máximos, possíveis de serem atingidos pela variável considerada com a implementação da decisão.

Planos de informação e espacialização dos critérios

Em substituição à tradicional matriz *pay-off* utilizada em análise multicriterial, no caso de sua espacialização essa matriz foi substituída pela valoração dos critérios por célula raster nos arquivos do sistema de informações geográficas (SIG). Os mapas assim obtidos, chamados mapas de critérios, foram reclassificados de 1 a 2 em valores contínuos ou discretos, de acordo com a natureza dos dados. Dessa forma elaboraram-se os mapas de critérios proximidade de vegetação nativa, proximidade de núcleos urbanos, uso da terra, vulnerabilidade à erosão, proximidade da malha viária, capacidade de sustentação da vegetação nativa, APP em função de ordem de canais de drenagem e categoria de APP.

Os métodos de análise multicriterial PC e CGT foram adaptados ao SIG Ilwis Academic 3.3-ITC (2001). Os mapas de critérios no formato *raster*, os pesos (obtido dos especialistas) e valores (resultado da implementação da decisão) foram aplicados às fórmulas (1) e (2) e espacializados no SIG a partir da linha de comando de operações do *software*.

Após o processamento dos mapas de critérios no SIG, o mapa de prioridade de recuperação de APP foi normalizado numa função contínua de 0 a 1 para permitir a comparação entre os métodos. A interpolação desses mapas de critérios (**Figura 2**) resultou no mapa de prioridades de APP para recuperação, onde os polígonos resultantes foram classificados em cinco classes de prioridade para recuperação: muito alta, alta, média, baixa e muito baixa (**Figuras 4a e 4b**).

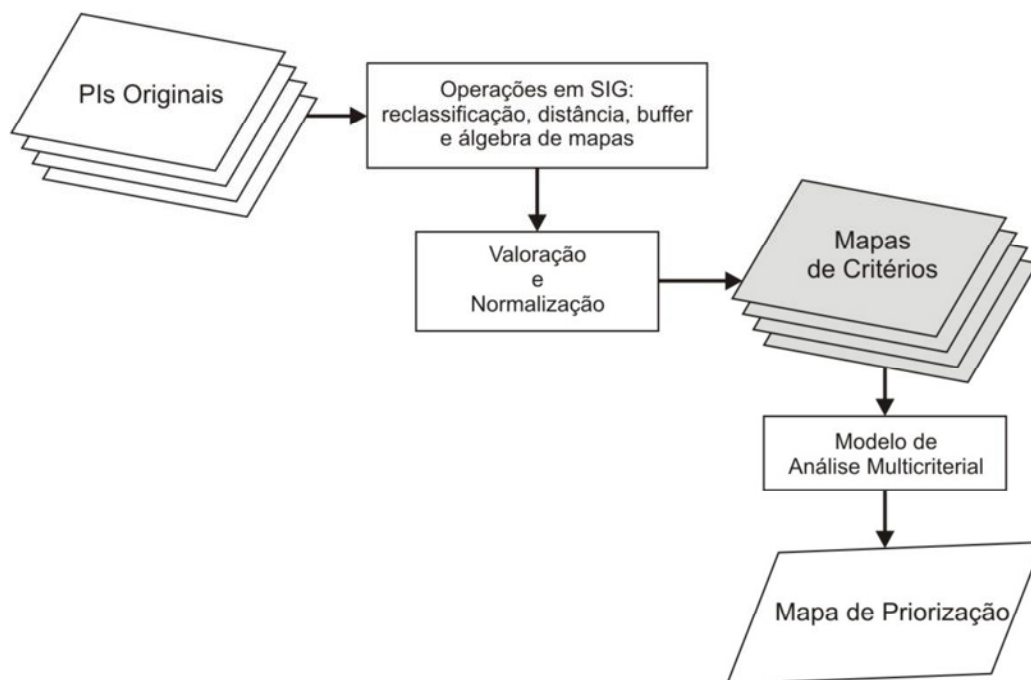


Figura 2: procedimentos na espacialização da análise multicriterial.

3. Resultados e discussão

Resultado dos questionários (pesos)

Dos 31 questionários enviados aos analistas, 13 (42%) responderam com suas sugestões de pesos.

Em relação aos pesos resultantes do questionário (**Tabela 1**) observa-se que o critério “proximidade de vegetação nativa” foi o que obteve a maior frequência de notas máximas, sendo considerado unânime entre os especialistas, sua importância para priorização de recuperação de APPs.

Tabela 1 – Pesos finais resultantes das notas dos questionários para cada critério para priorização de recuperação de APPs, com sua média expurgada

Critérios	ESPECIALISTAS													Média expurgada	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Pesos	
														a ³	b ⁴
1. Proximidade de vegetação. nativa	3	3	2	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3,00	0,168
2. Proximidade de núcleos urbanos	3	2	1	2	3	0	1	0	1	1	2	2	2	1,56	0,087
3. Uso da terra	2	3	2	3	3	3	1	1	2	1	1	3	3	2,67	0,150
4. Vulnerabilidade a erosão	2	3	3	1	3	2	3	3	2	3	3	3	3	2,75	0,154
5. Proximidade de malha viária	1	2	1	3	2	0	1	0	1	2	2	1	2	1,50	0,084
6. Sustentação da vegetação nativa	3	3	2	2	2	3	2	1	3	3	1	0	3	2,60	0,146
7. Ordem de canais	1	2	1	1	1	1	2	2	1	3	2	3	3	1,40	0,078
8. Categoria de APP	2	3	2	0	1	3	3	3	3	1	0	3	2	2,36	0,132

³ média expurgada normal; ⁴ média expurgada normalizada.

Por outro lado, o critério que sofreu maior divergência de opiniões entre os especialistas foi “categoria de APP” que recebeu dois zeros e o maior número de notas diferentes.

A comparação entre os métodos PC e CGT mostrou diferença significativa: o método PC tende a classificar maior área como de prioridade média e alta, enquanto que o método CGT tende a aumentar as áreas classificadas como de prioridade média (**Figura 3**). O método PC (**Figuras 4a**) tende geralmente a priorizar para recuperação de APP, em maior proporção, na classe “muito alta”, os usos mais intensivos da terra, como solo exposto e cultivo com culturas anuais, principalmente quando localizados sob categoria de APP de nascente. Quando estes usos mais intensivos do solo estão localizados em categoria de APP de curso d’água, o método PC tende a atribuir em maior proporção a classe “alta”. Já as APPs cobertas com usos do solo com menor prioridade para recuperação, como regeneração natural e reflorestamento têm prioridade média para recuperação. No método CGT (**Figura 4b**) apesar de se verificar uma melhor distribuição das classes de prioridades alta, média e baixa, com 16 %, 64 % e 17 %, respectivamente (**Tabela 2**), verifica-se uma diminuição de prioridades em se tratando dos usos solo exposto e culturas anuais, concentrado-se as APPs cobertas com estes usos nas classes de alta prioridade, quando localizados em categoria de APP de nascente, e média prioridade quando localizados em categoria de APP de curso d’água. Os usos menos prioritários, como regeneração natural e reflorestamento, são posicionados nas classes de baixa prioridade.

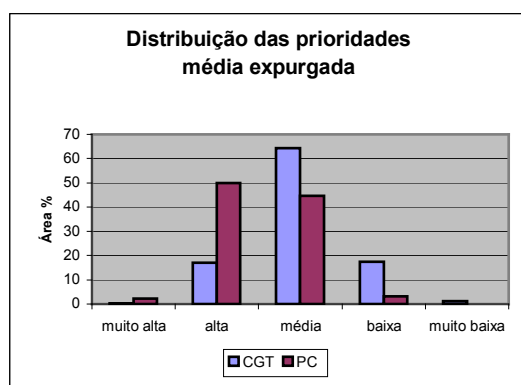


Figura 3 – Distribuição das freqüências de áreas (%) prioritárias para recuperação de APPs, nas medidas de tendência central média expurgada nos métodos CGT e PC.

Tabela 2 – Áreas prioritárias para recuperação de APP, segundo os métodos PC e CGT, pesos tratados pela média expurgada.

Prioridades	PC		CGT	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Muito alta	6,67	2,13	0,76	0,24
Alta	156,30	49,98	52,53	16,80
Média	139,79	44,70	201,69	64,49
Baixa	9,78	3,13	54,50	17,43
Muito baixa	0,20	0,06	3,26	1,04
total	312,74	100,00	312,74	100,00

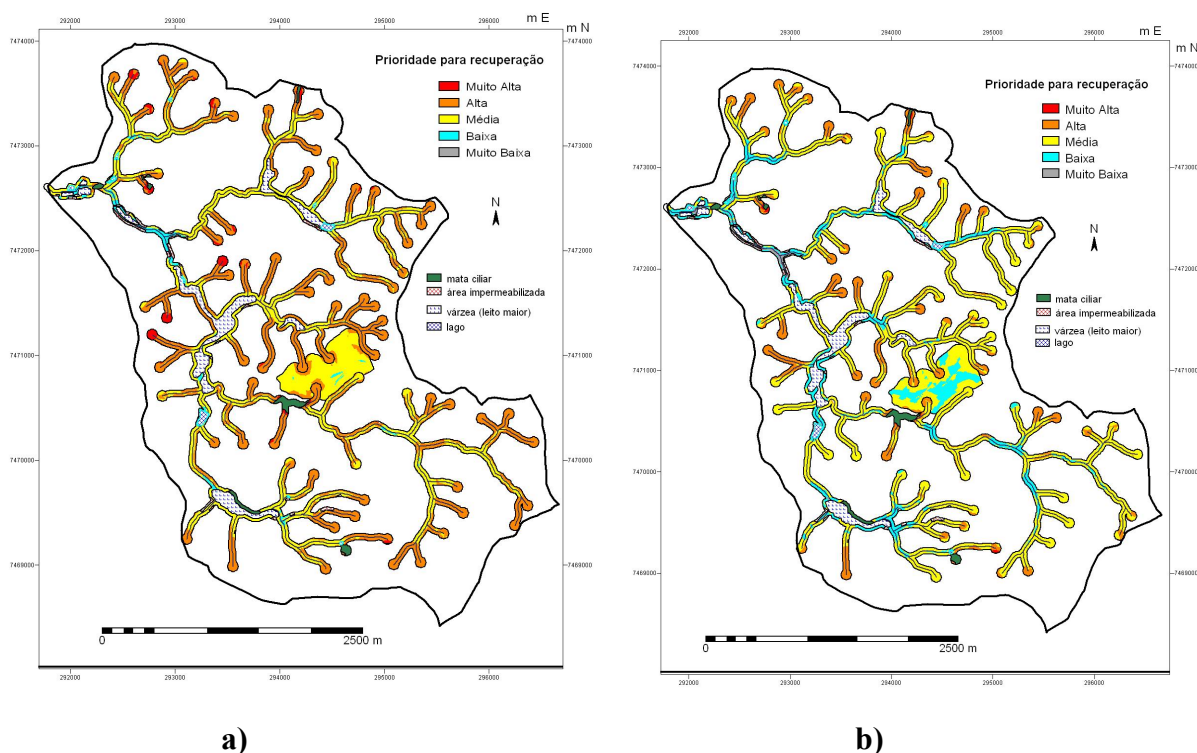


Figura 4 - Mapa de priorização para recuperação de APP conforme média expurgada nos métodos: a) Programação por Compromisso (PC) e b) Jogos Cooperativos (CGT).

4. Considerações finais

A metodologia usada para inserção dos métodos de análise multicriterial em SIG mostrou a viabilidade de sua espacialização.

Aspectos importantes para priorização de APP para recuperação foram evitar critérios com sobreposição, ou seja, critérios que no todo ou em parte possam representar o mesmo indicador.

No estabelecimento de APPs prioritárias para recuperação, a proporção de áreas prioritárias diferiu significativamente quando usada análise por PC ou por CGT. No método PC resultou em maior área com alta e média prioridade para recuperação e o CGT tendeu a aumentar as áreas de APP com baixa e média prioridade em relação ao PC.

Os resultados não permitem afirmar que um método é superior ao outro, mas que um ou outro deve ser usado, dependendo do objetivo desejado. Para o caso estudado, boa disponibilidade de recursos para implementar uma recuperação mais rápida e/ou necessidade de recuperação emergencial aponta para o uso do PC na análise, enquanto uma recuperação efetuada de forma gradual, quando não há problemas emergenciais de ordem ambiental na bacia ou quando há disponibilização mais lenta de recursos pode indicar o método CGT como mais adequado. Todavia, devido à variabilidade dos resultados quando utilizados os diferentes métodos, sugere-se que pelo menos dois métodos de análise multicriterial sejam aplicados quando do seu uso em planejamento ambiental.

5. Referências

- Brasil. **Lei Federal 7803** de 18 de julho de 1989. Altera os dispositivos da Lei 4771/65. Brasília, DF: Congresso Nacional, 1989.
- Brasil. **Lei Federal nº 4771/65**, de 15 de setembro de 1965, alterada pela Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2001.
- Brasil. **Resolução do CONAMA 302**, de 20 de março de 2002, Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2002.
- Brasil. **Resolução do CONAMA 303**, de 20 de março de 2002, Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Brasília, DF: Congresso Nacional, 2002.
- Fidalgo, E.C.C. **Critérios para a análise de métodos e indicadores ambientais usados na etapa de diagnóstico de diagnóstico ambiental de planejamentos ambientais.**- 2003. 276 p. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, 2003.
- Gershon, M.; Duckstein, L. Multiobjective approaches to river basin planning. **Journal of Water Planning and Management**, v. 109, n.1, p.13-28, 1983.
- ITC (2001) Ilwis 3.3: User's Guide. Enschede, ITC. 530p.
- Pardalos, P.M.; Siskos, Y; Zopounidis, C. (Eds.) **Advances in multicriteria analysis.** (Non-convex optimization and its application. v.5). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995. 249 p.
- São Paulo. Secretaria de Economia e Planejamento. **Plano cartográfico do estado de São Paulo: Cartas topográficas, escala 1:10.000.** São Paulo: Instituto Geográfico e Cartográfico, 2005.
- Sharifi, M.A.; Retsios, V. Site selection for waste disposal through spatial multiple criteria decision analysis. In: III International Conference for Decision Support for Telecommunications and Information Society, September 4-6, 2003, Warsaw, Poland. 2003. 15 p. Disponível em:<http://www.nit.eu/konf/dstis/2003/program.html>. Acesso em: 4 de novembro de 2006.
- Thinh, N.X; Hedel, R.; A fuzzy compromise programming environment for the ecological evaluation of land use options – **EnviroInfo 2004** – Collectif Sharewood. Disponível em: <http://www.enviroinfo2004.org/cdron/datas/thinh%20paper20for%20enviroinfo%202004.htm>. Acesso em: 15 de março 2006.
- Torres, R.B., Costa, M.C., Nogueira, F.A.; & Peres Filho, A. (Org.). **Recuperação ambiental, participação e poder público: uma experiência em Campinas, SP.** Relatório final. Projeto de Pesquisa em Políticas Públicas. Processo Fapesp no. 01/02952-1. 2006.
- Valente, R. de O. A., **Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG.** 2005. 121 p.. Tese (Doutorado) – ESALQ – USP – Piracicaba, 2005.
- Zuffo, A.C.; Reis, L.F.R.; Santos, R.F.; Chaudhry, F.H. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento dos recursos hídricos. **Rev. Bras. Rec. Hídricos**, v.7, n.1, p. 81-102, 2002.
- Zuffo, A.C.; **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos.**1998. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos. USP, São Carlos, 1998.