Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"
Centro de Energia Nuclear na Agricultura

Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios

Sérgio Luis Antonello

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ecologia Aplicada

Piracicaba
2008

Sérgio Luis Antonello
Analista de Sistemas

Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios

Orientador:
Prof. Dr. **CARLOS ALBERTO VETTORAZZI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ecologia Aplicada

Piracicaba
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Antonello, Sérgio Luis
Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios / Sérgio Luis Antonello. - - Piracicaba, 2008.
130 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1 Bacia hidrográfica 2. Planejamento ambiental 3. Rio Corumbataí 4. Sistema de informação geográfica I. Título

CDD 551.483
A634u

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial a minha esposa Raquel e ao meu filho Vinícius pelo amor, respeito e compreensão demonstrados neste período. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por iluminar meu caminho e pela força, sabedoria e coragem que me foram concedidas para enfrentar e vencer mais uma etapa da minha vida.

Aos meus pais, Augusta e Sérgio, pelos ensinamentos de luta e perseverança e por acreditarem em mim; a meus irmãos por estarem sempre comigo.

Ao Professor Vettorazzi, meu orientador, pela extrema confiança em mim depositada, pela compreensão e paciência com a minha situação particular.

Aos Professores Norberto Morales e Sérgio dos Anjos, supervisores do CEAPLA, pelo auxílio na condução deste trabalho.

Aos Professores Gilberto Garcia e Rubens Angulo Filho, pelas colaborações a este trabalho e pelo valor creditado em mim.

Aos demais professores que colaboraram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica no Doutorado.

Aos amigos do CEAPLA, em especial ao Cláudio pela colaboração e Juliene, grande incentivadora nas horas mais difíceis.

Aos funcionários da Pós-Graduação, em especial Regina, da Biblioteca, em especial a Silvia e do Departamento de Engenharia Rural pelo ótimo atendimento.

Aos demais familiares e amigos.

SUMÁRIO

RESUMO 9

ABSTRACT 10

LISTA DE FIGURAS 11

LISTA DE QUADROS 14

LISTA DE TABELAS 15

1 INTRODUÇÃO 16

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1 O processo decisório 18

2.1.1 Sistemas de apoio à decisão 19

2.1.2 Decisão 20

2.1.3 Critério 20

2.1.3.1 Fator 21

2.1.3.2 Restrição 21

2.1.4 Regra de decisão 21

2.1.5 Objetivo 22

2.1.6 Avaliação 22

2.1.7 Risco de decisão 22

2.1.8 Incerteza 23

2.2 O processo de planejamento e gestão 23

2.2.1 Planejamento e gestão em bacias hidrográficas 24

2.2.2 Ferramentas de planejamento e gestão de bacias hidrográficas 26

2.3 Avaliação multicritérios 31

2.3.1 Os atores 34

2.3.2 Fases do processo de apoio à decisão 34

2.3.2.1 Fase de estruturação 35

2.3.2.2 Fase de avaliação 35

2.3.3 Matriz de decisão 37

2.4 Avaliação multicritérios na área ambiental 38

2.4.1 Método AHP 38

2.4.2 Padronização ou Normalização de Atributos 40

2.4.3 O Método CLP 40

2.4.4 O Método MPO 43

2.4.5 Análise de sensibilidade 44

2.5 Ciência da informação 45

2.5.1 Dados e Informações 47

2.5.2 Sistema de Informação 48

2.5.3 Projeto de sistemas de informação 50

2.5.3.1 Levantamento de requisitos 51

2.5.3.2 Análise 51

2.5.3.3 Projeto 52

2.5.3.4 Implementação 52

2.5.3.5 Testes 52

2.5.3.6 Implantação 53

2.5.4 Modelagem de sistemas de informação 53

2.5.4.1 Modelo de casos de uso 53

2.5.4.2 Diagrama de fluxo de dados 54

3 MATERIAL E MÉTODO 56

3.1 Linguagem de programação C# 56

3.2 FGest 57

3.2.1 Padronização ou normalização de atributos 60

3.2.2 Peso de compensação 62

3.2.2.1 Cálculo do peso de compensação 66

3.2.2.2 Cálculo da taxa de consistência 67

3.2.3 Avaliação CLP 69

3.2.4 Ranqueamento dos fatores 70

3.2.5 Avaliação MPO 73

3.3 Validação do FGest 75

3.3.1 Área de estudo 76

3.3.1.1 Geomorfologia 79

3.3.1.2 Geologia 80

3.3.1.3 Solos 82

3.3.1.4 Uso e cobertura do solo 83

3.3.2 Estabelecimento dos critérios 85

3.3.2.1 Adequação do uso da terra 86

3.3.2.2 Erodibilidade do solo 87

3.3.2.3 Erosividade da chuva 87

3.3.2.4 Proximidade à malha viária 88

3.3.2.5 Proximidade à rede hidrográfica 89

3.3.2.6 Restrições 90

3.3.3 Padronização 91

3.3.4 Fluxo do modelo de avaliação 91

3.3.5 Exatidão dos mapas de áreas prioritárias 93

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 96

4.1 Desenvolvimento e comunicação do FGest 96

4.2 Validação do FGest 105

4.2.1 Ponderação dos atributos 106

4.2.2 Mapa de áreas prioritárias segundo método CLP 106

4.2.3 Ranqueamento 110

4.2.4 Mapa de áreas prioritárias segundo método MPO 110

4.2.5 Reclassificação dos mapas de áreas prioritárias 111

4.2.6 Considerações finais 120

5 CONCLUSÕES 122

REFERÊNCIAS 123

RESUMO

Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de avaliação multicritérios

O crescente desenvolvimento mundial, principalmente dos países emergentes, tem exercido enorme pressão sobre o meio ambiente. Diversas regiões começam a indicar perda da sustentabilidade. O uso responsável dos recursos naturais envolve uma equação que considera o desenvolvimento sustentável. Este campo do conhecimento é muito amplo e envolve um grande número de variáveis, que requerem o uso de conhecimento, *hardware/software* e de metodologia específica. SIGs - Sistemas de Informações Geográficas e análise de múltiplos critérios são ferramentas úteis em processos de tomada de decisão envolvendo dados ambientais espacializados. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de informação analítico, denominado FGest, para ser usado no planejamento ambiental de bacias hidrográficas, durante a fase de avaliação, em processos de tomada de decisão. O ambiente e linguagem de programação para o desenvolvimento do FGest e das interfaces de comunicação com os Sistemas de Informações Geográficas foi o Microsoft C#. Para o processo de comunicação entre os softwares envolvidos foi adotado o uso de mapas matriciais no formato ASCII. Dentre os algoritmos do FGest destaca-se o de otimização do processo de ranqueamento de critérios segundo a influência dos mesmos no processo decisório. Fase importante do desenvolvimento de um software é a validação do mesmo através da análise e comparação de seus resultados. Para a validação do FGest, utilizando avaliação multicritérios, foram gerados mapas de áreas prioritárias à restauração florestal na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos. Os fatores empregados, na forma de mapas matriciais, foram a adequação do uso da terra, a erodibilidade do solo, a erosividade da chuva e as proximidades à malha viária e à rede hidrográfica, todos padronizados em uma escala única e contínua de 256 valores. Os pesos dos fatores foram determinados com auxílio de uma matriz de comparação pareada. Com ótimos tempos de resposta, foram gerados três mapas de áreas prioritárias, com valores no espaço de 256 níveis e depois reclassificados de maneira a apresentar cinco graus de prioridade (muito alta, alta, média, baixa e muito baixa), correspondentes às aplicações dos métodos da Combinação Linear Ponderada e da Média Ponderada Ordenada para os cenários riscos médio/baixo e médio/alto. A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que o FGest pode ser utilizado como suporte ao planejamento e gestão de bacias hidrográficas, já que o mesmo desempenhou com sucesso o papel de ferramenta computacional para avaliação multicritérios e que sua interface de comunicação com os Sistemas de Informações Geográficas ArcGIS e Spring funcionou adequadamente para importação de mapas fatores e restrições e para exportação de mapas gerados nas avaliações multicritérios.

Palavras-chave: Planejamento e gestão; Combinação Linear Ponderada; Média Ponderada Ordenada; Bacia do Rio Corumbataí; Sistemas de Informações Geográficas

ABSTRACT

A system for planning and management of watersheds with the use of multicriteria evaluation

The increasing worldwide development, mainly due to the developing countries, makes a significant pressure on the environment. Several regions are now showing a loss of sustainability. The responsible use of the natural resources involves an equation which considers the sustainable development. This field of knowledge is very wide and involves a great number of variables, which require expertise, hardware/software and specific methodology. GIS – Geographic Information System and multicriteria evaluation are useful tools in the decision support processes, involving spatial environmental data. The objective of this study was the development of an analytical information system named FGest, to be used on the environmental planning of watersheds, during the phase of evaluation, in the decision-making process. The Microsoft C# was used as the environment and the programming language for the development of the FGest and of the communication interfaces with the Geographic Information Systems. For the process of communication between FGest and Geographic Information Systems, the use of raster maps in ASCII format was implemented. Amongst the algorithms of the FGest is the algorithm for ranking of criteria, in accordance with the influence of the same ones in the decision process. An important phase of the software development is its test and validation through the analysis and comparison of its results. For the validation of the FGest, using multicriteria evaluation, maps of priority areas for forest restoration, in the Corumbataí river basin, State of São Paulo, aiming at the conservation of water resources were generated, . The variables used, in the format of raster maps, were the land-use adequacy, soil erodibility, erosivity, proximity to roads and proximity to the drainage network, where each factor was standardized in a 256-value continuous scale. The factors weights were determined with help of a pairwise comparison matrix. Three maps of priority areas were generated, with levels of priority represented on a continuous way, from 0 to 255, and later reclassified to show five levels of priority (very high, high, medium, low and very low). Those maps are the result of the application of the methods of the Weighted Linear Combination and the Ordered Weighted Average for the scenarios of medium/low and medium/high risks. From the obtained results it was possible to conclude that the FGest can be used as a support for planning and management of river basins, since the system successfully carried out the role of computational tool for multicriteria evaluation and its communication interface with the Geographic Information Systems ArcGIS and Spring had an adequate performance to import factors and restrictions maps and to export maps generated in the multicriteria evaluations.

Keywords: Planning and management; Weighted Linear Combination; Ordered Weighted Averaging; Corumbataí River Basin; Geographic Information Systems

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pirâmide de decisões 18

Figura 2 - Representação hierárquica do método AHP 39

Figura 3 - Espaço de estratégia para a tomada de decisão 44

Figura 4 - Modelo de utilização do FGest 50

Figura 5 - Abordagem de desenvolvimento de sistemas em cascata 50

Figura 6 - Modelo de integração entre SIG e o FGest 58

Figura 7 - Escala contínua de nove pontos usada na comparação pareada entre fatores, na Avaliação Multicritérios 63

Figura 8 - Matriz de comparação pareada no FGest 64

Figura 9 - Matriz tridimensional que armazena critérios no formato *raster*, para uso processo de avaliação multicritérios 65

Figura 10 - Representação do processo de avaliação pelo método da Combinação Linear Ponderada (CLP) 69

Figura 11 - Representação de valores ponderados na posição x,y dos mapas fatores, para uso no processo de ranqueamento 71

Figura 12 - Tela de avaliação pelo método CLP, onde é possível observar o ranqueamento proposto, conforme influência de cada fator no processo de avaliação 72

Figura 13 - Localização da bacia hidrográfica do rio Corumbataí 77

Figura 14 - Rede hidrográfica da bacia do rio Corumbataí 78

Figura 15 - Modelo digital do terreno para a bacia do Rio Corumbataí 80

Figura 16 - Mapa geológico da bacia do Rio Corumbataí..... 81

Figura 17 - Classes de solos presentes na bacia do Rio Corumbataí (a). Ordens de solo presentes da bacia do Rio Corumbataí, segundo o Novo Sistema de Classificação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 1999) (b). 84

Figura 18 - Mapa de uso e cobertura das terras da bacia do Rio Corumbataí 85

Figura 19 - Mapa de adequação ao uso das terras da bacia do Rio Corumbataí... 86

Figura 20 - Mapa de erodibilidade da bacia do Rio Corumbataí..... 87

Figura 21 - Mapa de erosividade da chuva na bacia do Rio Corumbataí 88

Figura 22 - Mapa de proximidade à malha viária da bacia do Rio Corumbataí 89

Figura 23 - Mapa de proximidade à rede hidrográfica da bacia do Rio Corumbataí..... 90

Figura 24 - Mapa de áreas de restrição para análise multicritérios da bacia do Rio Corumbataí 91

Figura 25 - Fluxo do modelo de avaliação multicritérios utilizado na geração de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos 92

Figura 26 - Diagrama de casos de uso do FGest 100

Figura 27 - Diagrama de fluxo de dados do FGest 103

Figura 28 - Tela de avaliação multicritérios pelo método CLP..... 107

Figura 29 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (escala contínua de prioridades) 109

Figura 30 - Resultado do ranqueamento. Ordem inversa de influência dos fatores..... 110

Figura 31 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (escala contínua de prioridades) 112

Figura 32 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (escala contínua de prioridades) 113

Figura 33 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (cinco níveis de prioridade) 114

Figura 34 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (cinco níveis de prioridade) 117

Figura 35 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (cinco níveis de prioridade) 119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação pareada para o julgamento dos Atributos A e B..... 39

Quadro 2 - Exemplo de uma matriz de comparação pareada 63

Quadro 3 - Valores acumulados, em vetores de ranqueamento, de acordo com classificações individuais em posições x,y dos mapas de fatores..... 71

Quadro 4 - Cabeçalho de arquivo do padrão FGest, correspondente a configuração de mapa *raster* 98

Quadro 5 - Corpo de arquivo do padrão FGest, correspondente a parte de mapa *raster* 98

Quadro 6 - Pesos de compensação obtidos através da matriz de comparação pareada 106

Quadro 7 - Pesos de ordenação para dos fatores no método Média Ponderada Ordenada..... 111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Corumbataí .. 83

Tabela 2 - Uso e cobertura do solo da bacia do Rio Corumbataí em 2003 84

Tabela 3 - Exemplo de matriz de erro ou confusão, com destaque para a diagonal principal e células marginais 94

Tabela 4 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Combinação Linear Ponderada 115

Tabela 5 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (cinco níveis de prioridade) 116

Tabela 6 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo 118

Tabela 7 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (cinco níveis de prioridade) 118

Tabela 8 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto 120

Tabela 9 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (cinco níveis de prioridade) 120

1 INTRODUÇÃO

O rápido crescimento da população mundial e o surgimento de novos mercados consumidores geraram uma demanda sem precedentes, tanto para as *commodities* como para produtos manufaturados, a que o desenvolvimento tecnológico pretende satisfazer impondo ao meio ambiente uma pressão que está provocando a perda acelerada de sua capacidade em sustentar a vida. O tema toma ares globais e discussões ocorrem entre os comandantes dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, que não assumem a postura de evitar a degradação acelerada do meio ambiente e a crescente redução dos recursos naturais, impactos causados pelas gerações atuais e que gerarão reflexos negativos nas gerações futuras.

Neste contexto, os gestores têm a difícil tarefa de utilizar com eficiência os recursos naturais. Acontece que as áreas exploradas nem sempre são utilizadas de maneira sustentável, já que em muitos casos, variáveis que compõem a equação da sustentabilidade são desconsideradas, o que nos remete a grandes incertezas no processo de exploração dos recursos naturais.

Embora tomar decisões seja um processo antigo, cada vez mais administradores públicos são obrigados a decidir sobre assuntos complexos, em curtos espaços de tempo, o que muitas vezes pode levar à adoção de soluções equivocadas. Acrescente a isso o fato de o meio ambiente ser fortemente suscetível à intervenção humana, e têm-se ingredientes para processos de tomada de decisão cercados de incertezas e conseqüentes riscos. Decidir sempre envolve algum grau de complexidade, nem sempre restrita entre possíveis alternativas de ação, mas também entre pontos de vista ou formas de avaliar essas ações, e que muitas vezes se faz necessário considerar uma multiplicidade de fatores direta ou indiretamente relacionados com a decisão a tomar.

A utilização da Avaliação Multicritérios associadas a Sistemas de Informações Geográficas é apontada como ferramenta de apoio em processos decisórios que envolvem questões ambientais. Em uma abordagem sistêmica é proposto, neste trabalho, o desenvolvimento de um sistema de informação e da interface do mesmo com SIGs, como sendo parte integrante de um Sistema de Gestão de Bacias Hidrográficas. A contribuição do produto deste trabalho deverá ser, principalmente,

numa abordagem de pró-atividade para solução de problemas, durante a fase de Avaliação, nos processos de tomada de decisão utilizando Análise Multicritérios em bases de dados georreferenciadas dos *softwares* de SIG ArcGIS[1] e do Spring[2].

Este trabalho tem como objetivo geral propiciar aos gestores de bacias hidrográficas a aplicação de Metodologia Multicritérios de Apoio à Decisão na execução de processos decisórios, sem a necessidade de compra de módulos específicos para tal finalidade. Ainda são objetivos específicos:

- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional, o FGest, para possibilitar o uso da Análise Multicritérios em dados espaciais, para planejamento e gestão em bacias hidrográficas;
- Desenvolvimento de uma interface de comunicação do FGest com o ArcGIS®, e Spring.
- Validar o FGest através do emprego da Avaliação Multicritérios na geração de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal, na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos.

O trabalho está organizado em três partes. A primeira parte refere-se à revisão teórica de conceitos e ferramentas relacionados às metodologias multicritérios de apoio à decisão, a revisão teórica sobre conceitos de desenvolvimento de *softwares*, e ao desenvolvimento do FGest e da Interface com o ArcGIS e o Spring. A Segunda parte refere-se à aplicação do FGest, na bacia hidrográfica do rio Corumbataí, segundo parâmetros estabelecidos em Vettorazzi (2006), prática esta que permitirá validar o *software* desenvolvido através dos resultados gerados. A terceira e última parte, trata das conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

---

[1] Geographic Information System. ESRI GIS and Mapping Software
[2] Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciaia

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo decisório

Decidir pode ser entendido como a escolha entre alternativas na busca de solução para um problema. A teoria da decisão faz referência sobre ter relação com a lógica com que se chega a uma escolha dentre várias alternativas. Então, pode-se afirmar que o ato de decidir corresponde a deliberar, ou seja, dar preferência a uma alternativa após compreensão sobre determinado problema. Eastman (2003) afirma que as alternativas variam de problema para problema, podendo ser ações alternativas, hipóteses alternativas sobre um fenômeno, objetos alternativos de um conjunto deles e assim por diante.

Para Keeney (1992) apud Anunciação (2003) o processo de apoio à decisão utiliza-se de uma abordagem interativa, construtivista e de aprendizagem para desenvolver um modelo de decisão que deve evoluir durante todo o processo.

Pode-se afirmar que uma decisão é tomada quando é feita a escolha entre fazer ou não fazer algum evento, ou ainda, de que maneira ou forma este evento será feito.

Schoemaker e Russo (1993) identificam quatro métodos segundo os quais indivíduos tomam decisões: intuitivo, axiomático, por alternativas e por valores. A Figura 1 mostra a freqüência e o grau de importância de decisões tomadas.

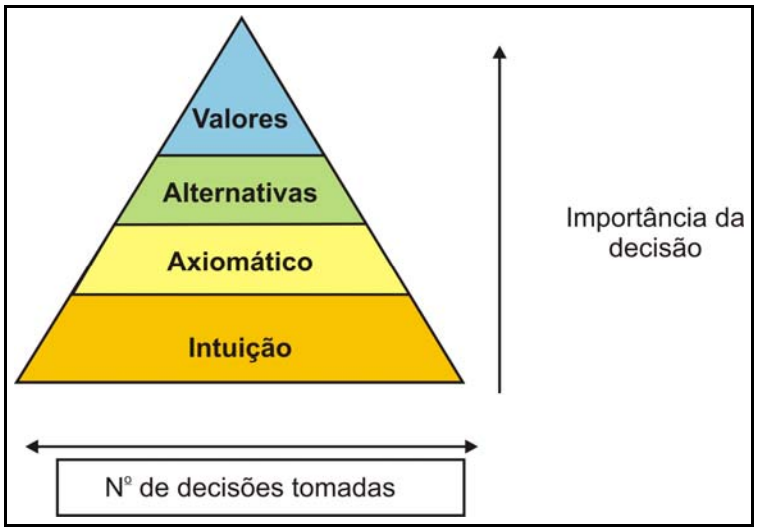


Figura 1 - Pirâmide de decisões. Fonte: Adaptado de Schoemaker e Russo (1993)

Segundo os autores, a forma intuitiva tem a vantagem de ser fácil e rápida. Aplica-se, na maioria das vezes, às decisões triviais do cotidiano diário, que são de pouca relevância e que não implicam em conseqüências graves. Se aplicada em problemas mais complexos ela pode acarretar incoerências e distorções.

Já a decisão axiomática, ou seja, decisão baseada em regras, apresenta-se de forma um pouco mais estruturada que a anterior, mas fica restrita ao cumprimento das regras estabelecidas, o que dificulta seu uso em problemas com maior complexidade.

No caso de decisões por alternativas, o processo é mais estruturado que os das formas anteriores, sendo necessário avaliar e dar pesos às alternativas existentes. Aqui encontram-se os modelos de pesquisa operacional clássica. Esta forma é aplicada a um menor número de decisões de maior complexidade.

Por último, a decisão por valores é a que se apresenta melhor estruturada e com maior dificuldade de uso, em relação a todas as anteriores. Porém apresenta resultados mais consistentes e personalizados, pois, nos modelos aqui aplicados são considerados os valores daqueles que decidem, tendo, assim, decisões diferentes segundo cada decisor. Ocorrem em um menor número de decisões que possuam muita relevância.

Um modelo para tomada de decisão, segundo Simom (1960) é dividido em três fases, que são: a) o reconhecimento, que consiste na identificação do problema ou de uma oportunidade de mudanças; b) desenho, que consiste na verificação e estruturação no processo de tomada de decisões alternativas; c) escolha, que está relacionada com a avaliação e com o processo de escolha de uma melhor alternativa.

2.1.1 Sistemas de apoio à decisão - SAD

Na década de 60 surgiram as primeiras ferramentas computacionais que, de alguma forma, passaram a dar algum suporte às decisões a serem tomadas. Desde então, é possível observar evolução progressiva neste tipo de aplicação, influenciada pela evolução tecnológica de hardware e *software*, pelas necessidades governamentais e pela competitividade comercial na iniciativa privada.

Todo processo de tomada de decisão necessariamente passa por um amplo percurso metodológico até a extração de informações a partir de dados disponíveis,

bem como a possibilidade de mensurá-los para a obtenção de respostas a um determinado problema (MORENO, 2007).

Malczewski (1999) aponta que um SADE - Sistema de Apoio à Decisão Espacial tem objetivo de dar apoio, ao tomador de decisão, em problemas que contenham componentes no âmbito de distribuição espacial. Afirma, ainda, que uma característica importante de um sistema deste tipo, é a possibilidade de modelar a incerteza dos dados com base em regras de decisão por análise de sensibilidade.

2.1.2 Decisão

Como já visto, decisão é uma escolha entre alternativas. As alternativas podem representar diferentes cursos de ação, hipóteses diferentes sobre a natureza de uma característica, classificações diferentes e assim por diante. Este conjunto de alternativas é chamado de quadro de decisão. Assim, por exemplo, o quadro de decisão para um problema do zoneamento pode ser industrial, residencial ou comercial. O quadro de decisão, entretanto, deve ser distinguido dos indivíduos (cada pixel do mapa) a que a decisão está sendo aplicada. Estes indivíduos são chamados conjunto de decisão. Por exemplo, ainda no caso do zoneamento, o conjunto de todas as posições (pixels) no mapa *raster* do zoneamento, é o conjunto de decisão. Finalmente, decisões são tomadas e para cada indivíduo é atribuída uma alternativa específica do quadro de decisão (EASTMAN, 2003).

A decisão é suportada pela consideração de critérios, que servem como normas para encontrar as melhores alternativas e representam condições possíveis de quantificar ou avaliar, contribuindo assim, para a tomada de decisão (CALIJURI et al., 2002).

2.1.3 Critério

Critério é fundamental em uma decisão. É algo que pode ser medido e avaliado. É a maneira sobre o qual atributos são valorados em um processo de decisão. Os critérios podem ser de dois tipos: Fator ou Restrição.

2.1.3.1 Fator

Os fatores são critérios que definem algum grau de aptidão para o que está sendo analisado, por exemplo, regiões geográficas, em caso de mapeamento ambiental. Essa aptidão é medida em uma escala contínua, de forma a abranger todo o espaço de solução inicialmente previsto. Então, um fator é um critério que realça ou diminui a interferência de uma alternativa específica para a atividade que está sendo considerada. Por exemplo, uma empresa de reflorestamento pode determinar que quanto mais íngreme a inclinação do terreno, mais caro é transportar a madeira. Na análise deste fator, as áreas melhores para o reflorestamento seriam aquelas com inclinações menores, e quanto menor a inclinação, melhor (EASTMAN, 2003).

2.1.3.2 Restrição

As restrições são baseadas em lógica booleana (verdadeiro ou falso) que torna apto ou inapto para análise o que está sendo trabalhado. Assim, as restrições são utilizadas para limitar os indivíduos a serem considerados no processo de avaliação multicritérios. Um bom exemplo de restrição é desconsiderar o desenvolvimento de áreas designadas como reservas de animais selvagens. Outro exemplo pode ser a estipulação que nenhum desenvolvimento pode acontecer em áreas cuja inclinação exceda 30%. Em muitos casos, as restrições são expressas na forma de um mapa (lógico) booleano: áreas a serem excluídas da análise são codificadas com um 0 (zero) e as áreas a serem consideradas são codificadas com 1 (um). Entretanto, em alguns casos, a restrição pode ser expressa como alguma característica existente no conjunto de decisão. Por exemplo, que a área total de terras selecionadas para o desenvolvimento não seja menor de 5000 hectares, ou que as partes selecionadas constituam uma única área contígua. Ambas as formas de restrição têm o mesmo objetivo, que é limitar as alternativas em consideração (EASTMAN, 2003).

2.1.4 Regra de decisão

O procedimento pelo qual os critérios são selecionados e combinados para realizar uma determinada avaliação, e pelo qual avaliações são comparadas e

realizadas, é conhecido como uma regra de decisão (RAMOS e MENDES, 2001; EASTMAN, 2003).

As regras de decisão geralmente contêm procedimentos para combinar diferentes critérios em um único índice composto e em uma indicação de como as alternativas devem ser comparadas usando este índice (RAMOS e MENDES, 2001; Eastman, 2003). Por exemplo, um mapa de adequação agrícola pode ser gerado com base em uma combinação linear ponderada das informações de solos, declividade, e de distâncias de recursos hídricos superficiais. A regra pode indicar as melhores áreas a serem cultivadas.

2.1.5 Objetivo

As regras de decisão são estruturadas no contexto de um determinado objetivo. A natureza do objetivo serve como diretriz para o desenvolvimento de uma regra de decisão específica (EASTMAN, 2003). Um exemplo pode ser o objetivo de avaliar regiões potenciais para se criar uma área de preservação de mata nativa. Se, além do objetivo principal, existe também a intenção de utilizar a área selecionada para uso do ecoturismo e esportes radicais, tem-se que a ótica inicial do processo é alterada pelas necessidades do ecoturismo e dos esportes radicais. A escolha dos critérios a serem usados e dos pesos a serem respectivamente atribuídos no segundo caso é completamente diferente em relação aos critérios e pesos do objetivo original.

2.1.6 Avaliação

Diante de um problema ou de uma situação a ser melhorada, decisões precisam ser tomadas. Acontece que em muitos casos, diversas variáveis (critérios) compõem a equação de decisão e, neste caso, o procedimento a ser adotado deve ser a Avaliação Multicritérios, a ser detalhada no item 2.3.

2.1.7 Risco de decisão

Risco de decisão pode ser entendido como a probabilidade de que a decisão tomada esteja errada. O risco resulta da incerteza e sua avaliação requer, assim, uma

combinação de estimativas de incertezas das várias fontes envolvidas (incerteza na base de dados e na regra de decisão) e procedimentos.

2.1.8 Incerteza

A incerteza não se resume a um problema com o tratamento dos dados, ela é uma característica inerente do próprio processo de tomada de decisão. Como exemplo, dadas as pressões crescentes que estão sendo colocadas para utilização de recursos naturais, é necessário reconhecer a incerteza não como uma falha a ser lamentada e talvez ignorada, mas como um fato do processo de tomada de decisão que necessita ser compreendido e trabalhado. Assim, a gerência da incerteza encontra-se no centro da tomada de decisão eficaz e constitui-se em um papel muito especial para os sistemas computacionais que dão suporte à decisão (EASTMAN, 2003).

2.2 O processo de planejamento e gestão

Moura (2005) contextualiza que planejar remete ao futuro, à compreensão e previsão de processos. Para a autora, o planejamento é um conjunto de ações e de construções de propostas em maior escala temporal e espacial, enquanto a gestão indica o presente e significa administrar uma situação, trabalhando em menor escala atemporal e espacial.

Para Oliveira (2004), planejamento pressupõe a necessidade de um processo decisório que ocorrerá antes, durante e depois de sua elaboração. O autor afirma que planejamento pode ser conceituado como um processo desenvolvido para o alcance de uma situação desejada, de um modo mais eficiente, eficaz e efetivo, com a melhor concentração de esforços e recursos.

O autor continua afirmando que planejamento corresponde ao estabelecimento de um conjunto de providências a serem tomadas para a situação em que o futuro tende ser diferente do passado, onde a organização tem condições e meios de agir sobre as variáveis e fatores de modo que possa exercer alguma influência. Ele coloca ainda os aspectos principais de planejamento:

- O planejamento não diz respeito às decisões futuras, mas às implicações futuras de decisões presentes (DRUCKER, 1962 apud OLIVEIRA, 2004).
- O planejamento deve ser visualizado como um processo de ações inter-relacionadas e interdependentes que visam ao alcance de objetivos previamente estabelecidos.
- O processo de planejamento é muito mais importante que o resultado final (plano de ação).

Tinoco e Kraemer (2004) colocam que a gestão ambiental é o sistema que inclui a estrutura organizacional, atividades de planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos, processos e recursos para desenvolver, implementar, atingir, analisar criticamente e manter a política ambiental.

2.2.1 Planejamento e gestão em bacias hidrográficas

Para Randhir et al. (2001), em uma bacia hidrográfica, variados recursos naturais são importantes aos ecossistemas, além de proporcionar bens e serviços à sociedade. Dentre esses fatores, está a água, indispensável à sobrevivência humana e fundamental a diversas atividades econômicas que fazem uso deste recurso, tanto em quantidade quanto em qualidade.

Em material publicado em SIGEST (2004) os autores colocam que “há uma percepção generalizada na comunidade científica mundial de que os recursos hídricos representam o principal elemento estruturador do desenvolvimento sustentável. Suas relações de qualidade e quantidade representam o fator isolado mais importante de limitação do crescimento populacional, além de ser um fator determinante da qualidade de vida humana na maior parte do planeta. Neste contexto, surgem problemas e demandas de várias escalas e geralmente interdisciplinares”.

Quando se fala em desenvolvimento sustentável, uma das principais questões trata do uso adequado dos recursos hídricos, fator determinante da qualidade de vida do ser humano. A capacidade finita de renovação sugere gerenciamento dos recursos hídricos, como forma de mediar à demanda das necessidades do uso múltiplo a que se destina, como abastecimento, irrigação, rotas de navegação fluvial, geração de energia

elétrica, lazer, turismo, conservação da vida selvagem, dentre outras (MORALES e ANTONELLO, 2004).

Gore (1998) afirma que uma nova onda de inovações tecnológicas está possibilitando, de forma sem precedentes na história, a captura, armazenamento, processamento e visualização de informações e fenômenos ambientais de nosso planeta.

Utilizar metodologias associadas a ferramentas tecnológicas e computacionais para obtenção e processamento de dados para gerar informações são itens obrigatórios em projetos de planejamento e gestão, nas áreas das Ciências da Terra, incluído aí o planejamento e gestão de bacias hidrográficas.

Moura (2005) afirma que uma das grandes contribuições do geoprocessamento nas Ciências da Terra é a possibilidade de implantar processos com abordagem e análise sistêmicas, conceitos que trouxeram para as ciências que lidam com complexa gama de variáveis, grande ganho na aproximidade entre o modelo de estudo e a realidade.

A mesma autora coloca, ainda, que nos dias de hoje pode-se observar a passagem de uma fase em que a ausência de dados para análise espacial era fator determinante para apontar os caminhos na pesquisa ambiental, para uma fase em que pode-se ter excesso de dados, o que não significa necessariamente qualidade nas informações.

Segundo Vlahos e Herbst (2000), a preservação das terras de bacias hidrográficas representa um dos métodos mais efetivos e econômicos de assegurar suprimentos adequados e seguros de água. Já Wilson e Droste (2000) mostram que há necessidade de uma abordagem multidisciplinar na coleta e análise dos dados, que são a base das análises necessárias às tomadas de decisão, nas questões referentes ao gerenciamento de recursos hídricos.

Nos últimos anos houve um crescimento considerável no uso de SIG como ferramenta de suporte à decisão, sendo que, para alguns, o SIG consiste simplesmente em fornecer informações ao processo de tomada de decisão. Entretanto, é mais provável que para a real utilização dos recursos naturais, a contribuição do SIG seja bem maior (EASTMAN, 2003).

Tim, Jain e Liao (1996) citam a flexibilidade de um SIG, somada à sua capacidade de integrar modelos com dados espaciais, como importantes instrumentos para os gerentes e planejadores, manejar recursos naturais e avaliar a implementação de políticas regulatórias antes de sua implementação.

Miller, Guertin e Heilman (2004) citam que a tomada de decisão em manejo de bacias hidrográficas é um processo complexo, requerendo, em geral, a cooperação e comunicação entre agentes federais, estaduais e locais, no balanceamento de aspectos biofísicos e socioeconômicos.

Vettorazzi (2006) apresenta trabalhos realizados por diversos autores, sobre abordagens que podem ser empregadas na priorização de áreas para a conservação de água e solo em bacias hidrográficas. Em todos os trabalhos ficou evidente a necessidade de transformar os dados disponíveis em informações com qualidade, para dar sustentabilidade aos processos propostos.

Diante do apresentado até o momento, fica evidente que as pessoas responsáveis pelo planejamento e gestão de bacias hidrográficas devem estar apoiadas em informações e ferramentas que subsidiem seus processos decisórios.

2.2.2 Ferramentas de planejamento e gestão de bacias hidrográficas

Christofoletti (1999) define Sistema de Informações Geográficas (SIG) como um conjunto integrado de programas especificamente elaborados para serem utilizados com dados geográficos, executando tarefas que incluem entrada, armazenamento e recuperação dos produtos resultados do manejo dos dados.

Em estudos variados, os Sistemas de Informações Geográficas e a Análise Multicritérios demonstraram que quando utilizados com bom embasamento teórico-científico-prático, apresentam bons resultados em atividades que possibilitam a sustentabilidade de bacias hidrográficas. A análise multicritérios é importante, já que na maioria dos casos estudados, as avaliações e soluções de problemas consideraram inúmeras variáveis, na tentativa de obter os melhores resultados.

Vettorazzi (2006) coloca que Sistemas de Informações Geográficas são ferramentas adequadas à análise ambiental, por possuírem características que comportam a espacialização da análise. O autor comenta ainda sobre o impulso dado,

nas últimas décadas, na análise ambiental em conseqüência do desenvolvimento dos SIGs, dentre as quais grandes benefícios nas atividades de zoneamentos, mapeamentos de risco, de vulnerabilidade, de sensibilidade e de impactos ambientais.

Os SIGs são ferramentas com grande capacidade de manipulação e gerenciamento das massas de dados espaciais. Em se tratando de armazenamento dos dados, os muitos SIGs possuem comunicação direta com sistemas gerenciadores de bancos de dados, o que garante segurança e integridade dos dados contra uso por usuários inexperientes ou com restrição de acesso aos mesmos.

Dai, Lee e Zhang (2001) afirmam que, em processos de avaliação ambiental para planejamento do uso e ocupação do solo em áreas urbanas, grandes quantidades de informações espaciais são utilizadas nos processos de análise, tais como, dados de relevo, geologia, água subterrânea e histórico de desastres geológicos. Os resultados apresentados pelos autores demonstraram que a utilização de SIG, juntamente com análise por múltiplos critérios, apresentou alta funcionalidade para avaliações ambientais.

Diante da potencialidade de uso de SIG, Vettorazzi (2006) coloca que, dentre outras, sua aplicação pode ser realizada na análise de risco e prevenção de incêndios florestais, planejamento de uso da terra, seleção de áreas apropriadas à construção de barragens, manejo florestal, seleção de áreas prioritárias à conservação, gerenciamento de recursos hídricos, planejamento de áreas verdes urbanas, mapeamento de áreas potenciais quanto à desertificação, zoneamentos agrícolas, determinação de áreas prioritárias ao controle de doenças, gerenciamento pesqueiro, estudos faunísticos e avaliação de habitats.

Valente (2005) cita que, com a evolução dos SIGs, também observa-se uma evolução das metodologias empregadas na definição de áreas prioritárias. Para Malczewski (2004), a atividade básica em um SIG, que é o cruzamento entre diferentes planos de informação, acarretou na implementação de várias técnicas, como Metodologias Multicritérios de Apoio à Decisão (MCDA), o método de Inteligência Artificial (AI), os métodos de visualização e os SIG-Web.

Um caso em que o SIG é associado à análise multicritérios foi na apresentação de solução para as graves conseqüências ambientais na bacia hidrográfica de Murray

Darling, causado pela produção de grande volume de resíduos animais, gerado pelo rápido crescimento da pecuária industrial intensiva no sudoeste de Queensland, Austrália. Neste caso, Basnet, Apan e Raine (2001) apresentam um método para a seleção de locais para a aplicação segura dos resíduos animais como fertilizantes agrícolas.

Baban e Wan-Yusof (2003) apontam que dados de falhas em várias barragens e o aumento da conscientização ambiental por parte da população irão requerer, cada vez mais, a inclusão de fatores sociais e ambientais, além dos técnicos e econômicos, no processo de determinação dos locais mais apropriados à construção de reservatórios. Novamente o uso de SIG associado à análise multicritérios coloca-se como ferramenta em processo de planejamento e gestão ambiental, já que os SIGs têm a possibilidade de trabalhar com dados espaciais e dados não-espaciais (socioeconômicos, por exemplo). Utilizando diversos fatores como relevo, geologia, hidrografia, uso e cobertura do solo e assentamentos humanos, os autores desenvolveram e implementaram uma metodologia para determinar locais potenciais para reservatórios na ilha de Langkawi, Malásia.

Já Araújo e Macedo (2002) mostram a utilização de técnicas de geoprocessamento alinhados com análise multicritérios na avaliação da favorabilidade de mineralizações de metais básicos, na área das folhas Cerro Azul e Apiaí, escala 1:100.000, Vale do Ribeira, SP e PR. Para tanto, o método utilizado baseou-se na seleção e ponderação de parâmetros prospectivos e aplicações de SIG com um banco de dados composto por dados geológicos, geoquímicos, aerogeofísicos e de ocorrências minerais. Para os autores, o método utilizado é apropriado à seleção de áreas para pesquisa geológica em detalhe a baixos custos, em áreas semelhantes à estudada.

Na questão agrícola, Li e Yeh (2001) mostram a importância do zoneamento de terras agrícolas, para fim de proteção, como atividade estratégica na redução da perda de áreas com alto potencial agrícola em regiões de rápido desenvolvimento. Os autores aplicaram o uso de análise multicritérios em ambiente SIG para o zoneamento de terras, incluindo os fatores de adequação e a geometria das áreas agrícolas no modelo utilizado.

Wang e Medley (2004) utilizaram tecnologia SIG para desenvolver um modelo baseado em múltiplos critérios, com objetivo de identificar áreas potenciais à restauração florestal, em Ohio, EUA, sob a ótica de conservação e seqüestro de carbono.

Já Ferraz e Vettorazzi (2003) analisaram os fatores fertilidade dos solos, mata nativa existente, corpos d'água, declividade e suscetibilidade à erosão, em ambiente SIG e recursos de decisão multicritérios, para a identificação de áreas apropriadas à recomposição florestal, com espécies nativas, em fazendas de reflorestamento, com base em princípios de ecologia da paisagem.

Varma, Ferguson e Wild (2000) discutiram o componente metodológico de um sistema de apoio à decisão para o manejo florestal sustentável, em nível de unidade de manejo. Os autores utilizaram técnica de análise multicritérios baseada em um SIG para medir a sustentabilidade do manejo florestal, integrando e utilizando dados espaciais e temporais para diversas variáveis ecológicas, econômicas e sociais.

Avaliações com uso de SIG e Análise Multicritérios também foram realizadas por Calijuri, Mello e Lorentz (2002) para seleção de áreas para a implantação de aterros sanitários no município de Cachoeiro do Itapemirim, ES. Após avaliação dos resultados, os autores afirmam que o método de análise estratégica de decisão, viabilizado pelo SIG, permite a integração de informações espaciais para tomada de decisão no processo de avaliação e seleção de áreas para a implantação de empreendimentos impactantes.

Valente e Vettorazzi (2005) empregaram a Análise Multicritérios por meio de um SIG para definir áreas prioritárias para conservação e preservação florestal na bacia do Rio Corumbataí, SP, analisando os fatores proximidade aos fragmentos florestais, proximidade às áreas florestais com maior área nuclear, proximidade à rede hidrográfica, distância às estradas, distâncias às áreas urbanas e vulnerabilidade do solo à erosão.

Em uma revisão bibliográfica, Vettorazzi (2006) estudou alguns trabalhos e aponta o uso de SIG e a análise multicritérios em: preparação de mapas de sensibilidade às erosões hídrica e eólica, como instrumentos de gerenciamento para uso no campo, na Floresta de Landes de Gascogne, França; estudos na Etiópia, para a

redução de erosão do solo por meio da realocação de culturas agrícolas de acordo com sua capacidade de proteger o solo; mapeamento da probabilidade de ocorrência do veado-campeiro (*Ozotoceros bezoarticus*), na época seca, em seu habitat natural, no Parque Nacional das Emas (PNE), em Goiás; mapeamento de áreas apropriadas ao plantio de culturas agrícolas, como identificar áreas adequadas ao plantio de aveia (*Avena sativa L*.) no México Central e na identificação de áreas adequadas à produção de milho e de batata no México; determinação de áreas adequadas ao reflorestamento com duas espécies de Pinus, no Chipre; mapeamento de áreas de risco de incêndios na Estação Experimental de Tupi (EET), do Instituto Florestal do Estado de São Paulo, no município de Piracicaba; seleção de áreas apropriadas à implantação de aterros sanitários; planejamento urbano; estudo de impactos ambientes causados por redes viárias; projetos viários; recuperação de áreas degradadas por mineração; identificação de áreas apropriadas à implantação de reservas naturais para pesquisas científicas; e identificação de locais apropriados à criação de ostras.

As aplicações acima mostram a potencialidade de interação entre SIG e Análise Multicritérios. Malczewski (2004) ressalta o alinhamento da capacidade do SIG de aquisição, armazenamento, recuperação, manipulação e análise de dados, com a capacidade dos métodos de tomada de decisão multicritérios em combinar os dados geográficos e as preferências dos tomadores de decisão em valores unidimensionais de decisões alternativas. O autor mostra que o uso da análise multicritérios dentro de um ambiente SIG pode ser visto como um processo que combina e transforma dados espaciais e não-espaciais (entrada) em uma decisão resultante (saída), fazendo parte deste processo procedimentos com uso de dados geográficos em consonância com o juízo de valores dos tomadores de decisão de acordo com regras estabelecidas.

2.3 Avaliação multicritérios

O objetivo de utilização de Metodologias Multicritérios de Apoio à Decisão (Multicriteria Decision Aid) é o de propiciar aos analistas e decisores melhores condições para trabalhar com situações nas quais há a necessidade de identificação de prioridades sob a ótica de múltiplos critérios. Não pode ser descartada a hipótese de existirem interesses conflitantes em relação aos múltiplos critérios considerados no processo de avaliação.

A abordagem multicritérios caracteriza-se pela construção de vários critérios utilizando diversos pontos de vista. Para Oliveira (2007) estes pontos de vista representam os eixos pelos quais os diversos atores de um processo decisório justificam, transformam e questionam suas preferências.

Para Wolf (2002) a abordagem multicritérios baseia-se na crença de que a construção de diversos critérios implica positivamente na construção do modelo para apoio à decisão, pois inclui os diversos aspectos considerados importantes pelas pessoas envolvidas no processo decisório.

Embora as primeiras aplicações que se têm registro tenham ocorrido após a Revolução Francesa, onde problemas teriam que ser solucionados a partir de opiniões de várias pessoas, foi a partir da década de 70 que ocorreram formalizações quanto ao apoio multicritérios à decisão que se firmou como área de pesquisa operacional (MELLO et al., 2003).

Zanatta (1999) cita que foi a partir da década de 50 que surgiu a pesquisa operacional, com o objetivo de fornecer maior racionalidade na tomada de decisão, tendo o auge de sua aplicação nos anos 60. Para a pesquisa operacional tradicional existe um decisor que julga possuir o conhecimento suficiente para poder formar consenso sobre as prioridades e objetivos a serem alcançados.

O autor coloca ainda, que a partir dos anos 70, com um crescimento do número de decisões tomadas em grupo, iniciou-se um processo de transformação do pensamento de como resolver problemas complexos, fazendo surgir um conjunto de novos métodos para auxiliar a tomada de decisão. Assim surge na França, no início dos anos 70, a metodologia multicritérios de apoio à decisão, que se caracteriza por considerar a subjetividade dos atores e a impossibilidade de encontrar uma solução

ótima, tendo uma ótica de que os processos decisórios são complexos e formados por diversos atores com interpretações diferenciadas sobre o problema e com juízos de valor também diferentes.

Bana e Costa et al (1997), mencionam que métodos multicritérios, em contraste com as abordagens clássicas de pesquisa operacional, facilitam a aprendizagem sobre o problema e sobre os cursos de ação alternativos, por permitir que as pessoas possam refletir sobre seus valores e preferências segundo diversos pontos de vista.

Segundo Wolf (2002), o enfoque construtivista da análise multicritérios de apoio à decisão faz com que o problema deixe de ser visto como um fato real isolado e passe a ser tratado dentro do contexto das inter-relações daqueles que percebem tal problema, sendo chamado de contexto decisório. O contexto decisório estará totalmente definido após a identificação dos atores envolvidos, dentre eles os decisores, as ações e a problemática. É importante que o decisor delimite o campo de alternativas possíveis de acordo com seus objetivos estratégicos.

Segundo Roy (1993), o objetivo da metodologia multicritérios de apoio à decisão não é buscar a melhor decisão possível através de modelos simplificados da realidade, mas, sim, desenvolver o conhecimento por meio dos conceitos, modelos, procedimentos e resultados e, assim, subsidiar o decisor nos processos decisórios de acordo com os valores e objetivos do mesmo.

Detoni (1996) destaca que métodos multicritérios são principalmente recomendados para aplicação em problemas complexos de natureza multidisciplinar, que apresentem diversos fatores, tanto do tipo qualitativo quanto quantitativo, a serem utilizados no processo de análise.

Oliveira (2007) sugere que as metodologias de apoio à decisão devem: considerar as diferentes perspectivas das múltiplas alternativas; facilitar a interação; propiciar a geração de aprendizado; promover sentimento de participação por parte do decisor na formulação da problemática da decisão; e propiciar transparência de todo o processo.

Ao fazer utilização de análise multicritérios para apresentação de soluções para um problema, é necessário, antes de mais nada, estabelecer claramente qual o objetivo da análise. Assim, devem ser executadas quatro etapas: descrição correta do problema,

ordenação, escolha e alocação em classes. Deve-se também definir as alternativas, os critérios, o método a ser usado e quem atua como decisor, que é quem emite juízos de valor sobre as alternativas e sobre os critérios (MELLO et al., 2003).

Mello et al. (2003) ainda destacam que os componentes básicos de um problema de decisão multicritérios são: Decisor, que é o agente ou tomador de decisão; Analista, que fica encarregado de interpretar e quantificar as opiniões dos decisores, além de estruturar o problema, elaborar o modelo matemático e apresentar os resultados para a decisão; Modelo, são os algoritmos compostos por regras e operações matemáticas que possibilitam transformar as opiniões dos decisores em resultados quantitativos; Alternativas, são ações que podem ser avaliadas isoladamente. Podem representar diferentes cursos de ação, diferentes hipóteses sobre a natureza de uma característica, diferentes conjuntos de características, dentre outras; e Critérios, que permitem a comparação das ações em relação a pontos de vista particulares, ou seja, é a expressão qualitativa ou quantitativa de um ponto de vista utilizado na avaliação das alternativas.

Na abordagem multicritérios, os tomadores de decisão colocam seus pontos de vista através de critérios que, segundo Eastman (2003), são a base do processo de tomada de decisão e que podem ser medidos e avaliados. Ainda segundo o autor, os critérios podem ser de dois tipos: fatores e restrições, e podem referir-se a um único atributo ou a todo o conjunto de decisão.

Eastman (2003) define que um fator é um critério que realça ou diminui uma alternativa específica para a atividade que está sendo considerada. Geralmente é mensurado em uma escala contínua. Os fatores utilizados no processo de tomada de decisão são aqueles que representam as características críticas ao processo.

O autor ainda define que uma restrição é utilizada como limitador dos fatores, ou seja, podem ser entendidas como categorias restritivas das alternativas (fatores). Como exemplo de restrição é o fato de que nenhuma cultura de ciclo curto deve ser plantada em áreas com declividade do terreno superior a 30%.

Em seu trabalho, Valente (2005) coloca de maneira didática a definição de componentes que são usados nas análises da paisagem, para definição de áreas prioritárias segundo os objetivos de seu estudo. A autora define que os fatores

equivalem às diferentes características e/ou processos de uma paisagem, importantes à geração do mapa de prioridades. Eles podem ser representados de forma contínua, o que é uma vantagem em relação à representação das características de uma paisagem em intervalos discretos. Pesos atribuídos aos fatores garantem a representatividade e importância de cada um deles no processo de tomada de decisão. Já as restrições são as características da paisagem que limitam espacialmente aquelas importantes à geração do mapa de prioridades.

2.3.1 Os atores

Os atores são agentes que compõem o grupo de pessoas com interesses comuns no resultados do processo decisório, podendo ter ações diretas ou indiretas no processo decisório. Os atores intervêm no processo decisório interagindo com o ambiente no qual está inserido, expressando suas preferências através de seu sistema de valores, e sendo influenciados pelo sistema de valores dos demais atores (ZANELLA, 1996; MONTIBELLER NETO, 1996).

Podem ser divididos em dois grupos, de acordo com sua participação no processo decisório: o primeiro grupo é composto pelos *stakeholders*, que são os indivíduos que intervêm diretamente no processo, e que impõem seus juízos de valor. Este grupo divide-se em três categorias: o decisor é o indivíduo responsável pela decisão e, conseqüentemente, pelas conseqüências geradas pela decisão tomada; o passivo, que atua diretamente no processo, expressando seus valores, mas, não tem o poder da decisão; e o facilitador, que possui papel de consultor, conduzindo o processo de apoio à decisão, ajudando o decisor a descrever, entender e buscar soluções para o problema. O segundo grupo é composto pelos indivíduos que serão afetados pela decisão tomada. Este grupo pode intervir indiretamente no processo decisório, de forma a tentar influenciar os juízos de valores dos *stakeholders*.

2.3.2 Fases do processo de apoio à decisão

Dias et al. (1997) dizem que nos processos de apoio à decisão, as fases de estruturação e de avaliação são muito bem caracterizadas, podendo ser ainda

identificada a recomendação dos cursos de ação que devem ser implementadas, como uma terceira fase.

2.3.2.1 Fase de estruturação

Problemática é o conjunto de atividades que, para um conjunto de atores e um contexto decisório, identifica claramente o tipo de situação ou avaliação que o decisor deseja (ZANELLA, 1996).

Segundo Wolf (2002) a problemática de decisão é aquela que pertence ao decisor e resume-se na questão: o que fazer? Na hipótese de não saber como resolver esta problemática o decisor busca ajuda de um facilitador. A problemática de apoio à decisão pertence ao facilitador e refere-se ao: como fazer? Neste caso, o facilitador deve elaborar um plano de trabalho apoiado em procedimentos técnicos que levem ao decisor o saber o que fazer. Ainda segundo o autor, determinar um plano de trabalho, que direcione o foco do problema, é a primeira atividade prática relativa à aplicação da metodologia multicritérios de apoio à decisão.

Representando cerca de 80% das atividades de um processo de apoio à decisão, a fase de estruturação aborda a formulação do problema e a identificação dos objetivos, procurando identificar e caracterizar os fatores relevantes ao processo (MELLO et al., 2003). Consiste, então, na definição dos objetivos do decisor, na identificação das alternativas viáveis, e no estabelecimento dos critérios que irão ser utilizados.

2.3.2.2 Fase de avaliação

A avaliação utilizando-se de métodos multicritérios propicia ao decisor opção de escolha entre as ações apontadas, considerando as conseqüências de sua implantação segundo os pontos de vista do decisor.

Avaliação Multicritérios é a principal operação de suporte à decisão utilizada em SIG, e é comumente realizada por um dos dois procedimentos a seguir: O primeiro envolve a sobreposição booleana de critérios, por meio da qual todos os critérios são convertidos a declarações lógicas apropriadas e, então, combinados por meio de um ou mais operadores lógicos, tais como a interseção (AND) e a união (OR). O segundo é

conhecido como Combinação Linear Ponderada - CLP - (Weighted Linear Combination - WLC) no qual os critérios são padronizados em uma escala numérica comum e, então, combinados por meio de uma média ponderada. O resultado é um mapa contínuo que pode então ser submetido a um ou mais mapas de restrições booleanas para acomodar critérios qualitativos e, finalmente, iniciar uma decisão final (EASTMAN, 2003).

Estes dois métodos, quando aplicados em um SIG, produzem resultados diferentes, porque são formas muito diferentes de como os critérios devem ser avaliados. A diferença dos resultados ocorre pela lógica de agregação, que no caso da CLP possibilita a compensação (*tradeoff*).

Processos decisórios em que a avaliação booleana é aplicada resultam em tomadas de decisão extremista. Se os critérios forem combinados com um AND lógico (operador de interseção), uma respectiva região de cada critério deve estar valorada adequadamente, para que a mesma esteja presente no resultado final. Se em um único critério, tal região não estiver como valor apropriado, a mesma estará excluída do resultado final. Este procedimento gera resultados de estrita aversão ao risco com estratégia cautelosa. Por outro lado, se um OR lógico (operador de união) for usado, o oposto se aplica, tendo, então, uma modalidade muito liberal de agregação. Uma região estará representada no resultado final se em pelo menos um dos critérios ela passar no teste de valoração. Neste caso, a estratégia adotada é presumidamente de muito risco (JIANG e EASTMAN, 2000; EASTMAN, 2003).

Comparando a estratégia booleana com a estratégia CLP, tem-se que no método da CLP é permitido fazer compensação nas qualidades dos critérios. Uma qualidade muito pobre em um critério pode ser compensada tendo um número de qualidades muito favoráveis em outros critérios. Esta operação não se enquadra nem como AND (aversão ao risco) nem como OR (atração ao risco), encontrando-se em algum lugar entre estes extremos (EASTMAN, 2003).

Para executar o processo de avaliação é necessário optar por um dos métodos disponíveis e que são classificados em métodos para problemas multiatributos, que possibilitam trabalhar com alternativas discretas, e para problemas multiobjetivos, que consideram um espaço contínuo de alternativas.

Para os problemas multiatributos é comum a classificação dos métodos usados pela Escola Americana e pela Escola Francesa.

A Escola Francesa é baseada em relações de prevalência e nela se destacam os métodos das famílias ELECTRE (ROY, 1968) e PROMETHEE (BRANS et al., 1984).

Os métodos da Escola Americana reduzem os vários critérios a um critério síntese, na grande maioria das vezes através de uma soma ponderada. Devido à sua aparente simplicidade matemática gozam de grande popularidade. Nesta linha destacam-se os métodos AHP (SAATY, 1980), TODIM (GOMES, 1987), MACBETH (BANA e COSTA e VANSNICK, 1997) e UTA (JACQUET-LEGREZE e SISKOS, 1982).

Dias et al. (1997) mencionam que, embora os métodos da Escola Americana apresentem alguma simplicidade operacional, existe certa dificuldade por parte dos decisores quanto à necessidade de atribuição de pesos aos critérios. Alguns critérios são realmente muito difíceis ou quase impossíveis de se mensurar, tal como o exemplo da necessidade de atribuir pesos aos critérios “custo de construção” e “probabilidade de acidentes fatais” durante a avaliação de um projeto para construção de uma obra. Atribuir esses pesos significaria especificar o preço de uma vida humana.

Mello et al. (2003) ressaltam que os problemas multiobjetivos apresentam normalmente maiores dificuldades do ponto de vista matemático, ainda que exijam a presença constante do decisor. Os autores citam que, se a preocupação do analista for a impossibilidade de o decisor fornecer informações coerentes, deve-se buscar o uso da interatividade dos problemas multiobjetivos que, se aliados ao uso de um *software* de grande apelo visual, permitem ao decisor colocar implicitamente suas preferências e ir aprendendo ao longo do processo.

2.3.3 Matriz de decisão

Após a definição de todas as alternativas e critérios a serem utilizados no modelo a ser executado, é possível montar uma matriz de decisão, de dimensão ‘m x n’, que representa a relação entre as ‘m’ alternativas (A_1, A_2,... A_m) e os ‘n’ critérios (C_1, C_2, ..., C_n). Todos os elementos da matriz de decisão correspondem ao valor de uma alternativa segundo um critério, devem estar previamente quantificados e normalizados e estar dentro de uma escala que pode ser do tipo natural de medida (por exemplo,

custos de implantação do projeto) ou do tipo subjetiva (por exemplo, conforto da população).

2.4 Avaliação multicritérios na área ambiental

2.4.1 Método AHP

O método Analytic Hierarchy Process - AHP (SAATY, 1980) foi desenvolvido na Wharton School of Business por Thomas A. Saaty e permite aos tomadores de decisão modelar problemas complexos numa estrutura hierárquica, mostrando as relações entre metas, objetivos (critérios), sub-objetivos e alternativas. É um método para trabalhar com problemas que envolvem considerações de múltiplos critérios simultaneamente.

Freitas et al. (1997) *apud* Betencourt (2000) argumentam que em processos decisórios, o método AHP pode ser utilizado na fase de concepção, onde os tomadores de decisão analisam os dados, determinam os porquês, refinam os critérios de avaliação e definem as alternativas, uma vez que permite comparar elementos de decisão quantitativos e qualitativos e, na fase de escolha, onde se avaliam as alternativas quantitativamente, verifica-se o impacto dos fatores não quantificáveis e seleciona-se a alternativa mais adequada.

Segundo Mello et al. (2003), o método AHP é um dos mais amplamente utilizados no apoio à tomada de decisão. O problema de decisão é decomposto em níveis organizados em uma hierarquia. No topo da hierarquia encontra-se o objetivo final, seguido em um nível logo abaixo pelos atributos (critérios). Estes atributos podem ser subdivididos em atributos de menor complexidade. Na base da hierarquia encontram-se as alternativas propostas na forma de cenários (Figura 2).

A atribuição de pesos aos critérios é feita construindo-se uma matriz das importâncias relativas de cada critério. Usando de subjetividade, os julgamentos dos tomadores de decisão referentes à importância de um atributo em relação a outro são transformados em valores numéricos, com base em uma escala, de 1 a 9, por exemplo, onde 1 representa igual valor entre os critérios, e 9 alto grau de favoritismo de um em relação ao outro (BETENCOURT, 2000). O Quadro 1 mostra os valores a serem utilizados e sua representatividade no processo de avaliação pareada.

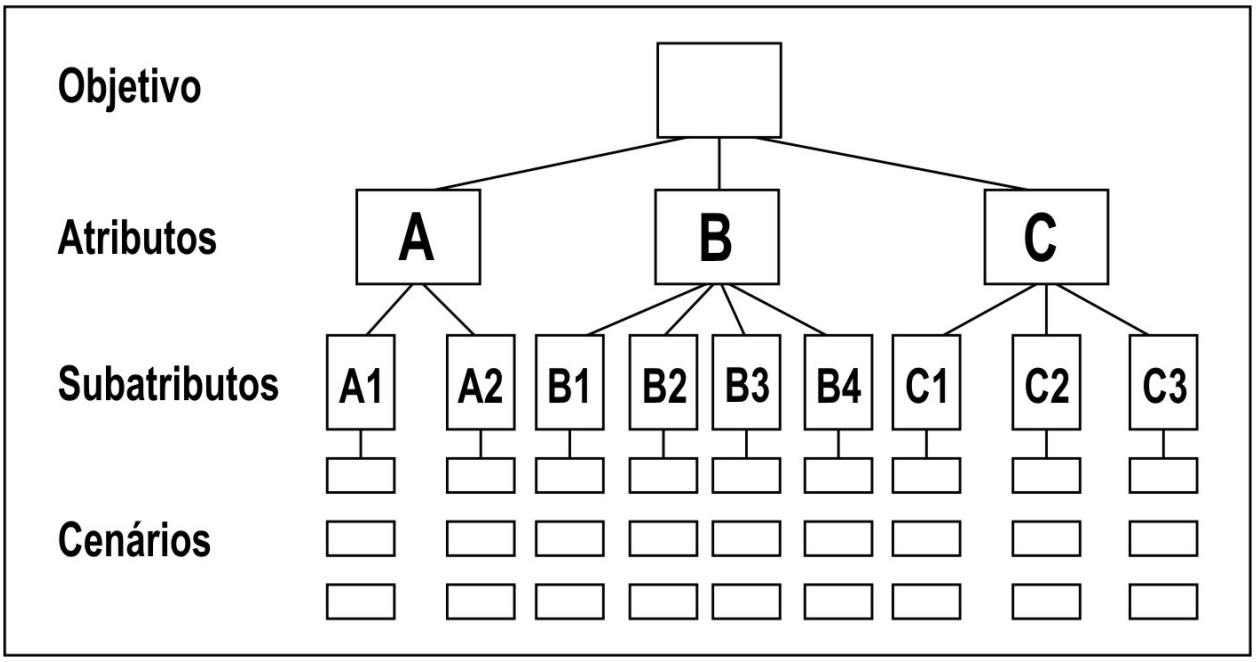


Figura 2 - Representação hierárquica do método AHP

Porém, este método apresenta como desvantagens a complexidade matemática, já que os algoritmos para determinação de autovalores são de complexidade não polinomial e a não verificação de coerência das opiniões do decisor, o que pode levar a resultados desprovidos de sentido.

Valor	Subjetividade no Julgamento
1	Atributo ‘A’ é igualmente preferível a Atributo ‘B’
2	Atributo ‘A’ é igualmente a moderadamente preferível sobre Atributo ‘B’
3	Atributo ‘A’ é moderadamente preferível sobre Atributo ‘B’
4	Atributo ‘A’ é moderadamente a fortemente preferível sobre Atributo ‘B’
5	Atributo ‘A’ é fortemente preferível sobre Atributo ‘B’
6	Atributo ‘A’ é fortemente a muito fortemente preferível sobre Atributo ‘B’
7	Atributo ‘A’ é muito fortemente preferível sobre Atributo ‘B’
8	Atributo ‘A’ é muito fortemente a extremamente preferível sobre Atributo ‘B’
9	Atributo ‘A’ é extremamente preferível sobre Atributo ‘B’

Quadro 1 - Comparação pareada para o julgamento dos Atributos A e B

2.4.2 Padronização ou normalização de atributos

Além da escolha do método a ser adotado na avaliação multicritérios deve-se estar atento em como possibilitar que atributos com valorações diferentes possam ser combinados no processo de avaliação. Como comparar a declividade que tem sua quantificação em grau de inclinação com um atributo que se quantifica pela distância com áreas de preservação de mata nativa, ou ainda com atributo que se quantifica pelo valor do solo para determinado tipo de cultura agrícola. Um procedimento chamado Padronização ou Normalização possibilita equacionar esse descompasso de valoração de critérios, pelo qual é necessário submeter todos os atributos envolvidos no processo de avaliação a uma padronização linear. Jiang e Eastman (2000) afirmam que a forma mais comum de padronização é reescalonar a faixa de valores de cada atributo numa base numérica comum, por exemplo, numa escala de 0 a 255.

Em Valente (2005) é descrito o processo denominado normalização, e a autora coloca que a representação contínua da paisagem é possível com a padronização dos fatores para uma escala numérica comum, baseada na lógica *Fuzzy*, de maneira que um conjunto de valores expressos numa dada escala é convertido em outro comparável, expresso em uma escala normalizada.

2.4.3 O método CLP

Malczewski (2004) ressalta que, ao longo da última década, vários métodos de avaliação multicritérios (ou multiatributos) têm sido implementados em ambientes SIG, incluindo o método de Combinação Linear Ponderada (CLP) e suas variantes, métodos do Ponto Ideal, Análise de Concordância e do Processo Hierárquico Analítico. Vettorazzi (2006), porém, ressalta a importância dos trabalhos que utilizam os métodos da Combinação Linear Ponderada e da Média Ponderada Ordenada, sendo este último uma extensão da CLP, e que pela boa flexibilidade proporcionada ao processo de tomada de decisões, está sendo considerado muito promissor na área ambiental.

Dentre as ferramentas de decisão implementadas em ambiente SIG, Malczewski (2000) destaca que o método CLP é um dos mais utilizados, tendo como principal razão para sua popularidade a fácil implementação em ambiente SIG usando operações de álgebra de mapas e modelagem cartográfica. Outro fator que ajuda em sua

popularidade é o fato de ser de fácil entendimento para os tomadores de decisão. Vettorazzi (2006) cita que, dentre outras atividades, este método pode ser utilizado em avaliações para adequação do uso do solo, seleção e priorização de áreas e em problemas de avaliação de recursos.

Este método apresenta como principais vantagens, a representação contínua da paisagem e a possibilidade dos fatores receberem pesos, de acordo com a importância que possuem para o objetivo do trabalho (CHEN et al., 2001).

Também com o uso de CLP, após padronização dos fatores utilizando um conceito relativo, ou *Fuzzy*, Tagliani (2003) apresenta estudo de avaliação da vulnerabilidade ambiental de uma região da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Para o autor, a metodologia utilizada mostrou-se flexível, possibilitando de maneira rápida e fácil a reavaliação de informações e critérios utilizados.

O método CLP apresentou-se mais favorável nos resultados dos estudos de Baban e Wan-Yusof (2003) que desenvolveram e implementaram uma metodologia para determinar locais potenciais para reservatórios na ilha de Langkawi, Malásia. Utilizaram os fatores relevo, geologia, hidrografia, uso e cobertura do solo e assentamentos humanos. Após processos de análise, o método Booleano apresentou seis locais adequados à construção de reservatórios, dos quais apenas dois apresentaram boa correspondência com os locais apontados por estudos baseados em campo, enquanto que o método da CLP apontou sete locais adequados, cinco dos quais estavam entre os gerados por estudos de campo.

Utilizando os fatores raridade, isolamento, distúrbio e área nuclear e com base na abordagem multicritérios (método da Combinação Linear Ponderada), Geneletti (2004) identificou, na Província de Trento, Itália, áreas prioritárias para a conservação de ecossistemas importantes à sua região.

Gkaraveli, Good e Williams (2004) priorizaram áreas para a restauração florestal, também com a Combinação Linear Ponderada, no Parque Nacional de Snowdonia, Inglaterra, com base em critérios importantes às espécies florestais da região.

Salam, Khatun e Ali (2005) apresentam um modelo baseado em SIG, utilizando o método CLP para identificar a adequação de locais para a produção de carpas, com base nos características biológicas da espécie, características do solo, disponibilidade

de água, presença de rede viária, mercado, fontes de alevinos, tipos de serviço de extensão, insumos agrícolas e mão-de-obra.

Jiang e Eastman (2000) estudaram a Combinação Linear Ponderada e discutem que, apesar de ampla utilização, o método apresenta limitações para algumas aplicações no processo de tomada de decisão e sugerem, então, a utilização do método da Média Ponderada Ordenada - MPO.

O estudo realizado por Araújo e Macedo (2002), em avaliação da favorabilidade de mineralizações de metais básicos, mostrou que ambos os métodos CLP e MPO mostraram-se adequados a esse tipo de análise, na área estudada, produzindo resultados semelhantes, porém, a análise por MPO obteve os melhores resultados, gerando mapas de favorabilidade que mostram um maior número de classes em pequenas áreas, enquanto que a análise por CLP apresentou resultados mais coerentes, mas sem detalhar áreas menores.

Malczewski (2006) colocam que o método MPO tem sido utilizado no desenvolvimento de estratégias para o gerenciamento ambiental na bacia hidrográfica Cedar Creek, Ontário, Canadá, com objetivo de avaliar e priorizar áreas na bacia, para reabilitação e projeto avançados, tais como melhorar a sua cobertura florestal natural, melhorar a qualidade e a biodiversidade de suas áreas naturais, proteger sua água subterrânea e melhorar a saúde de seus corpos d'água. Neste caso, os critérios são proteção de áreas de recarga, distância das nascentes, proteção as áreas suscetíveis à erosão, proteção de áreas úmidas, proteção da área nuclear de floresta, proximidade dos corpos d'água superficiais, proximidade de áreas naturais, proteção ao uso do solo, proteção de propriedades particulares e visibilidade.

O método da MPO também foi utilizado por Valente e Vettorazzi (2005) para definir áreas prioritárias para conservação e preservação florestal na bacia do Rio Corumbataí, SP. Foram analisados os fatores proximidade aos fragmentos florestais, proximidade às áreas florestais com maior área nuclear, proximidade à rede hidrográfica, distância às estradas, distâncias às áreas urbanas e vulnerabilidade do solo à erosão. Foram apresentados mapas com cinco níveis de prioridade: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. O método da MPO foi considerado eficiente na

determinação de áreas prioritárias à conservação e à preservação florestal, em ambiente SIG, na área estudada.

2.4.4 O Método MPO

Segundo Vettorazzi (2006), a Média Ponderada Ordenada (MPO) é uma classe de operadores multicritérios introduzida por Yager em 1988 e implementada em ambiente SIG por Eastman e Jiang em 1996.

Valente (2005) cita que a Média Ponderada Ordenada diferencia-se da Combinação Linear Ponderada, principalmente pela presença de um segundo grupo de pesos, denominados de ordenação. Os pesos de fatores utilizados no método Combinação Linear Ponderada passam, nesse método, a ser nomeados de pesos de compensação.

Eastman (2003) coloca que os pesos de ordenação são aplicados pixel-a-pixel a escores de fatores, determinado pelo ranqueamento desses fatores em cada posição (pixel). O peso de ordenação 1 (um) é atribuído ao fator de menor ranqueamento para esse pixel (fator com menor escore), peso de ordenação 2 (dois) para o próximo fator melhor ranqueado e assim por diante.

É explanado por Malczewski (2004) que o método Booleano caracteriza-se por ser um método de extremos em que as soluções são apresentadas como totalmente aversas a risco (operador de intersecção AND) ou totalmente arriscadas (operador de união OR), enquanto que pelo fato de ser baseado em médias, o método da Média Ponderada Ordenada tem a flexibilidade de assumir soluções em qualquer ponto, entre esses extremos, no espaço de estratégia de decisão (Figura 3). Os pontos de ordenação é que determinarão essa posição entre os extremos, ou seja, o risco assumido no processo de tomada de decisão.

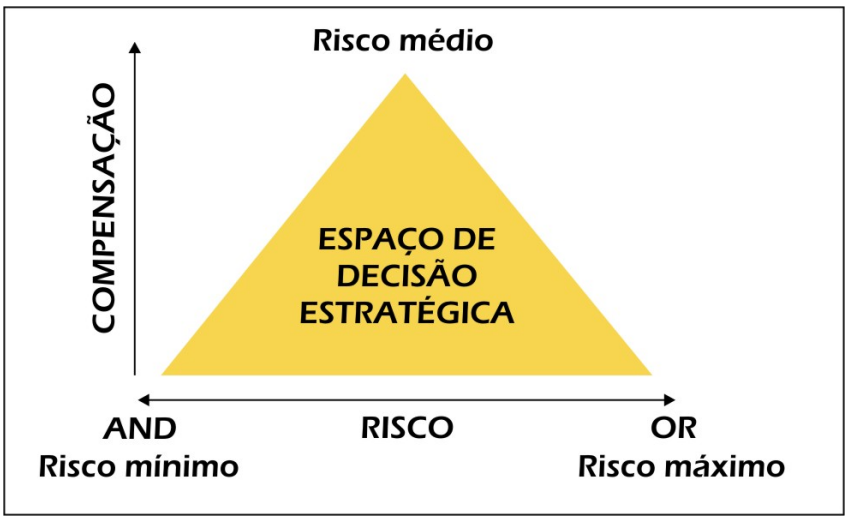


Figura 3 - Espaço de estratégia para a tomada de decisão. Fonte: Eastman (2003)

Através do método MPO é possível variar os pesos de ordenação, desde que a somatória dos mesmos seja igual a um. Assim, este método possibilita implementar uma infinidade de opções de agregação. Os deslocamento dos pesos de ordenação no sentido do mínimo ou do máximo controla o risco assumido (ANDness) e a homogeneidade de distribuição dos pesos de ordenação pelas posições controla a compensação (*tradeoff*) (CALIJURI et al., 2002). O resultado apresentado por este método é a existência de um espaço estratégico de decisão triangular, definido por um eixo correspondente ao risco e por outro eixo correspondente a compensação, como pode ser observado na Figura 3.

A forma com que o nível de risco assumido e a compensação são calculados está demonstrada no item 3.2.5.

2.4.5 Análise de sensibilidade

A abordagem multicritérios de tomada de decisão acarreta a apresentação de resultados que são diretamente associados a uma variedade de incertezas, causadas pelo estabelecimentos dos fatores, pesos e prioridades (VOODG, 1983, apud VALENTE, 2005). A autora ainda coloca que as incertezas podem ser identificadas e avaliadas por uma análise de sensibilidade, que possibilita analisar a qualidade das soluções obtidas no processo de tomada de decisão.

Store e Kangas (2001) discutem que a análise de sensibilidade possibilita uma avaliação da influência de diferentes critérios e pesos no padrão de distribuição espacial.

A análise de sensibilidade deve ser utilizada como parte importante do processo decisório, na qual o tomador de decisão aprofunda-se no entendimento do problema e entende como os elementos que compõem no processo se interagem, possibilitando, ainda, analisar quais elementos são importantes e quais são dispensáveis para o problema analisado.

2.5 Ciência da informação

Os processos decisórios estão fundamentados em métodos com que dados de entrada são manipulados para serem transformados em informações, que subsidiam as decisões tomadas. Pela importância que a informação representa em um processo decisório, o trabalho apresenta este item que trata especificamente da informação.

Segundo Araújo (1995) a palavra informação vem do latim *informare*: dar forma, pôr em forma ou aparência, criar, mas, também, representar, apresentar, criar uma idéia ou noção, algo que é colocado em forma, em ordem.

Em 1995, o autor já salientava a importância da informação, dando esta como indispensável para toda e qualquer atividade humana, e afirmando esta conotação através da apresentação de expressões que surgiam, como: sociedade da informação, explosão da informação, era da informação, indústria da informação, revolução da informação, sociedade pós-sociedade da informação.

A informação tem papel fundamental nos processos de tomada de decisão, independentemente da área em que a mesma será tomada. Moura (2005) afirma que nos dias atuais é enorme a quantidade de dados existentes e disponíveis nos formatos analógicos e digitais. Transformar essa enormidade de dados em informações de qualidade exige do pesquisador ou administrador uma boa base conceitual e metodológica, para organizá-los e tratá-los, para que os produtos gerados a partir deles sirvam de subsídios nos processos de decisão.

A Ciência da Informação (CI) nasceu com o compromisso de equacionar um problema que, basicamente, “é a tarefa massiva de tornar mais acessível um acervo crescente de conhecimento". Esse compromisso é tão moderno nos dias de hoje como era quando foi definido por Bush (1945).

Segundo Borko (1968), Ciência da Informação é a disciplina que investiga as propriedades e o comportamento da informação, as forças que governam seu fluxo e os meios de processá-la para otimizar sua acessibilidade e uso.

Saracevic (1996) aborda várias áreas em que a Ciência da Informação pode ser contextualizada, e cito duas destas áreas, que são complementares no papel de atingir, como proposto por Bush (1945), a finalidade da existência da CI.

A primeira é a área da Ciência da Computação, sendo que a base da relação entre Ciência da Informação e Ciência da Computação consiste na utilização dos recursos computacionais na recuperação da informação e nos produtos, serviços e redes associados. A Ciência da Computação cuida dos algoritmos que transformam informações, enquanto a Ciência da Informação trata da natureza da informação e sua comunicação para uso das pessoas. Ciência da Computação e Ciência da Informação não competem entre si, muito pelo contrário, são complementares em seus objetivos.

A segunda trata da relação entre a Ciência da Informação e a Comunicação, onde é abordado o fato de que a informação como fenômeno e a comunicação como processo devem ser estudadas em conjunto, em um uso compartilhado para a comunicação humana.

Segundo Saracevic (1996) são três as questões que constituem a razão da existência e da evolução da Ciência da Informação. A primeira é o fato de sua natureza ser interdisciplinar. A segunda é o fato de estar diretamente ligada à tecnologia da informação. O imperativo tecnológico está impondo transformações da sociedade moderna em sociedade da informação. Terceira, a Ciência da Informação teve e tem um importante papel a desempenhar, por sua forte dimensão social e humana, que ultrapassa a tecnologia.

A necessidade de recuperar informações promoveu pesquisas sobre os fenômenos, metodologias e variáveis, bem como das causas, efeitos, comportamentos

e manifestações relacionados ao processo. Isto, segundo Saracevic (1996), conduziu a estudos, dentre outros, sobre:

- ✓ A natureza da informação, a estrutura do conhecimento e seus registros, o uso e os usuários, levando a estudos do comportamento humano frente à informação;
- ✓ A interação homem-computador, com ênfase no lado humano da equação;
- ✓ Relevância, utilidade, obsolescência e outros atributos do uso da informação juntamente com medidas e métodos de avaliação dos sistemas de recuperação da informação; e
- ✓ Economia, impacto e valor da informação.

Os sistemas de recuperação de informação devem ser desenvolvidos e estar preparados para a operacionalização de tal forma a atender as concepções propostas por Mooers (1951 apud SARACEVIC, 1996):

- ✓ Como descrever intelectualmente a informação?
- ✓ Como especificar intelectualmente a busca?
- ✓ Que sistemas, técnicas ou máquinas devem ser empregadas?

Para Wilson e Droste (2000) avaliações integradas com dados de fontes, formatos e tipos diferentes, levam a uma reavaliação dos instrumentos de Tecnologia da Informação, projetados para dar suporte a processos de gerenciamento.

2.5.1 Dados e informações

Araújo (1995) apresenta a diferença entre o que ela chama de “conjunto de mensagens” e “informações”. Para a autora, estruturas semióticas, como, por exemplo, textos (livros, periódicos etc.) mapas, partituras, programas de computador, dentre outros, são conjuntos de mensagens que só se transformam em informação quando, ao serem comunicados, alteram a estrutura cognitiva de um organismo.

Um administrador eficiente, independente da área de atuação, deve entender que a informação é um dos recursos mais importantes e valiosos da organização e que, em hipótese alguma, dados devem ser confundidos com informações.

Stair (1996) afirma que dados são fatos em sua forma primária, como exemplo, o nome de um rio, capacidade de vazão ou ainda a carga de sedimentos. Eles podem ser de vários tipos e representam as coisas do mundo real. Quando estes fatos estão organizados de maneira significativa, com regras e relações bem estabelecidas, eles se tornam informações úteis e valiosas. Ainda segundo o mesmo autor, informação é um conjunto de dados organizados de tal forma que adquirem valor adicional além do valor do fato em si.

A transformação de dados em informações passa por processos com tarefas logicamente organizadas e executadas, desde a obtenção dos dados primários, passando pela manipulação e organização e finalizando na geração de informações, que podem ser fim ou ainda servirem como dados primários de outros processos.

É com esta abordagem que o FGest, um *software* desenvolvido para interface com SIG e uso de avaliação multicritérios em dados espaciais, deve ser visto como meio de se alcançar a atividade fim, que é o planejamento e gestão de bacias hidrográficas.

2.5.2 Sistema de informação

Dentre outras definições, pode-se dizer que um sistema é um conjunto de elementos em inter-relação entre si e com o ambiente em que está inserido, interagindo para atingir determinados objetivos. Os sistemas têm entradas, mecanismos de processamento e saídas. Devem ainda considerar o uso de *feedback*.

Sistemas de informação são ferramentas computacionais que, em uma descrição mais genérica, propiciam a realização de processos de entrada, transformação, armazenamento, recuperação e comunicação de dados e informações. Araújo (1995) menciona que tais sistemas constituem a “memória humana registrada”, sendo que os documentos, nesses sistemas, contêm informação potencial e são formalmente

organizados, processados e recuperados com a finalidade de maximizar o uso da informação.

Em se tratando de sistemas de informação, o marco da recuperação de informação e da consolidação de Sistemas de Recuperação de Informação como entidades é, em geral, datado das décadas de 40 e 50 (ARAÚJO, 1995). Porém, o termo recuperação da informação (*information retrieval*) foi cunhado por Calvin Mooers, no início da década de 50, enquanto ele estava trabalhando em sua dissertação de mestrado no Massachusetts Institute of Technology (GARFIELD, 1997; CBI, 1992). Araújo (1995) coloca que tal marco é caracterizado pela necessidade de armazenar e dar acesso rápido e preciso ao grande número de documentos que vinha tendo crescimento exponencial desde o século XVII e que, com o advento do computador, estava sendo visto como a grande solução para os problemas de armazenamento e recuperação da informação.

Bezerra (2007) define sistema de informação como uma combinação de pessoas, dados, processos, interfaces, redes de comunicação e tecnologia que interagem com objetivo de dar suporte e melhorar os processos das organizações.

Segundo Stair (1996), um sistema de informação é uma série de elementos inter-relacionados que coletam (entrada), manipulam e armazenam (processo), disseminam (saída) os dados e informações e fornecem um mecanismo de *feedback*.

A entrada é a atividade de captar e juntar os dados primários. É fundamental que se tenha controle de qualidade, tanto no processo de entrada dos dados quanto nas fontes que originam os mesmos. O processamento, através de operações lógico-aritméticas, envolve a conversão ou transformação dos dados em saídas úteis ou em armazenamento. A saída envolve a produção de informações úteis, geralmente na forma de documentos, relatórios ou dados de transações.

O modelo proposto para utilização do FGest (Figura 4) é de que os dados de entrada são mapas oriundos de SIGs, enquanto o processamento consiste manipulação dos mesmos para avaliação multicritérios. Os produtos gerados pelo processamento são mapas de adequação, que são exportados para os SIGs.

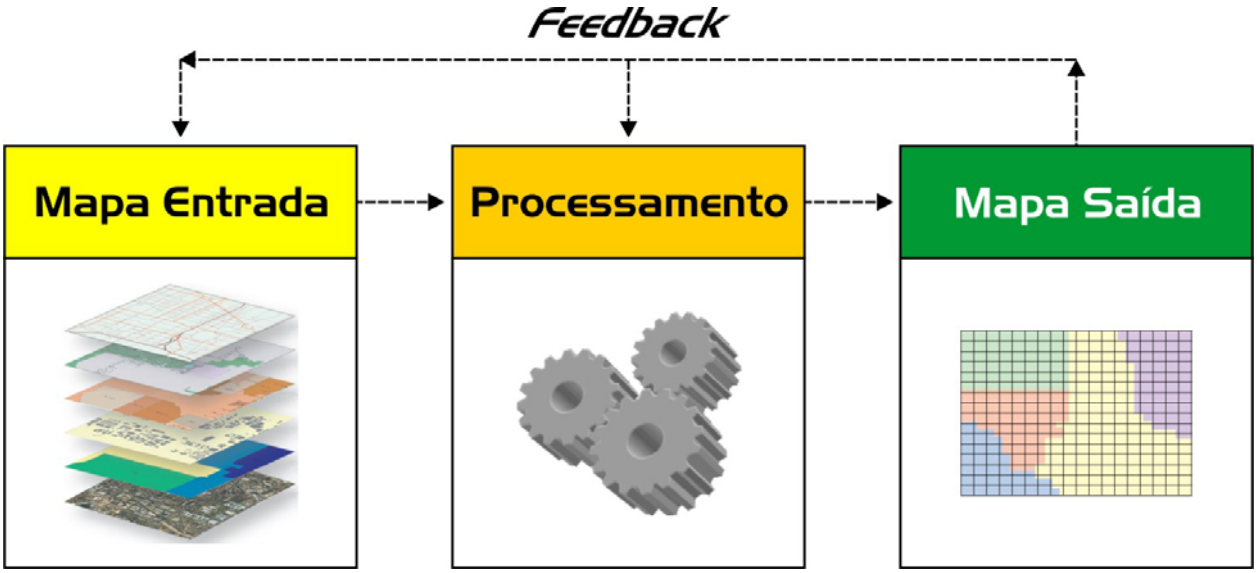


Figura 4 - Modelo de utilização do FGest

2.5.3 Projeto de sistemas de informação

O desenvolvimento de sistemas de informação envolve diversas fases, e ao encadeamento específico destas fases para a construção de sistemas dá-se o nome de Modelo de Ciclo de Vida (Figura 5).

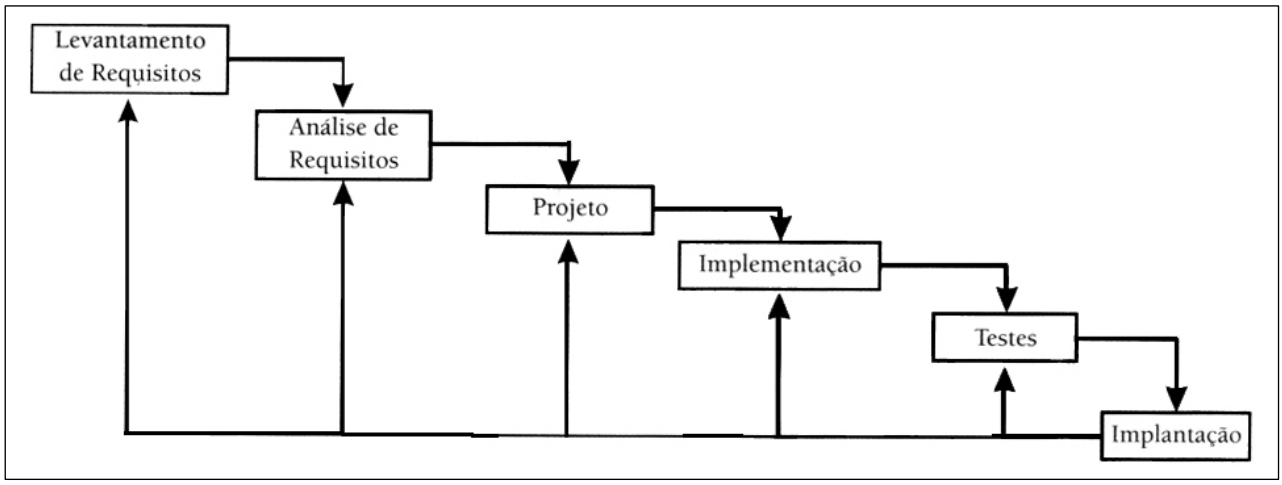


Figura 5 - Abordagem de desenvolvimento de sistemas em cascata. Fonte: Bezerra (2007)

2.5.3.1 Levantamento de requisitos

Wazlawick (2004) diz que o levantamento e análise de requisitos é fundamental para o desenvolvimento de sistemas, por tratar justamente de descobrir o que o usuário quer com o sistema.

Para Bezerra (2007) e Wazlawick (2004) a atividade de levantamento e análise de requisitos está ligada à etapa de compreensão do problema aplicado ao desenvolvimento do *software*, já que nesta fase tentam-se descobrir quais são as operações que o sistema deve realizar e quais as restrições que existem sobre elas.

Bezerra (2007) continua discorrendo sobre o assunto, dizendo que um requisito é uma condição ou capacidade que deve ser alcançada ou possuída por um sistema ou componente deste. Os requisitos podem ser funcionais, não-funcionais ou normativos.

As operações que o sistema deve realizar são chamadas de requisitos funcionais e definem as funcionalidades do sistema. As restrições sobre estas funções são conhecidas como requisitos não-funcionais e declaram as características de qualidade que o sistema deve possuir e que estão relacionadas às suas funcionalidades (ex.: confiabilidade, desempenho, segurança). Já os normativos declaram as restrições impostas sobre o desenvolvimento do sistema (ex.: custo, prazo, plataforma tecnológica).

2.5.3.2 Análise

Bezerra (2007) menciona que o termo análise corresponde a “quebrar” um sistema em seus componentes e estudar como tais componentes interagem, com objetivo de entender como esse sistema funciona.

DeMarco (1989) define análise como sendo o estudo de um problema, que antecede a execução de uma ação. No domínio de desenvolvimento de sistemas computacionais, refere-se ao estudo de uma área de trabalho ou aplicação, que leva a manutenção de um sistema existente ou ao desenvolvimento de um novo sistema.

Wazlawick (2004) mostra que a fase da análise é importantíssima, porque ninguém é capaz de entender com perfeição um problema de sistema de informação na

primeira vez que o olha. Para o autor o resultado desta fase é o enunciado do problema e o projeto será a sua solução.

Dentre as atividades pertinentes à análise de sistemas está o estudo da viabilidade, que consiste em avaliar se a proposta do sistema que está sendo especificado pode ser implementada dentro de um conjunto de determinadas restrições, como tempo, custo, material computacional e humano.

2.5.3.3 Projeto

Segundo Wazlawick (2004) a fase de projeto enfatiza a proposta de uma solução que atenda aos requisitos da análise, e como a análise é uma investigação que procura descobrir detalhadamente o que o usuário quer, o projeto consiste em propor uma solução com base no conhecimento adquirido na análise.

Nesta fase determina-se “como” o sistema funcionará para atender os requisitos, de acordo com os recursos tecnológicos existentes, e isto ocorre através da modelagem do sistema, utilizando ferramentas conceituais e aplicativas para elaboração de diagramas.

2.5.3.4 Implementação

Nesta fase, o sistema é codificado, ou seja, utilizando-se linguagem de programação desenvolvem-se códigos que atendam as solicitações da fase de projeto e transformam-nas em linguagem de máquina, apropriadas aos computadores. Wazlawick (2004) afirma que cabe ao programador dominar as características específicas das linguagens, ferramentas, *frameworks* e estruturas de dados para montar o código aos requisitos necessários.

2.5.3.5 Testes

Diversas atividades de teste são realizadas para verificação do sistema construído, levando-se em contas as especificações realizadas no projeto. Wazlawick (2004) completa dizendo que esta fase envolve testes para verificar se os componentes

gerados atendem as especificações do projetista do *software* e testes de caso de uso, que visam verificar a adequação do sistema aos requisitos inicialmente levantados.

2.5.3.6 Implantação

O sistema é instalado no ambiente em que estará operando. Nesta fase também pode ocorrer a migração de dados pré-existentes.

2.5.4 Modelagem de sistemas de informação

Na construção de sistemas é necessário um planejamento inicial, que Bezerra (2007) compara com o projeto de plantas de engenharia civil para a construção de uma obra. Esta necessidade leva ao conceito de modelo, fundamental no desenvolvimento de sistemas. Uma forma de elaborar esses modelos é por meio da utilização da Unified Modeling Language - UML, que é uma linguagem visual, com elementos gráficos que permitem a modelagem de sistemas. Os elementos gráficos definidos nesta linguagem permitem a construção de diagramas que representam diversas perspectivas de um sistema.

Pressman (1995) afirma que modelos são criados para obter uma melhor compreensão da entidade real a ser construída. Quando a entidade é física (ex. prédio ou máquina) é possível construir um modelo que seja idêntico em forma e aparência, mas em escala menor. Porém, se a entidade for um *software*, o modelo assume forma diferente, devendo ser capaz de modelar a informação a ser transformada, assim como as funções que irão realizar essa transformação, além do comportamento do sistema quando a transformação está se desenvolvendo.

Wazlawick (2004) coloca que é importante, quando um *software* está sendo desenvolvido, que ele tenha estrutura fácil de ser entendida, que seja autodocumentado e que possa ser compreendido em nível macro ou em detalhes.

2.5.4.1 Modelo de casos de uso

O modelo de casos de uso possibilita uma representação das funcionalidades externamente observáveis do sistema e dos elementos externos ao sistema que

interagem com ele. Bezerra (2007) afirma que casos de uso é um modelo de análise que representa um refinamento dos requisitos funcionais do sistema e através da UML é possível gerar o diagrama de casos de uso.

Por definição o *Use Case* (denominação em inglês) é a especificação de uma seqüência completa entre um sistema e um ou mais agentes externos a esse sistema. O caso de uso representa o relato de uso de certa funcionalidade do sistema sem revelar a estrutura ou comportamento interno do referido sistema. Bezerra (2007) enfatiza a importância do caso de uso, pois possibilita a um observador saber quais as funcionalidades fornecidas pelo sistema e quais são os resultados externos produzidos pelas mesmas. Num diagrama de casos de uso, além deles aparecem também os atores, que são qualquer elemento externo ao sistema e que trocam informações com o sistema, e os relacionamentos, que possibilitam o relacionamento entre os atores e os casos de uso representados no diagrama.

2.5.4.2 Diagrama de fluxo de dados

Conhecer como os dados entram em um sistema e quando e onde são transformados é primordial para o entendimento do funcionamento de um sistema de informação. Uma maneira de facilitar esta tarefa é pela utilização, em análise estruturada de sistemas, do Diagrama de Fluxo de Dados - DFD, que é uma forma gráfica de representar os dados armazenados, o fluxo dos mesmos e os processos onde eles são transformados. Neste diagrama também são representadas as entidades externas, que produzem ou recebem dados do sistema. Gane e Sarson (1983) afirmam que o DFD é uma das principais ferramentas lógicas para entendimento e manipulação de sistema de informação de qualquer complexidade. Os elementos e respectivos símbolos gráficos utilizado em DFD são:

Entidades externas. Um quadrado representa as entidades externas, que podem ser pessoas, departamentos, softwares dentre outros, usados como fonte ou destino de dados;

Fluxo de Dados. O fluxo de dados é simbolizado por meio de uma seta, preferencialmente colocada na vertical e na horizontal, com a ponta indicando a direção do fluxo;

Processo. Representado por um retângulo, em pé, com cantos arredondados, os processos são responsáveis pelas transformações dos dados. É importante identificar cada processo e colocar uma breve descrição de sua função;

Depósito de dados. São representados por um par de linhas horizontais paralelas, ligadas em uma extremidade. Não é considerado no DFD o aspecto físico com que os dados serão armazenados.

3 MATERIAL E MÉTODO

Utilizando o ambiente de desenvolvimento da linguagem C#, foi desenvolvido o software FGest que faz uso de mapas *raster* em avaliações multicritérios utilizando os métodos CLP e MPO. Este software tem comunicação com os SIGs Spring e ArcGIS, responsáveis por fornecer os mapas de fatores e critérios e pela visualização dos produtos gerados nas avaliações multicritérios. Fez parte do processo de desenvolvimento do FGest a etapa de validação do mesmo, e para isto, foram gerados mapas de áreas prioritárias à restauração florestal, na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos. Os resultados obtidos foram comparados com aplicações similares para avaliar a qualidade dos mapas de áreas prioritárias.

A maior parte dos usuários de sistemas de informação, ao fazer uso de *software*, desconhece as atividades que estiveram por trás da criação e desenvolvimento do mesmo. Estas atividades, divididas em fases, iniciando-se na fase de concepção e culminando na implantação e operacionalização do *software*, necessitam de ferramentas conceituais e computacionais para serem executadas, dentre elas, *software*s que fazem uso da UML, para a análise e projeto do sistema, linguagens de programação, para a codificação do sistema e posterior transformação em linguagem de máquina, e sistemas gerenciais de banco de dados, para armazenar os dados processados pelo sistema.

3.1 Linguagem de programação C#

C# é a linguagem de programação bastante utilizada para o desenvolvimento de aplicações na plataforma .NET, sendo considerada uma das mais importantes nos dias de hoje. É uma linguagem orientada a objetos, que possibilita eficiência no desenvolvimento de programas com características modernas. Além disso, C# é uma linguagem com uma sintaxe semelhante às linguagens C, C++ e ao Java, o que confere a ela, potencialidade para estar entre as linguagens mais populares.

A versão utilizada foi a Microsoft Visual C# 2005 Express Edition, *freeware* que foi obtida no site http://msdn2.microsoft.com/pt-br/express/aa700756.aspx.

O fato da C# ser uma linguagem nativa para .NET Common Language Runtime - CLR, que é o mecanismo de execução da plataforma .NET, possibilita a convivência com várias outras linguagens especificadas pela Common Language Subset -CLS, o que garante portabilidade (MICROSOFT, 2007).

.NET Common Language Runtime é um ambiente baseado em componentes, e C# é desenhado para facilitar a criação de componentes, onde os conceitos de componentes, como propriedades, métodos, eventos e atributos, são fortemente aplicados.

3.2 FGest

O FGest é um *software* desenvolvido neste projeto de pesquisa para auxiliar em processos decisórios que envolvam questões ambientais com necessidades de espacialização dos dados. Este *software* utiliza técnicas de avaliação multicritérios baseadas em Processo Hierárquico Analítico, Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada. Para tanto, o tomador de decisão precisa:

- ✓ Estabelecer a estrutura hierárquica;
- ✓ Estabelecer modelo e estratégia de decisão em função de pesquisa a especialistas;
- ✓ Estabelecer as restrições de análise;
- ✓ Normalizar os fatores; e
- ✓ Ponderar os fatores;
- ✓ Gerar os resultados aplicando agregação dos critérios.

O FGest utiliza como fonte de dados mapas no formato *raster* (matricial) produzidos em Sistemas de Informações Geográficas. A princípio, foi desenvolvida interface de comunicação com o ArcGIS e com o Spring. O modelo de comunicação e processamento dos dados pode ser visualizado na Figura 6.

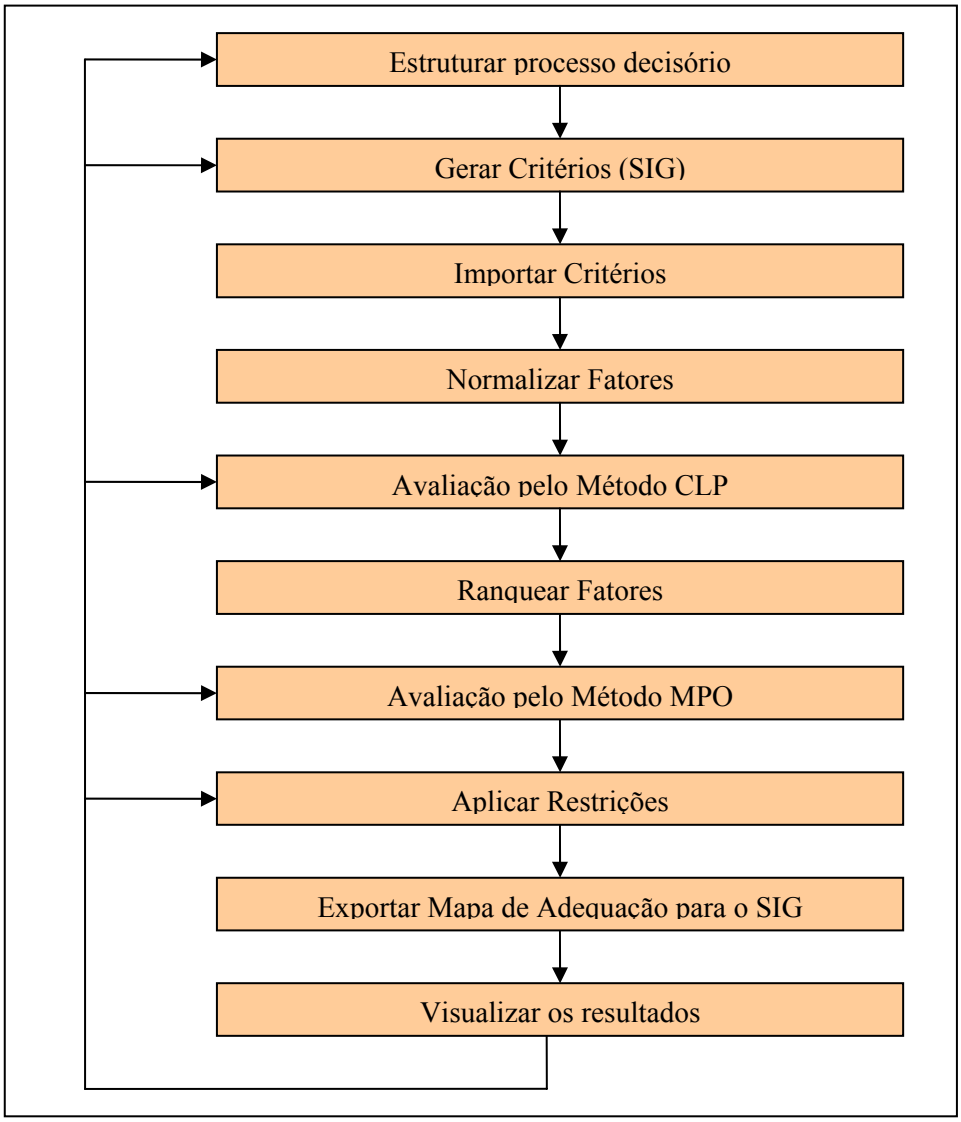


Figura 6 - Modelo de integração entre SIG e o FGest

Como discutido anteriormente, a questão básica da avaliação multicritérios é a preocupação em como combinar informações de vários critérios para gerar um único resultado, após realizar o processo de avaliação. No caso de usar restrições booleanas o resultado é conseqüência da união (OR) ou intersecção (AND) entre as condições avaliadas. Por outro lado, para os fatores de natureza contínua, utilizar uma combinação linear ponderada é a melhor alternativa. Neste caso, os fatores são combinados através da aplicação de pesos a cada um deles, seguido pela somatória destes resultados para gerar um mapa de adequação, representado na eq. (1).

$$S = \sum w_i x_i \tag{1}$$

sendo que: S é a adequação

w_i corresponde ao peso do fator $_i$

x_i corresponde ao *score* do fator $_i$

Em casos onde restrições booleanas são utilizadas, o procedimento deve ser modificado multiplicando-se a adequação calculada a partir dos fatores pelo produto das restrições, como mostra a eq. (2).

$$S = \sum w_i x_i * \prod c_j \tag{2}$$

sendo que: c_j corresponde ao score da restrição $_j$

Π corresponde ao produto

Parte importante no processo de avaliação multicritérios é a normalização dos *scores* dos critérios, assim como da atribuição ou cálculo dos pesos para os respectivos critérios, que serão discutidos nos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3 deste trabalho.

Para combinação dos fatores para avaliação multicritérios no FGest, dois procedimentos de agregação foram considerados, o Combinação Linear Ponderada (CLP) e o Média Ponderada Ordenada (MPO).

No caso de agregação pelo método CLP ocorre a compensação total entre os fatores, através da aplicação de pesos ponderados, gerando risco assumido médio. Neste método, as células dos mapas fatores são combinadas aplicando um peso para cada uma delas, seguido pela adição dos resultados para produzir um mapa final de adequabilidade. A principal característica deste método é o fato de permitir compensação entre os fatores, de tal forma que uma baixa adequabilidade em um fator pode ser compensada por boa adequabilidade em outros fatores.

Já a agregação pelo método MPO permite a compensação entre os fatores pela aplicação de pesos ponderados (pesos de compensação), assim como no método CLP, e também possibilita controle do nível do risco assumido na análise e o grau de

compensação entre os fatores, através da aplicação de um segundo conjunto de pesos (pesos de ordenação). O risco assumido depende da posição dos pesos de ordenação em um *ranking* do maior para o menor e de seus valores. Valores maiores nas primeiras posições representam menor risco, enquanto que valores maiores nas últimas posições representam maior risco.

No processo de avaliação do FGest cada critério deve possuir armazenado um mapa *raster* de i linhas e j colunas, correspondente à representação espacial da área de estudo. O cruzamento entre uma linha e uma coluna do mapa é tratado por célula e possui um valor que quantifica o critério dentro da área espacial correspondente à mesma. A resolução espacial está diretamente ligada ao tamanho da célula. As restrições devem conter em suas células valores 0 (zero) para área a ser desconsiderada no processo de avaliação e 1 (um) para área a ser considerada apta para ser avaliada.

3.2.1 Padronização ou normalização de atributos

O Princípio da Incompatibilidade pode ser entendido de tal forma que “Conforme a complexidade de um sistema aumenta, a nossa habilidade de fazer declarações precisas e significativas sobre o comportamento do sistema diminui, até alcançar um limite além do qual precisão e relevância se tornam características mutuamente exclusivas” (LOFTI ZADEH *apud* VELLASCO, 2008). A lógica Fuzzy é a ciência que se preocupa com os princípios formais do raciocínio aproximado, procurando modelar os modos imprecisos do raciocínio que têm um papel fundamental na habilidade humana de tomar decisões (VELLASCO, 2008).

O processo de normalização é idêntico ao processo introduzido pela lógica *Fuzzy*, segundo o qual um conjunto de valores expressos numa dada escala é convertido em outro comparável, expresso numa escala normalizada. O conjunto *Fuzzy* é definido a partir de um domínio contínuo, que após normalização apresenta graus de pertinência variando de 0 a 1 ou 0 a 255. Na teoria da lógica *Fuzzy* a pertinência de um dado fenômeno é relativa, o que auxilia a subjetividade na escolha e aumenta o raciocínio no processo de decisão (CALIJURI et al., 2002).

Chen et al. (2001), comentam que a normalização apresenta como grande benefícios a representação contínua da paisagem e a possibilidade dos fatores receberem pesos, de acordo com a importância que possuem para o objetivo do trabalho

Com a possibilidade de utilizar vários critérios em um processo de avaliação multicritérios, a combinação dos mesmos pode ficar prejudicada se os fatores estiverem com *scores* mensurados em diferentes escalas de valores. Para resolver esta questão, é necessário, antes da combinação, que todos os mapas estejam padronizados de tal forma que possam ser correlacionados. Para tanto, os *scores* mínimo e máximo encontrados em cada mapa fator são redefinidos em uma escala linear de pertinência, como exemplo, 0 para o mínimo e 255 para o máximo. Os *scores* intermediários encontrados no mapa fator também são redefinidos para se adequarem respectivamente entre 0 e 255. No FGest, a padronização dos fatores é realizada por um algoritmo que desenvolve a execução correspondente à eq. (3).

$$x_{ij} = (R_{ij} - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}) * Valor_Padronização \qquad (3)$$

sendo que: x_{ij} corresponde ao *score* padronizado da posição $_{ij}$ do mapa

R_{ij} corresponde ao score original da posição $_{ij}$ do mapa

R_{min} corresponde ao menor score original encontrado no mapa

R_{max} corresponde ao maior score original encontrado no mapa

Valor_Padronização corresponde ao tamanho da faixa de valores padronizados

Um ponto importante no processo de padronização dos *scores* dos fatores é a escolha da faixa de valores que será utilizada nesta operação. Na equação acima, o elemento Valor_Padronização determina o limite máximo da faixa de valores, sendo que o limite mínimo é 0 (zero). Por exemplo, para padronização linear (0 a 255) de um mapa de erosividade da chuva de uma determinada bacia hidrográfica, pode-se estabelecer que o *score* 6.000 MJ.mm(ha.h.ano)$^{-1}$ deve ser considerado o valor mínimo

da faixa de valores, enquanto que o *score* 9.000 MJ.mm(ha.h.ano)$^{-1}$ será considerado o valor máximo. Assim, valores intermediários de *score*, como 6.725, 7.500, e 8.225 MJ.mm(ha.h.ano)$^{-1}$ são padronizados respectivamente com valores 64, 128 e 192.

Para a padronização dos critérios podem ser utilizadas várias funções, dentre elas a *Sigmoidal, J-Shape e Linear.* No módulo de padronização do FGest, foi utilizada a função Linear, possibilitando ao usuário estabelecer o grau de pertinência entre 0 e 1 ou entre 0 e 255.

Todo critério a ser normalizado deve estar representado por um mapa *raster* de i linhas e j colunas com determinada resolução espacial.

No ambiente da abordagem multicritérios é comum denominar de normalização a etapa de padronização dos fatores.

3.2.2 Peso de compensação

Os pesos de compensação expressam a importância, ou ordem de importância, dos fatores no processo de tomada de decisão, e devem ser determinados a partir de estudos na literatura existente, por experiências em aplicações já realizadas ou, ainda, através da Técnica Participatória. Em trabalhos estudados por Valente (2005), vários autores propõem o emprego da Técnica Participatória, que consiste na reunião entre especialistas nas diferentes áreas de interesse ao projeto, para auxiliar na definição dos critérios (fatores) e dos respectivos pesos.

A atribuição de pesos aos critérios consiste em definir a quantificação da importância de cada um deles no processo de decisão. Vários métodos foram desenvolvidos para auxiliar a definição dos pesos de compensação dos fatores, dentre eles o da ordenação, da escala de pontos, da distribuição de pontos e o método baseado na comparação de critérios dois-a-dois (RAMOS e MENDES, 2001). Valente (2005) comenta que o mais promissor e utilizado é o método da Comparação Pareada, desenvolvido por Saaty (1977) no contexto do Processo Hierárquico Analítico e adaptado por Rao et al, (1991), para pela primeira vez ser utilizado em um SIG.

Fazer comparações simultâneas entre critérios pode se tornar uma tarefa em que a dificuldade aumenta diretamente proporcional ao aumento do número de critérios envolvidos no processo. Uma maneira de facilitar este processo é restringir as

comparações sempre a dois critérios e desenvolver quantas comparações for necessário para contemplar todos os critérios existentes. Estas comparações podem ser organizadas em uma tabela de comparações, o que possibilita uma organização estruturada do processo. Este é o Método da Comparação Pareada, que é baseado na elaboração de uma matriz de comparação entre os fatores, de acordo com a importância relativa entre pares de fatores.

Para a elaboração de uma matriz de comparação (Quadro 2), os valores atribuídos aos fatores são derivados de uma escala contínua de nove pontos (Figura 7), sendo que os fatores são comparados entre si, dois a dois, e classificados segundo a importância relativa entre eles (EASTMAN, 2003).

	Adequação do uso do solo	Erodibilidade do solo	Erosividade da chuva	Proximidade à malha viária	Proximidade à rede hidrográfica
Adequação do uso do solo	1				
Erodibilidade do solo	1	1			
Erosividade da chuva	1/5	1/5	1		
Proximidade à malha viária	2	1/3	3	1	
Proximidade à rede hidrográfica	3	2	7	3	1

Quadro 2 - Exemplo de uma matriz de comparação pareada

Figura 7 - Escala contínua de nove pontos usada na comparação pareada entre fatores, na Avaliação Multicritérios. Fonte: Eastman (2003)

A matriz de comparação é simétrica e apenas a parte correspondente ao triângulo inferior da matriz precisa ser preenchida. As demais células da matriz são recíprocas das células da metade inferior.

Valente (2005) cita que a coerência dessa matriz é avaliada por sua Taxa de Consistência (TC) ou Consistency Ratio (CR), que indica a probabilidade de que os valores de comparação entre os fatores tenham sido gerados aleatoriamente. Os valores de TC devem estar sempre abaixo de 0,10 e, no caso de estarem acima, é sugerido que se reorganize a matriz, alterando os valores de comparação entre os fatores.

No FGest, o processo desenvolvido para o método de comparação pareada se baseia numa matriz M (Figura 8), de ordem n de comparação entre os n fatores em análise, onde as linhas (i) e colunas (j) correspondem aos fatores, colocados na mesma ordem para coluna e linha, ou seja, o primeiro fator na linha é o primeiro na coluna, o segundo na linha é o segundo na coluna e assim sucessivamente. O tomador de decisão deve alimentar a matriz com valores de tal forma que o valor Mij da matriz representa a importância relativa do fator i comparado com o fator j, sendo que se Mij = x então Mji= 1/ x e os elementos da diagonal têm sempre valor igual a 1. Em função dos graus de importância relativa informadas pelo usuário do FGest, são calculados os pesos relativos e a Taxa de Consistência, que indica inconsistências ocorridas durante o processo de comparação pareada.

	Ordem	Peso	Critério	1	2	3	4	5
	1	0,1570	C:\BaseDados\AdequacaoUso.txt	1				
	2	0,2425	C:\BaseDados\Erodibilidade.txt	1	1			
	3	0,0440	C:\BaseDados\Erosividade.txt	1/5	1/5	1		
	4	0,1541	C:\BaseDados\Prox_MalhaViaria.txt	2	1/3	3	1	
	5	0,4024	C:\BaseDados\Prox_RedeHidrografica.txt	3	2	7	3	1
*								

Figura 8 - Matriz de comparação pareada no FGest

Os algoritmos de avaliação CLP e MPO do FGest fazem uso de mapas *raster* de restrições e de fatores como dados de entrada. Estes mapas são preparados e carregados na memória do computador na forma de uma matriz tridimensional. A dimensão x da matriz corresponde às linhas dos mapas *raster*, enquanto que a dimensão y corresponde às colunas. Já a dimensão z mostra os critérios que são usados na avaliação.

A Figura 9 mostra como fica representada a matriz tridimensional que está armazenando critérios no formato *raster* de i linhas e j colunas. Entre os critérios estão um mapa de restrições e os mapas fatores adequação ao uso das terras, erodibilidade do solo, erosividade da chuva, proximidade à malha viária e, por último, a proximidade à rede hidrográfica.

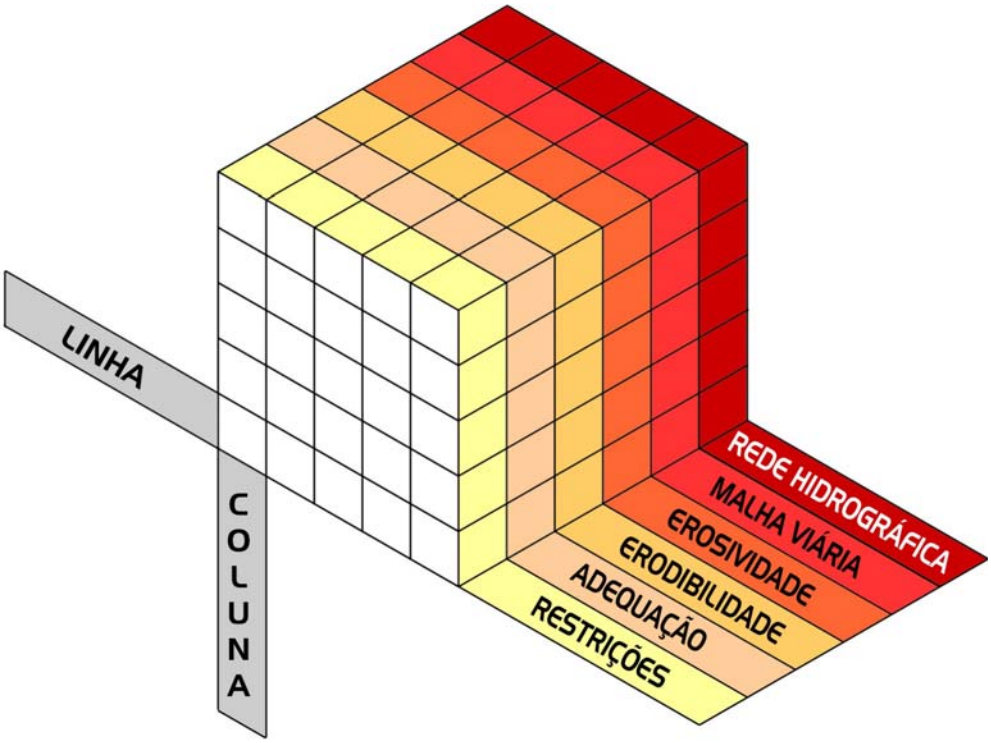


Figura 9 - Matriz tridimensional que armazena critérios no formato *raster*, para uso processo de avaliação multicritérios

3.2.2.1 Cálculo do peso de compensação

Para obtenção dos pesos de compensação dos fatores através da matriz de comparação pareada, após a entrada dos valores de importância relativa de cada critério, o FGest realiza a validação dos dados entrados, calcula o autovetor (*eigenvector)* principal e, então, calcula o peso relativo de cada critério. Também é calculada a Taxa de Consistência, que possibilita avaliar se os valores de importância relativa informados na matriz pareada estão aceitáveis.

Após a matriz de comparação pareada estar carregada com os valores que representam as importâncias relativas entre os fatores, deve ser calculado o autovetor principal. O autovetor principal é utilizado para gerar o melhor conjunto de pesos de compensação para os fatores da matriz de comparação pareada.

Primeiramente, para uma coluna somam-se todos os valores de seus respectivos elementos e divide-se em seguida cada elemento pela soma calculada. Este procedimento deve ser repetido para todas as colunas da matriz de comparação pareada. A matriz que resulta deste processo é chamada de matriz normalizada e seus elementos são calculados por:

$$A' = \left[a'_{ij}\right] \quad \text{sendo} \quad a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{k-1}^{n} a_{ik} \tag{4}$$

para: $1 \leq i \leq n$; e

$1 \leq j \leq n$

O próximo passo é calcular o valor médio de cada linha da matriz normalizada, o que possibilita gerar o peso relativo, o qual é determinado por:

$$W = \left[w_k\right] \quad \text{sendo} \quad w_k = \sum_{j-1}^{n} a'_{ij} / n \tag{5}$$

para: $1 \leq j \leq n$; e

$1 \leq k \leq n$

3.2.2.2 Cálculo da taxa de consistência

A partir do momento em que a matriz de comparação pareada está completa com valores, a importância relativa entre os pares de fatores pode ser avaliada e também é possível determinar o grau de coerência da matriz, em função de seus valores. Saaty (1977) mostra o procedimento para gerar o índice de coerência dos dados da matriz, conhecido como Taxa de Consistência, calculado através de form. (6).

A CR é uma função do autovalor máximo (*maximum eigenvalue*) e do tamanho da matriz, chamado de índice de consistência, o qual é comparado, então, contra valores semelhantes se as comparações, aos pares, tenham sido simplesmente randômicas (chamado “índice randômico”). Se a relação do índice de consistência para o índice aleatório (chamado “relação de consistência”) for maior que 0,1, Saaty (1977) sugere que os valores da matriz de comparação pareada devam ser revistos.

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{6}$$

sendo que: CR é a Taxa de Consistência
CI é o Índice de Consistência (demonstrado abaixo)
RI é o Índice Randômico (demonstrado abaixo)

O exemplo a seguir ilustra o cálculo da Taxa de Consistência de uma matriz de comparação pareada chamada matriz [A]. Primeiramente multiplica-se a matriz [A], pelo autovetor [B] para gerar um vetor novo [C].

$$\begin{array}{ccccc} & [A] & & [B] & [C] \\ \begin{bmatrix} 1 & 0,33 & 5 & 6 & 5 \\ 3 & 1 & 6 & 7 & 6 \\ 0,20 & 0,17 & 1 & 3 & 1 \\ 0,17 & 0,14 & 0,33 & 1 & 0,25 \\ 0,20 & ,017 & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} & X & \begin{bmatrix} 0,288 \\ 0,489 \\ 0,086 \\ 0,041 \\ 0,096 \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1,605 \\ 2,732 \\ 0,446 \\ 0,212 \\ 0,487 \end{bmatrix} \end{array}$$

Em seguida, divide-se cada elemento do vetor [C] pelo elemento correspondente no vetor [B] para gerar o vetor [D].

$$[D]=\begin{bmatrix} \frac{1,605}{0,288} & \frac{2,732}{0,489} & \frac{0,446}{0,086} & \frac{0,212}{0,041} & \frac{0,487}{0,096} \end{bmatrix}$$

$$[D]=\begin{bmatrix} 5,57 & 5,58 & 5,19 & 5,17 & 5,07 \end{bmatrix}$$

Agora calcula-se a média dos elementos do vetor [D], resultando no que é chamado de autovalor máximo ($\lambda_{\max}$) demonstrado por:

$$\lambda_{\max} = \frac{5,57+5,58+5,19+5,17+5,07}{5} = 5,32$$

O índice de consistência (CI - *Consistency Index*) é determinado pela eq. (7).

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N-1} \tag{7}$$

sendo que: CI é o Índice de Consistência

$\lambda_{\max}$ é o autovalor máximo

N corresponde ao tamanho da matriz

Neste exemplo, o valor de CI é 0,08, conforme demonstrado abaixo.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - N}{N-1} = \frac{5,32-5}{5-1} = 0,08$$

Índices randômicos (RI - *Random Index*) para vários tamanhos de matriz N foram definidos por Saaty (1977) como apresentado abaixo:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	...
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	

Finalizando o exemplo, a Taxa de Consistência da tabela de comparação pareada com cinco fatores foi calculado com valor 0,07, e está dentro do padrão

proposto por Saaty (1977), conforme demonstrado abaixo.

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}08}{1{,}12} = 0{,}07$$

3.2.3 Avaliação CLP

Como já visto, os pesos de compensação são calculados a partir da matriz de comparação pareada, em função da definição da importância relativa de cada fator. Assim, para completar a avaliação pelo método da Combinação Linear Ponderada, basta multiplicar o fator pelo seu respectivo peso calculado e somar os produtos.

Para aplicação no FGest, todos os fatores devem estar no formato de mapa *raster* de x linhas e y colunas, lembrando que o cruzamento entre uma linha e uma coluna de um mapa é chamado de célula. O que ocorre na prática é que para uma determinada posição (x, y), a célula de um mapa é multiplicada pelo peso do fator correspondente. Assim também ocorre com todas as células que ocupam as posições correspondentes nos outros mapas. O próximo passo é realizar a soma destes produtos, que deve ser armazenada como valor da respectiva célula no mapa de adequação resultante (Figura 10).

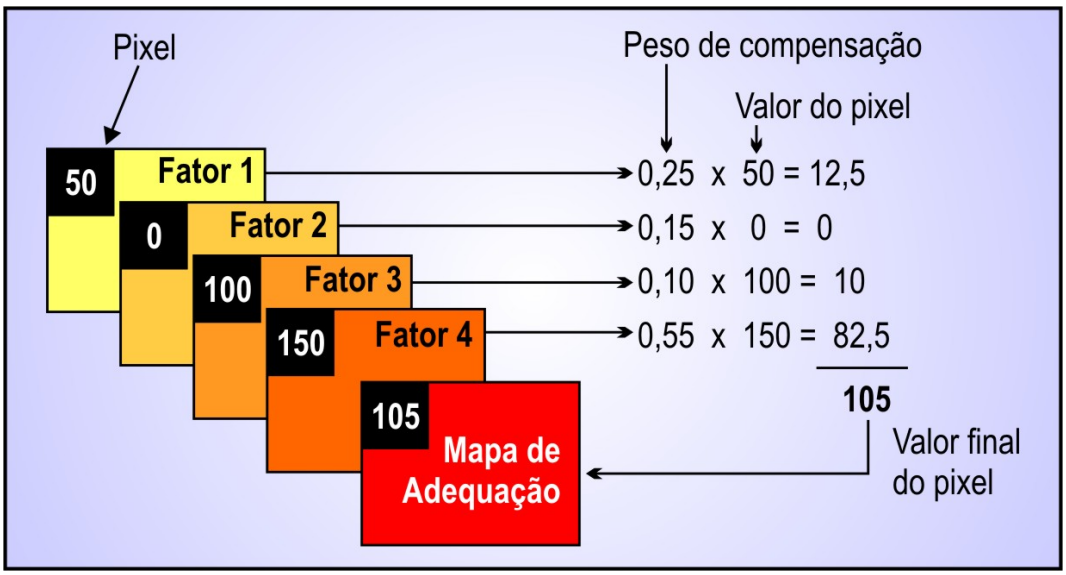


Figura 10 - Representação do processo de avaliação pelo método da Combinação Linear Ponderada (CLP)

A soma dos pesos gerados no processamento da matriz de comparação pareada deve ser igual a 1, o que garante que os valores resultantes no mapa de adequação terão variação correspondente à faixa de valores possíveis definida no processo de padronização (normalização) dos valores dos fatores.

O último passo da avaliação por CLP é a aplicação do mapa de adequação, gerado na agregação (combinação) dos fatores, às restrições do processo de avaliação, representada pelos mapas de restrições. Para tanto basta multiplicar o mapa de adequação pelos mapas de restrição, o que elimina do primeiro as áreas não adequadas para avaliação. No FGest esta fase da avaliação CLP é executada antes da combinação dos fatores, o que elimina a agregação dos mesmos em áreas caracterizadas como não adequadas ao processo, gerando melhora na performance da execução do processo de avaliação, diretamente proporcional ao número de pixels valorados com 0 (zero) nos mapas de restrições.

3.2.4 Ranqueamento dos fatores

Importante passo no processo de avaliação MPO é estabelecer o ranqueamento dos fatores para receber um segundo conjunto de pesos, que são os pesos de ordenação. O resultado do ranqueamento indica o grau de influência do fator no processo de análise.

Foi desenvolvido no FGest um algoritmo que está à disposição do tomador de decisão para indicar o grau de influência de um fator dentro do processo de avaliação em função das células ponderadas pelo peso de compensação em comparação com os demais fatores, representado por eq. (8).

$$IndRanq = \sum (QdeCel_i^{N-1}) \tag{8}$$

sendo que: IndRanq é o índice do fator calculado no processo de ranqueamento

$QdeCel_i$ é a quantidade de células na posição i do vetor de ranqueamento de fatores

N corresponde ao número de fatores

No processo de ranqueamento criado, cada fator possui um vetor de ranqueamento utilizado para acumular a quantidade de células de acordo com sua classificação em relação aos demais fatores, para cada comparação de posições x,y nos mapas. Por exemplo, se em uma posição x,y os valores são 20, 30, 10, 40 e 80 para os fatores A, B, C, D e E, conforme representado na Figura 11, é adicionado: 1 na posição 4 do vetor de ranqueamento do fator A; 1 na posição 3 do vetor de ranqueamento do fator B; 1 na posição 5 do vetor de ranqueamento do fator C; 1 na posição 2 do vetor de ranqueamento do fator D; e 1 na posição 1 do vetor de ranqueamento do fator E (Quadro 3).

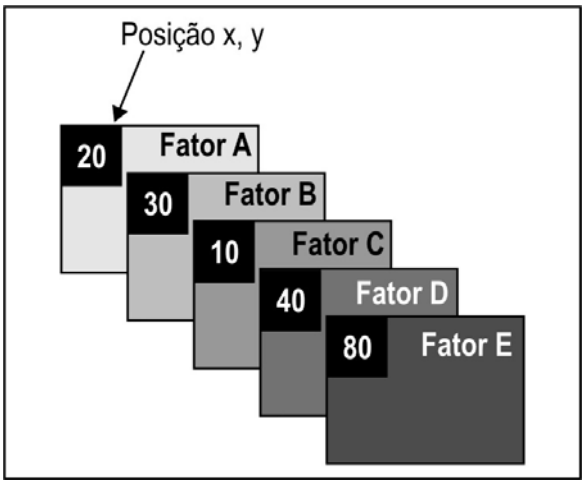


Figura 11 - Representação de valores ponderados na posição x,y dos mapas fatores, para uso no processo de ranqueamento

Vetor de ranqueamento do fator A	400	100	400	99+1	0
Vetor de ranqueamento do fator B	300	200	399+1	100	0
Vetor de ranqueamento do fator C	400	0	0	100	499+1
Vetor de ranqueamento do fator D	0	99+1	700	0	200
Vetor de ranqueamento do fator E	599+1	100	100	0	200

Quadro 3 - Valores acumulados, em vetores de ranqueamento, de acordo com classificações individuais em posições x,y dos mapas de fatores

Ao aplicar a eq. (8) para definição da posição dos fatores em uma ordem de ranqueamento, tem-se:

Fator A = (400 x 16) + (100 x 8) + (400 x 4) + (100 x 2) + (0 x 1) = 9000

Fator B = (300 x 16) + (200 x 8) + (400 x 4) + (100 x 2) + (0 x 1) = 8200

Fator C = (400 x 16) + (0 x 8) + (0 x 4) + (100 x 2) + (500 x 1) = 7100

Fator D = (0 x 16) + (100 x 8) + (700 x 4) + (0 x 2) + (200 x 1) = 3800

Fator E = (600 x 16) + (100 x 8) + (100 x 4) + (0 x 2) + (200 x 1) = 11000

O ranqueamento final proposto pelo FGest neste exemplo, classificado em ordem crescente de influência dos fatores ponderados é: Fator D, Fator C, Fator B, Fator A e Fator E. A Figura 12 mostra a tela onde o FGest apresenta, após avaliação pelo método CLP, o ranqueamento proposto, seguindo ordem crescente de influência do fator no processo de avaliação.

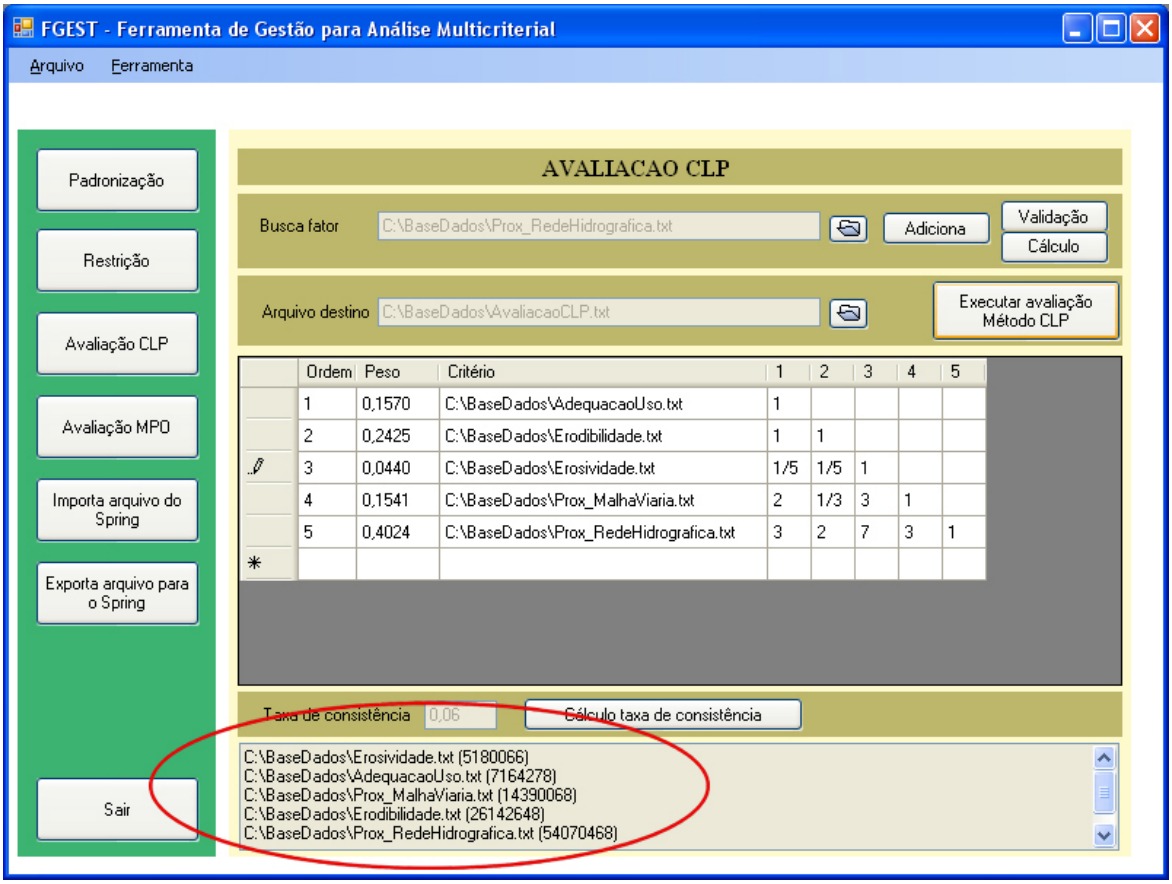


Figura 12 - Tela de avaliação pelo método CLP, onde é possível observar o ranqueamento proposto, conforme influência de cada fator no processo de avaliação

Pode ser observado nesta figura, pelo índice de ranqueamento calculado para cada fator, que o fator Erosividade, com índice 5.180.066, é o fator menos influente no processo, seguido pelos fatores AdequacaoUso, com índice 7.164.278, Prox_MalhaViaria, com índice 14.390.068, Erodibilidade, com índice 26.142.648 e, finalmente, o fator Prox_RedeHidrografica, que é o mais influente no processo de avaliação, com índice de ranqueamento igual a 54.070.468.

3.2.5 Avaliação MPO

O operador da Média Ponderada Ordenada (MPO) proporciona agregações (ou combinações) que ficam entre os operadores booleanos de intersecção (AND) e união (OR). Não se deve perder de vista que o operador da CLP fica exatamente entre estes dois extremos.

O que diferencia a avaliação CLP da MPO, é que esta última possui um novo conjunto de pesos, conhecido como pesos de ordenação. O FGest contempla uma rotina que foi desenvolvida para possibilitar a definição e operação dos pesos de ordenação, utilizados para controlar a maneira pelo qual os fatores são agregados e o nível de compensação entre eles, que devem ser determinados dentro do espaço de estratégia de decisão (Figura 3, item 2.4.4).

Na CLP os pesos dos critérios determinam como os fatores se compensam entre si; porém, o nível de compensação não é ajustável e é sempre assumida a compensação total. Na MPO, os pesos dos critérios são ajustados de acordo com o nível de compensação, de tal maneira que eles impõem sua significância máxima quando a compensação total é escolhida e gradualmente perdem seu significado (isto é, os pesos dos critérios tornam-se iguais) quando se aproxima da situação de não compensação.

Enquanto os pesos de critérios estão associados com a importância relativa de um critério em particular para o conjunto de decisão, bem como a maneira como os critérios se compensam entre si, os pesos de ordenação controlam a posição do operador de agregação em um contínuo entre os extremos AND e OR, bem como o grau de compensação (VETTORAZZI, 2006).

Valente (2005) afirma que a maneira como os fatores serão compensados é que controla o modo como o algoritmo da média ponderada ordenada agrega os fatores, no espaço contínuo entre os extremos (AND e OR). A determinação da posição na dimensão de risco assumido, no processo de tomada de decisão, será dada pela localização onde a maior parte dos pesos de ordenação for assinalada à esquerda, à direita ou ao centro (Figura 3).

Os parâmetros ANDness, ORness e *tradeoff* ou compensação representados respectivamente por eq.(9), eq. (10) e eq.(11) caracterizam a natureza da Média Ponderada Ordenada (JIANG e EASTMAN, 2000).

O conceito da Média Ponderada Ordenada foi introduzido por Yager (1988), possibilitando o controle contínuo sobre o grau de ANDness e de ORness do operador e o grau de compensação (*tradeoff*) entre critérios. Os critérios recebem pesos com base em sua ordem de ranqueamento em vez de suas qualidades inerentes. Por exemplo, podemos decidir aplicar pesos de 0,5, 0,3 e 0,2 a um conjunto de fatores A, B e C, com base em sua ordem de ranqueamento. Se para um local os critérios fossem ranqueados BAC (do mais baixo para o mais alto), a combinação ponderada seria 0,5B + 0,3A + 0,2C. Entretanto, se para outro local os fatores fossem ranqueados CBA, a combinação ponderada seria 0,5C + 0,3B + 0,2A (VETTORAZZI, 2006).

Na implementação do conceito de Yager (1988) em SIG por Eastman e Jiang (1996), mantém-se a aplicação de pesos de critérios específicos (fatores) como na CLP e aplica-se também no processo um segundo conjunto de pesos, que são os pesos de ordenação, aplicados aos critérios ranqueados, após a aplicação dos pesos de critérios.

$$ANDness = \left(\frac{1}{n-1}\right)\sum\left((n-1)W_{ordem_i}\right) \tag{9}$$

$$ORness = 1 - ANDness \tag{10}$$

$$Compensação = 1 - \sqrt{\frac{n\sum(W_{ordem_i} - 1/n)^2}{n-1}} \quad (11)$$

sendo que: n é o número total de fatores;

$_i$ é a ordem dos fatores; e

W ordem $_i$ é o peso para o fator da iésima ordem.

3.3 Validação do FGest

Uma etapa do processo de desenvolvimento de um *software* consiste na realização de testes de validação, com objetivo de verificar se todos os algoritmos que compõem o mesmo encontram-se escritos adequadamente aos propósitos específicos a que foram concebidos.

Neste contexto, foi utilizado o FGest em processo de Avaliação Multicritérios associado a ambiente SIG, através da utilização dos métodos da Combinação Linear Ponderada e da Média Ponderada Ordenada, na geração de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal, na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos.

Ponto importante a ser observado é que os resultados apresentados estão diretamente ligados à forma com que o tomador de decisão define o grau de importância entre os critérios e pondera o ranqueamento dos mesmos. Esta flexibilidade dos métodos utilizados no FGest possibilita que a subjetividade e juízo de valores do tomador de decisão possam influir nos resultados associados ao risco assumido no processo decisório.

Vettorazzi (2006), em trabalho que resultou em Tese de Livre Docência, utiliza avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal, com objetivo de conservar os recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Corumbataí, SP. Os resultados gerados em seu trabalho serão utilizados como parâmetros de comparação aos resultados aqui produzidos, no processo de validação do FGest.

3.3.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Corumbataí, ilustrada pela Figura 13, é um exemplo de bacia desenvolvida a partir do Cenozóico, com cabeceiras nas *cuestas* da Serra Geral, em litologias típicas da bacia sedimentar do Paraná. É uma sub-bacia da margem direita do rio Piracicaba, um importante rio localizado na região centro-leste do estado de São Paulo.

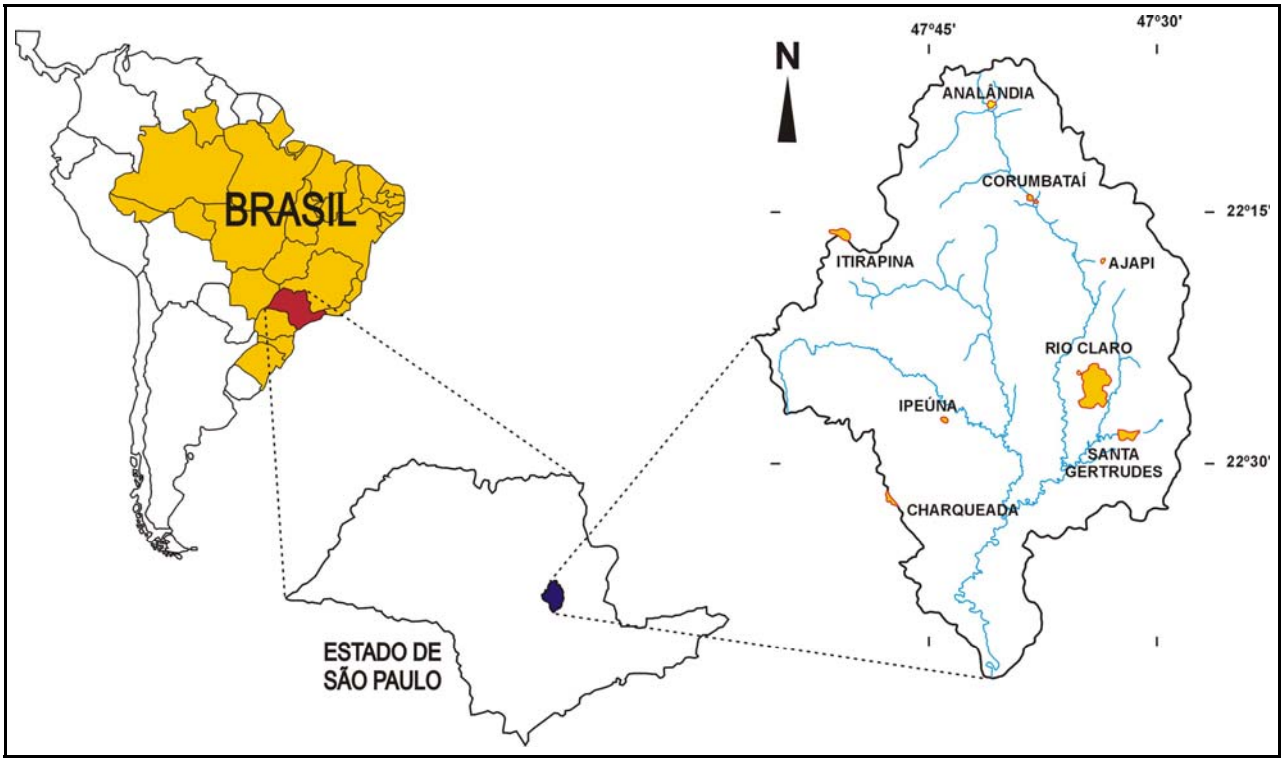


Figura 13 – Localização da bacia hidrográfica do rio Corumbataí. Fonte: Fonte: CEAPLA (2004)

A topografia dominante na bacia é colinosa, com vegetação original de cerrados e matas. Ocupa área de 1.710 km^2, posicionada na Depressão Periférica Paulista, aproximadamente entre os paralelos 22°05'S e 22°30'S e os meridianos 47°30'W e 47°50'W. A altimetria varia entre 470 m na embocadura do rio Piracicaba, em Santa Terezinha, e 1.058 m na Serra do Cuscuzeiro, próximo à cidade de Analândia.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da bacia é do tipo Cwa, subtropical, seco no inverno e chuvoso no verão. A temperatura média no verão (janeiro) é de 22°C

e 17°C no inverno (julho). A precipitação varia de 1393 mm/ano (Rio Claro) a 1531 mm/ano (Ipeúna). Segundo Zavatini e Cano (1993), apresentam-se duas estações bem definidas: seca, de março a setembro, quando ocorre menos de 30% da precipitação anual, e chuvosa, de outubro a fevereiro, quando ocorre mais de 70% da precipitação anual. A pluviosidade total anual média é de 1.422,3 mm para a série de 1962-1990.

Os solos mais importantes da bacia são: Argissolos Vermelho–Amarelos, Latossolos Vermelho–Amarelos, Litólicos, Latossolos Vermelhos, e Neossolos Quartzarênicos (GARCIA, ANTONELLO e MAGALHÃES, 2006).

O rio que atravessa esta bacia e que lhe empresta o nome é responsável pelo abastecimento de vários municípios. Suas águas são utilizadas para o abastecimento de aproximadamente 550.000 pessoas, além de ser utilizada na agricultura, pecuária e indústria.

A rede de drenagem da bacia do rio Corumbataí (Figura 14) apresenta maior densidade na margem direita. Quanto ao padrão, na margem esquerda aflora um padrão menor, fato que pode estar vinculado a controles tectônicos devido às condições litoestruturais e geomorfológicas da área, e os afluentes da margem esquerda possuem um padrão mais alongado e corre de forma paralela ao principal rio. Na bacia, constata-se que o rio Corumbataí, no alto-curso, é caracterizado por fluir em vales estreitos, encachoeirados com pequenas quedas e corredeiras, o que lhe dá maior velocidade. Em seu médio curso, que se estende por todo o município de Rio Claro, flui em vales abertos, possui fraca declividade, e características sinuosas, diminuindo, assim, a velocidade das águas, tornando-se um rio mais caudaloso e lento, com fracas e esparsas rupturas topográficas no seu leito. Já no seu baixo curso, o rio Corumbataí apresenta um canal sinuoso a retilíneo, com vales abertos o que lhe permite retomar sua característica inicial de maior velocidade (SANTOS e GARCIA, 2006).

Os municípios de Ipeúna, Rio Claro e Santa Gertrudes são inteiramente drenados pela bacia do Corumbataí, enquanto que esta drena parcialmente os municípios de Analândia, Charqueada, Corumbataí, Itirapina e Piracicaba.

A economia da bacia é baseada na agricultura e na indústria, sendo este último caso, principalmente na cidade de Rio Claro. A ocupação regional começou no início do século XIX, com a fundação de Corumbataí (1821) e Rio Claro (1827). Ao longo do

tempo predominou a economia baseada na agricultura e na pecuária e, mais recentemente, um incremento na economia industrial. O processo de industrialização promoveu o crescimento da urbanização e mudanças no uso do solo rural e dos recursos ambientais.

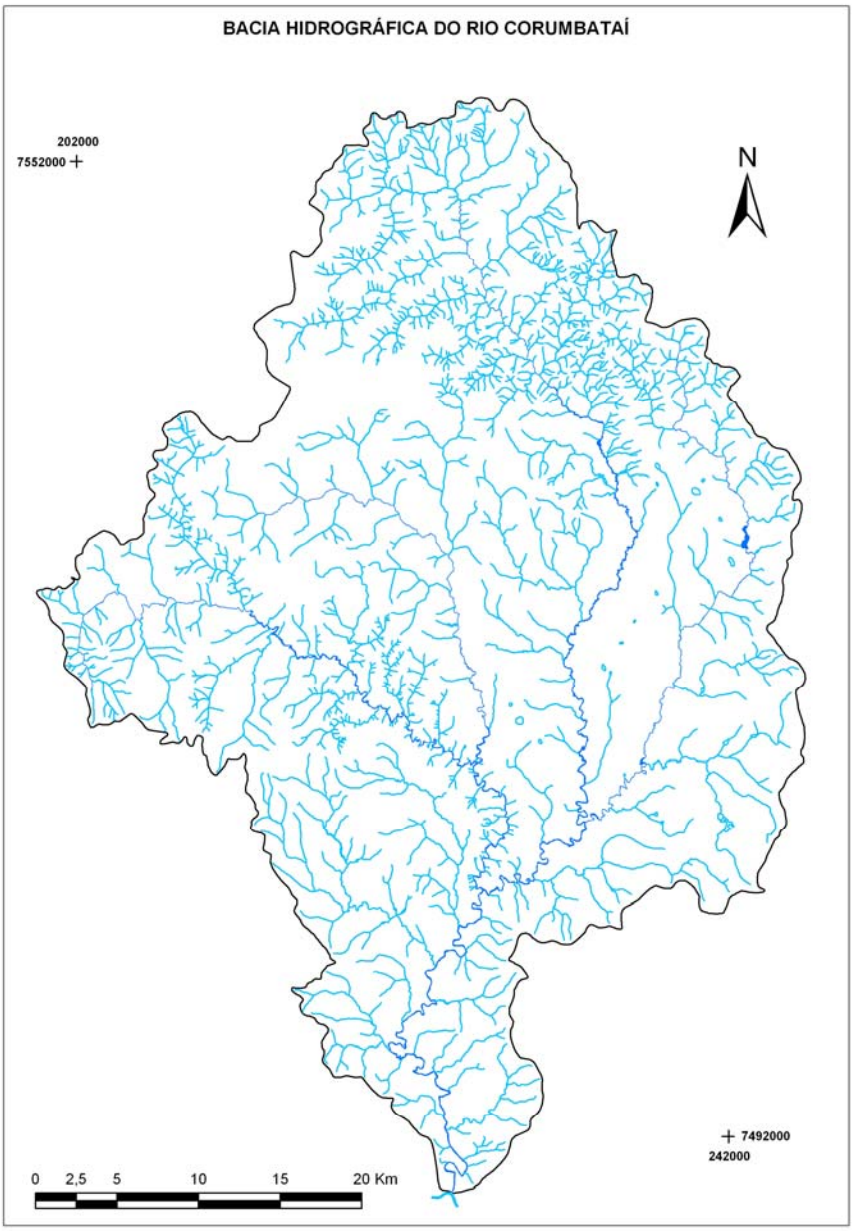


Figura 14 – Rede hidrográfica da bacia do rio Corumbataí. Fonte: CEAPLA (2004)

Há mais de um século a bacia hidrográfica do rio Corumbataí vem sendo degradada, pelo uso e ocupação inadequados do solo, e pela retirada excessiva da

água para consumo humano e agrícola (IPEF, 2001). Atualmente, sérias conseqüências estão sendo geradas pelo uso intensivo de suas terras, principalmente pela cana-de-açúcar e citricultura e pela poluição das águas superficiais e subterrâneas ocasionada por nutrientes e biocidas utilizados na agricultura, e por efluentes domésticos e industriais (GARCIA et al., 2002).

Problemas de abastecimento hídrico e de perda da capacidade produtiva dos solos, por erosão, são algumas das conseqüências apresentadas pelo elevado nível de fragmentação da cobertura florestal original da bacia hidrográfica do rio Corumbataí, causado por um processo desordenado de uso e ocupação do solo (VALENTE e VETTORAZZI, 2003).

3.3.1.1 Geomorfologia

A Depressão Periférica Paulista é uma unidade morfológica importante no Estado de São Paulo. Esta área localiza-se entre os rebordos pré-cambrianos do Planalto Cristalino e as escarpas das zonas das *cuestas* dos derrames basálticos do Planalto Ocidental Paulista. Estende-se por mais de 470 km de norte a sul do estado, descrevendo um arco de circunferência externa e apresentando em média 90 km de largura. A Depressão Periférica Paulista foi descrita em três zonas distintas: Médio Tietê, Paranapanema e Mogi-Guaçu, sendo que a sub-bacia do rio Corumbataí pertence a primeira zona, que apresenta-se com características morfológicas típicas: comportamento interplanáltico, suavemente ondulado, com altitude oscilando entre 550 m a 650 m ao nível das várzeas estreitas e descontínuas de 600 m a 650 m, correspondentes aos interflúvios tabuliformes (CEAPLA, 2004).

As escarpas denominadas Serra do Atalaia, Morro Grande, Serra do Cuscuzeiro, Serra de Sant'ana, Serra de Itaqueri e Serra de São Pedro, estão entre as cotas de 800 m a 1.000 m. Estes alinhamentos de *cuestas* compõem um anfiteatro característico do setor-ocidental da Depressão Periférica onde localizam-se as cabeceiras do rio Corumbataí e de seus afluentes, o ribeirão Claro e o rio Passa Cinco. Estes rios nascem nas encostas da *cuesta* e se deslocam para o sul indo alimentar o rio

Piracicaba, que, correndo em sentido oeste, leva suas águas para o rio Tietê (CEAPLA, 2004).

Embora a paisagem da bacia apresente ricas áreas como as *cuestas*, Viadanna (1985) descreve a paisagem da mesma como monótona, predominando extensas áreas suavemente onduladas, interrompidas no contato das escarpas areníticas-basálticas e cortadas pela rede hidrográfica com padronagem dendrítica. As vertentes desprotegidas pelos desmatamentos se processam de forma acelerada, contribuindo para o aprofundamento dos vales fluviais.

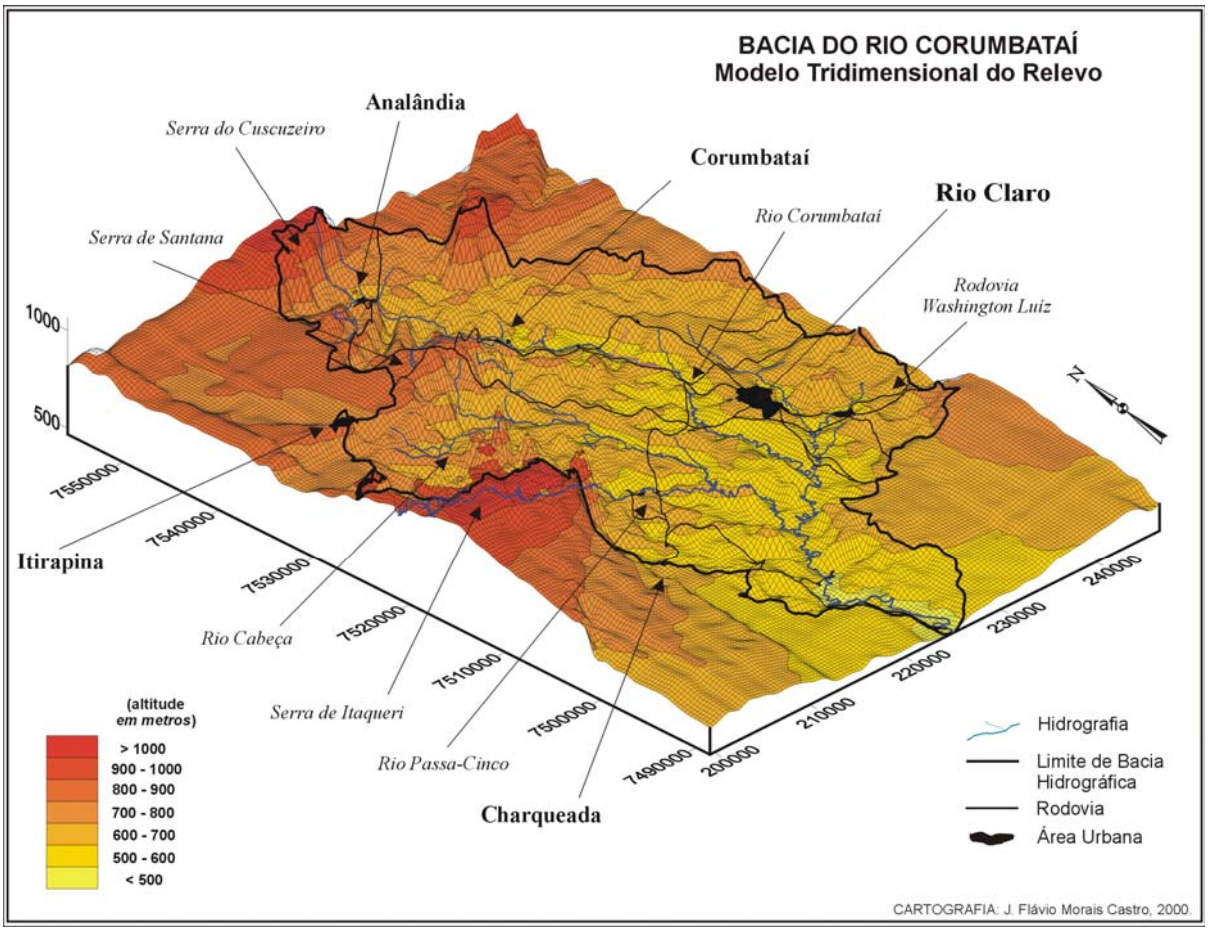


Figura 15 – Modelo digital do terreno para a bacia do Rio Corumbataí. Fonte: CEAPLA (2004). Disponível em http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/ biblioteca/download.html

3.3.1.2 Geologia

Segundo Perinotto e Lino (2004) a bacia hidrográfica do rio Corumbataí situa-se na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, na Depressão Periférica Paulista,

centro-leste do Estado de São Paulo, em área de afloramento de rochas paleozóicas (Grupo Itararé, Formação Tatuí e Grupo Passa Dois: formações Irati e Corumbataí), mesozóicas (Formação Pirambóia, Grupo São Bento: formações Botucatu e Serra Geral, rochas magmáticas intrusivas: diques e soleiras e Formação Itaqueri) e cenozóicas (Formação Rio Claro) (Figura 16).

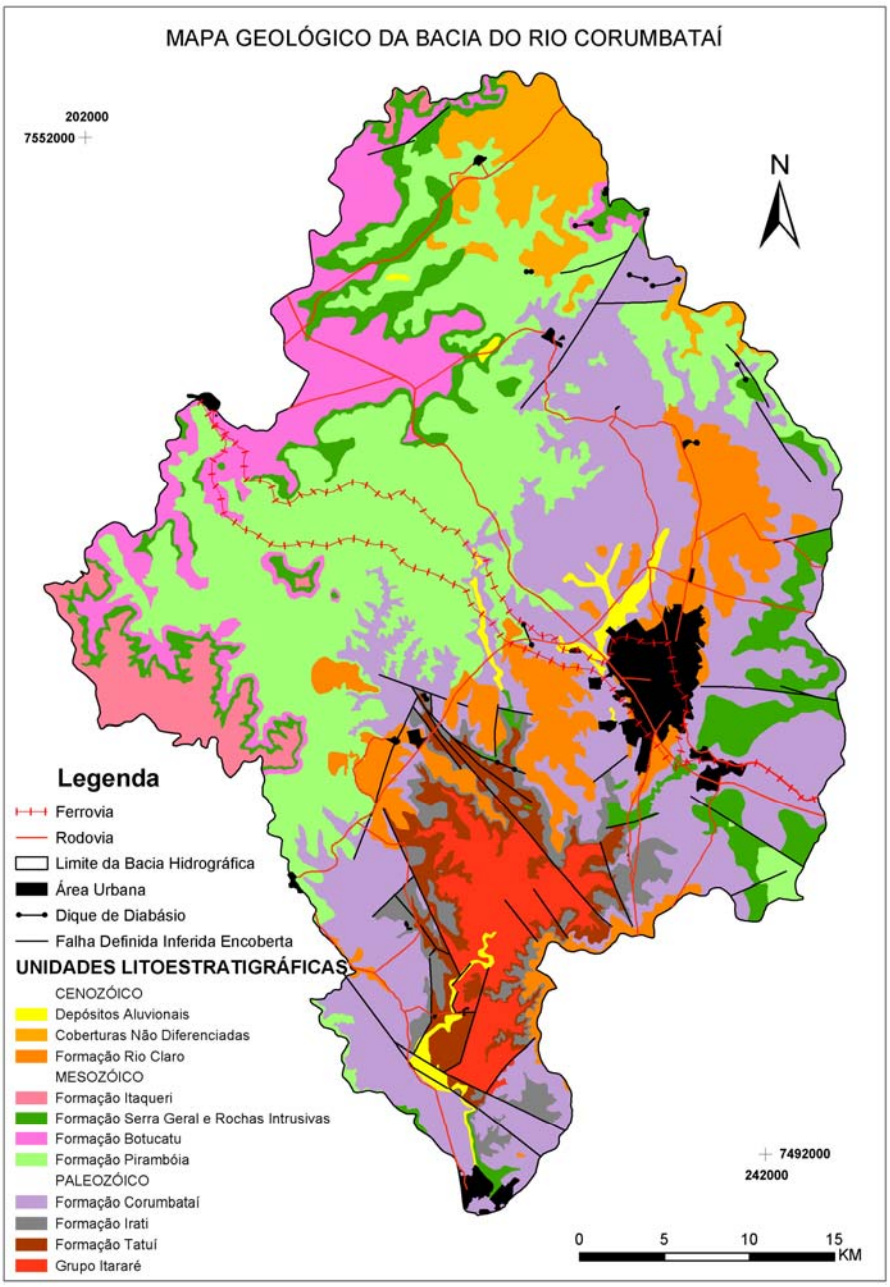


Figura 16 - Mapa geológico da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: CEAPLA (2004). Disponível em http://www.rc.unesp.br/igce/ceapla/biblioteca/download.html)

Nesta área ocorre uma das mais interessantes estruturas geológicas regionais: o Domo de Pitanga. O rio Corumbataí corre, desde sua nascente, na região de Analândia, até sua foz, no rio Piracicaba, sobre diversos tipos litológicos identificados com as unidades estratigráficas citadas. Devido à estruturação causada pelo Domo de Pitanga, as unidades estratigráficas do alto curso (formações Botucatu, Pirambóia e Corumbataí) e do baixo curso (Formação Corumbataí) são mais jovens que as do médio curso (Grupo Itararé e Formação Tatuí).

Ainda Segundo Perinotto e Lino (2004) Os recursos minerais atualmente em explotação na bacia do rio Corumbataí envolvem:

a. Água mineral (Formação Rio Claro);
b. Calcário dolomítico (Formação Irati, principalmente em Assistência e Ipeúna);
c. Argilas para cerâmica, principalmente para empresas em Rio Claro e Santa Gertrudes (Formação Corumbataí);
d. Rochas (diques e soleiras de diabásio) para brita (Assistência e Batovi); e
e. Areia, com destaque para Ajapi, e no rio Corumbataí (Formação Rio Claro).

3.3.1.3 Solos

Os solos predominantes na bacia são os Podzólicos Vermelho-Amarelos (43,46%) e os Latossolos Vermelho-Amarelos (21,58%), como pode ser observado na Figura 17a e na Tabela 1.

Com base na primeira ordem do Novo Sistema de Classificação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 1999), os solos apresentados anteriormente enquadram-se nas seguintes ordens: Latossolos (LR, LE e LV); Argissolos (PV e PE); Nitossolos (TE); Neossolos (AQ e Li); Gleissolos (Hi) e Chernossolos (BV). Assim, a bacia do rio Corumbataí apresenta 46,21% de sua área constituída por Argissolos; 30,14% por Latossolos; 22,66% por Neossolos; 0,41% por Nitossolos; 0,40% por Gleissolos; e 0,18% por Chernossolos (Figura 17b) (VETTORAZZI, 2006)

Tabela 1 - Classes de solos presentes na bacia hidrográfica do rio Corumbataí. Fonte: IPEF (2001)

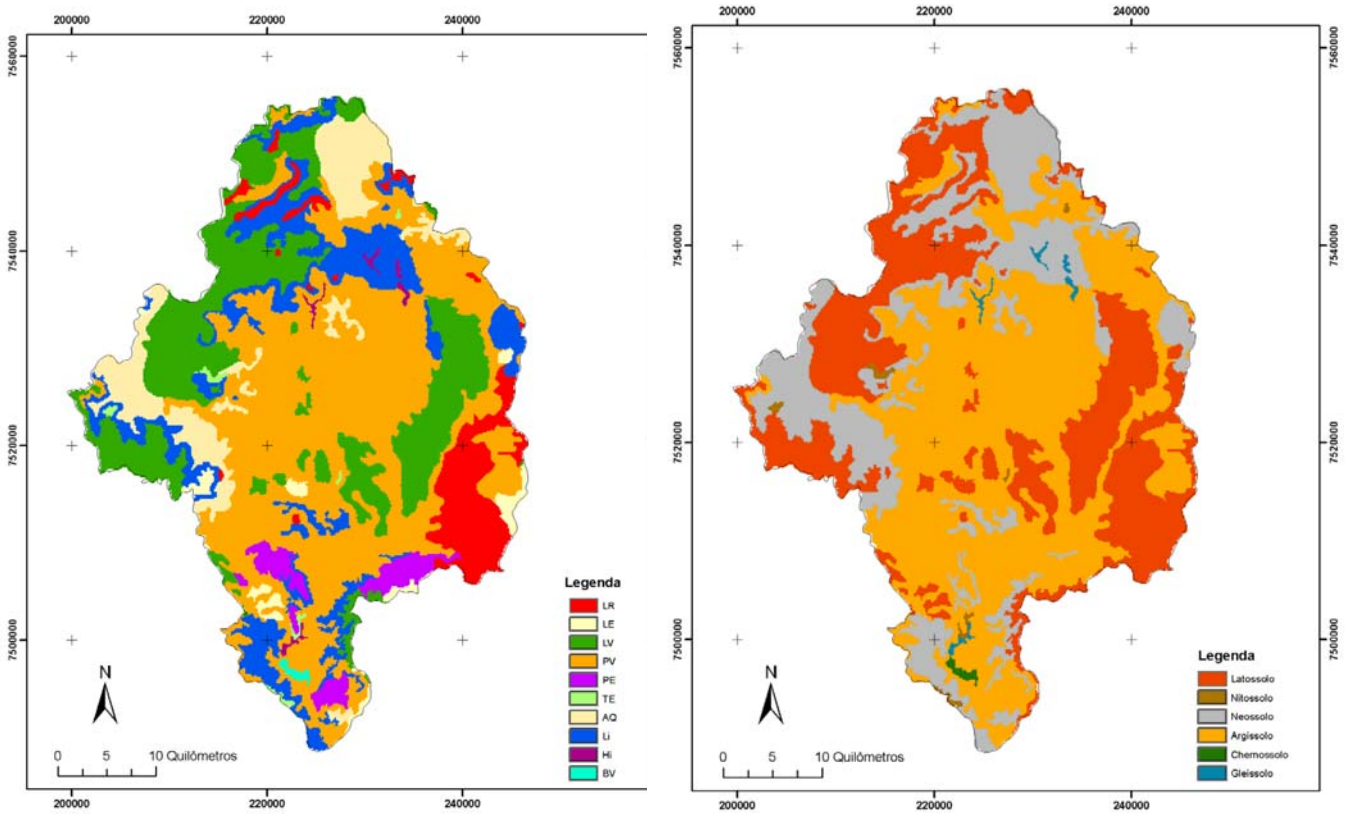
Classe de Solo	Área (ha)	(%)
Podzólico Vermelho-Amarelo (PV)	74.219,07	43,46
Latossolo Vermelho-Amarelo (LV)	36.853,37	21,58
Litólico (Li)	23.601,19	13,82
Areia Quartzosa (AQ)	15.130,72	8,86
Latossolo Roxo (LR)	11.476,12	6,72
Podzólico Vermelho-Escuro (PE)	4.764,64	2,79
Latossolo Vermelho-Escuro (LE)	3.039,81	1,78
Terra Roxa Estruturada (TE)	700,18	0,41
Solos Hidromórficos (Hi)	683,10	0,40
Brunizem Avermelhado (BV)	307,40	0,18
Total	170.775,60	100,00

O plano de informação referente aos solos da bacia do Rio Corumbataí (Figura 17a) foi elaborado a partir da digitalização e edição dos mapas do Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo, na escala 1:100.000, quadrículas de Piracicaba (OLIVEIRA et al., 1989), São Carlos (OLIVEIRA; PRADO; ALMEIDA, 1981a) e Araras (OLIVEIRA et al., 1981b).

3.3.1.4 Uso e cobertura do solo

Em mapeamento recente do uso e cobertura do solo Valente (2005), constatou que na bacia existe predominância do uso agrícola, com aproximadamente 42% de sua área ocupada por pastagem e 28% por cana-de-açúcar (Tabela 2). A pastagem distribui-se predominantemente nas porções superior e média da bacia, enquanto que a cana-de-açúcar nas partes média e baixa. A floresta nativa e o cerrado correspondem a, respectivamente, apenas 11,0% e 0,7% da área da bacia, sendo que as maiores manchas de vegetação florestal estão associadas às regiões com predomínio de pastagem.

O mapa de uso e cobertura do solo da bacia (Figura 18) foi produzido por Valente (2005) a partir da classificação supervisionada (Método da Máxima Verossimilhança) de imagens Landsat-7, sensor ETM+, referentes à passagem de 17 de agosto de 2002, com verificações de campo em 2003.



(a) (b)

Figura 17 - Classes de solos presentes na bacia do Rio Corumbataí. Fonte: IPEF (2001) (a) Ordens de solo presentes da bacia do Rio Corumbataí, segundo o Novo Sistema de Classificação de Solos Brasileiros (EMBRAPA, 1999). Fonte: Valente (2005) (b)

Tabela 2 - Uso e cobertura do solo da bacia do Rio Corumbataí em 2003. Fonte: Valente (2005)

Classe de Uso e Cobertura das Terras	Área	
	(ha)	(%)
Pastagem	72.228,48	42,29
Cana-de-acúcar	47.431,92	27,77
Floresta nativa	19.234,84	11,26
Cerrado	1.217,20	0,71
Floresta plantada	9.713,84	5,69
Fruticultura	6.848,80	4,01
Cultura anual	1.575,48	0,92
Mineração	323,92	0,19
Área urbana	4.937,72	2,89
Outros	7.263,40	4,25
Total	170.775,60	100,00

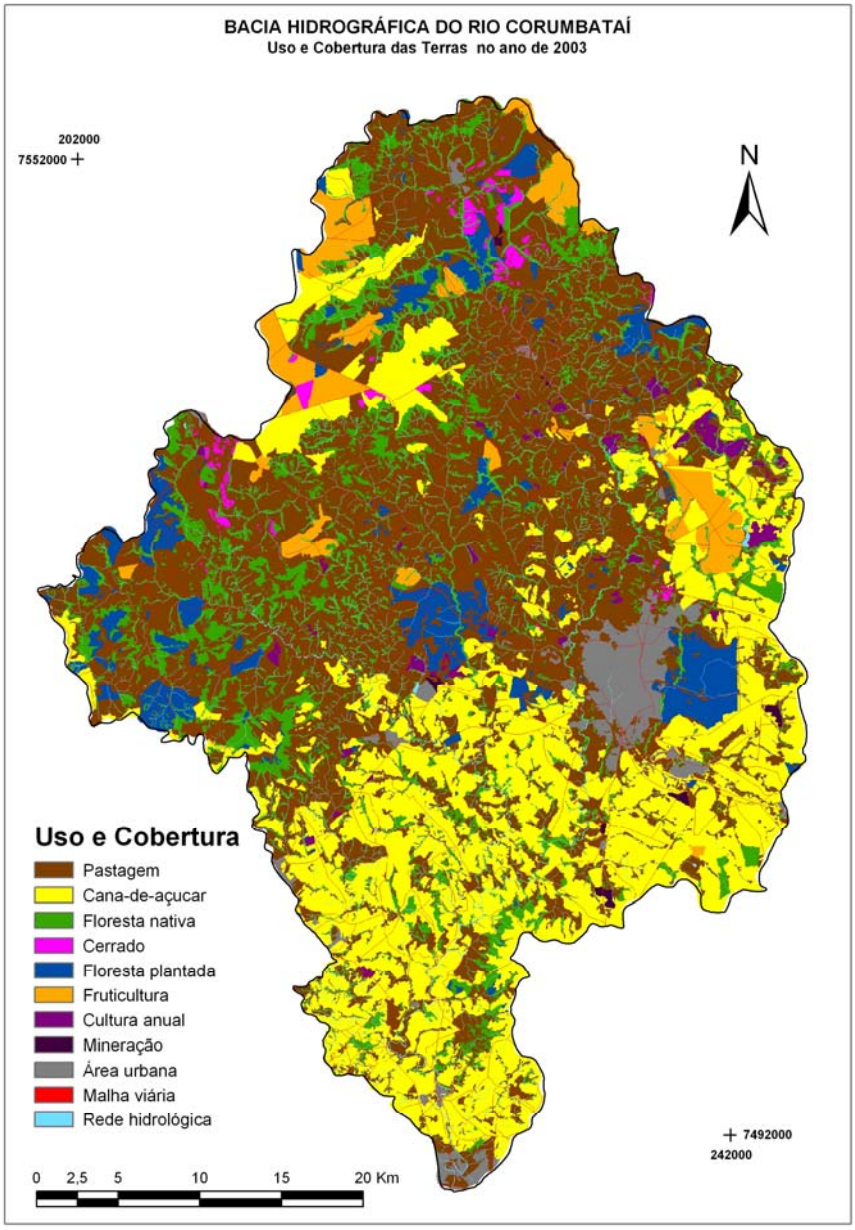


Figura 18 - Mapa de uso e cobertura das terras da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Valente (2005)

3.3.2 Estabelecimento dos critérios

Baseado em Vettorazzi (2006) foram estabelecidos cinco fatores: adequação do uso da terra; erodibilidade do solo; erosividade da chuva; proximidade à malha viária; e proximidade à rede hidrográfica, e como restrições: as áreas de floresta nativa, de cerrado, a Floresta Estadual Navarro de Andrade em Rio Claro, as áreas de mineração,

a rede hidrográfica, a malha viária e as áreas urbanas, ou seja, todas as áreas onde não foi considerada a possibilidade de restauração da cobertura florestal.

3.3.2.1 Adequação do uso da terra

O uso inadequado da terra, ou seja, sua utilização além da capacidade de uso sem degradação significativa, é responsável por grande parte da erosão acelerada em áreas rurais, produzindo sedimentos que acarretam em conseqüências negativas aos recursos hídricos.

O emprego do sistema de classificação de terras segundo sua capacidade de uso permite aos planejadores atuarem sobre a questão do aproveitamento do potencial produtivo das terras e, ao mesmo tempo, sobre a conservação dos recursos naturais. O uso da terra em si, ou uso e cobertura do solo, é um fator quase sempre presente em análises ambientais (VETTORAZZI, 2006).

O mapa do fator adequação do uso da terra é obtido a partir do cruzamento dos dados das classes de capacidade de uso da terra e uso e cobertura do solo, resultando em um mapa de adequação com duas categorias apenas: uso adequado e uso não adequado. Um mapa booleano para uso não adequado foi então gerado e cruzado com classes de capacidade de uso, produzindo um mapa com oito categorias, correspondentes às classes de capacidade de uso. A esse mapa foram agregadas as áreas com uso adequado. Por fim, aplicando-se uma função linear crescente, o mapa de adequação ao uso da terra foi padronizado na escala 0 a 255 (Figura 19).

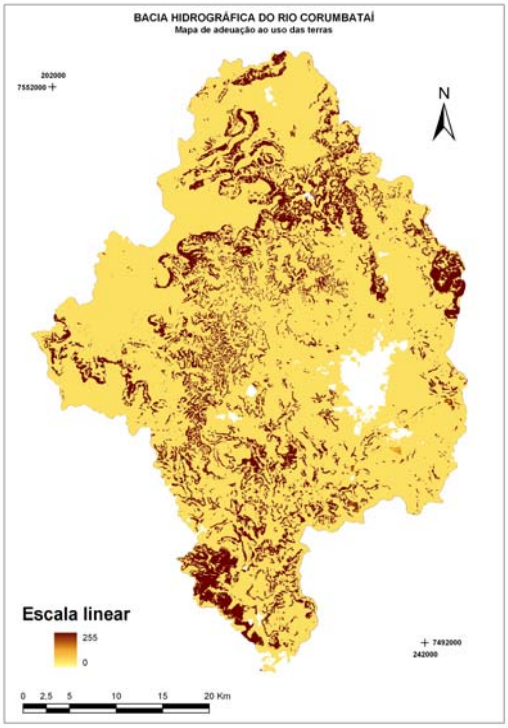
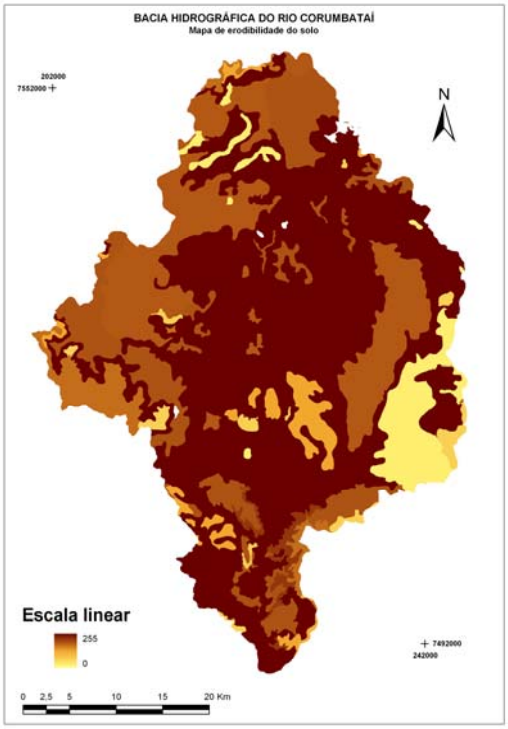


Figura 19 - Mapa de adequação ao uso das terras da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.2.2 Erodibilidade do solo

Propriedades físicas (estrutura, textura, permeabilidade e densidade) e químicas dos diferentes tipos de solos geram efeitos distintos no processo de erosão. Estas propriedades causam maior ou menor resistência à ação da água mesmo em condições semelhantes de chuva, topografia e cobertura vegetal (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990). Denomina-se esta diferença no processo erosivo de erodibilidade do solo, que é a suscetibilidade ou vulnerabilidade do solo à erosão.

Vettorazzi (2006) afirma ser coerente a inclusão da erodibilidade do solo entre os fatores de importância a serem considerados em uma análise de múltiplos critérios, com o objetivo de identificar áreas prioritárias à restauração florestal, visando à conservação de recursos hídricos.



O mapa de erodibilidade foi obtido a partir da reclassificação do mapa de solos, sendo que cada classe de solo foi associada ao valor correspondente de erodibilidade. A erodibilidade do solo tem seu valor quantitativo determinado experimentalmente em parcelas unitárias, sendo expresso como a perda de solo por unidade de índice de erosão da chuva, tendo por unidade $t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1985). Este mapa também foi submetido à padronização (0 a 255) através de uma função linear crescente (Figura 20).

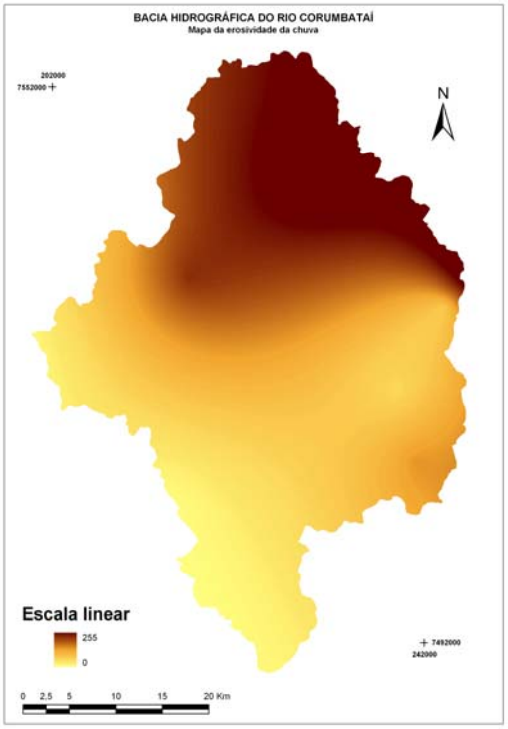
Figura 20 - Mapa de erodibilidade da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.2.3 Erosividade da chuva

A erosividade da chuva é um valor numérico que expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção. Dados de perdas de solo, associados com as características de chuva, mostram que, quando outros fatores, à

exceção da chuva, são mantidos constantes, as perdas de solo ocasionadas pelas chuvas nos terrenos cultivados são diretamente proporcionais ao valor do produto de duas características da chuva: sua energia cinética total e sua intensidade máxima em trinta minutos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990).

Vettorazzi (2006) propôs a utilização da erosividade média para o mês de novembro, pelo seu valor alto e, também, por considerar que o impacto de chuvas intensas sobre o solo é mais significativo em novembro do que em janeiro (outro valor alto e possível de ser usado), já que a cobertura vegetal seria menor e menos eficiente na proteção contra chuvas intensas no início da estação chuvosa.

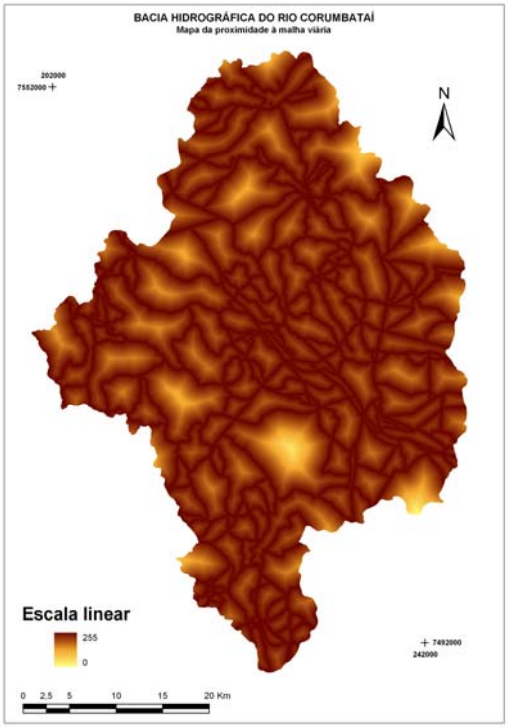


Os valores de erosividade da chuva foram calculados empregando-se a metodologia proposta por Lombardi Neto e Moldenhauer (1980), a partir dos dados de estações pluviométricas localizadas dentro e nas proximidades da área de estudo. Os valores pontuais de erosividade, em $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$, foram interpolados pelo método da krigagem, na geração do mapa da variável para a bacia. O mapa de erosividade da chuva também foi submetido à padronização (0 a 255) através de uma função linear crescente (Figura 21).

Figura 21 - Mapa de erosividade da chuva na bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.2.4 Proximidade à malha viária

A relação entre malha viária e erosão do solo é amplamente conhecida e aceita, com influência significativa sobre a qualidade e a quantidade de água superficial em determinada região (VETTORAZZI, 2006).



O mapa da malha viária foi digitalizado de cartas topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, e complementado/atualizado via digitalização em tela sobre imagens orbitais dos satélites SPOT e Landsat. Estão no mapa as estradas principais (estaduais e intermunicipais) e as secundárias (vicinais), asfaltadas ou não.

A partir da malha viária existente é aplicado processo de interpolação que possibilita gerar um mapa contínuo, então é submetido a uma função linear decrescente, o que sugere que quanto mais próxima a estrada maior o valor no mapa, com padronização de valores entre 0 e 255 (Figura 22).

Figura 22 - Mapa de proximidade à malha viária da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.2.5 Proximidade à rede hidrográfica

Outro fator considerado importante à conservação dos recursos hídricos por meio de restauração florestal é a proximidade à rede hidrográfica. Está sendo considerado que a cobertura florestal é importante à geração de água de qualidade em uma bacia hidrográfica, independentemente da sua distância aos elementos da rede de drenagem, porém essa importância, em geral, cresce à medida que a distância para o corpo d'água, ou nascente, diminui. Além disso, nas encostas, a cobertura florestal auxilia diretamente na prevenção à erosão, favorece a infiltração da água, alimentando o lençol freático, entre outras funções. Já às margens dos corpos d'água a vegetação florestal, à semelhança de faixas de proteção, é uma das medidas de proteção para os mananciais (VETORAZZI, 2006). Foram considerados, na geração de áreas prioritárias à restauração florestal, apenas aspectos da paisagem, naturais ou antrópicos, não considerando na análise a recomendação quanto à largura de faixas, como consta do Código Florestal.

O mapa da rede hidrográfica foi gerado a partir da digitalização dos cursos d'água e represas, de cartas topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, e complementado pela digitalização em tela (cursos d'água de ordens menores e represas construídas após a edição dos mapas), tendo como base imagens dos satélites SPOT e Landsat.

A partir da rede hidrográfica é aplicado processo de interpolação que possibilita gerar um mapa contínuo, então é submetido a uma função linear decrescente, o que sugere que quanto mais próxima a rede hidrográfica, maior o valor no mapa, com padronização de valores entre 0 e 255 (Figura 23).

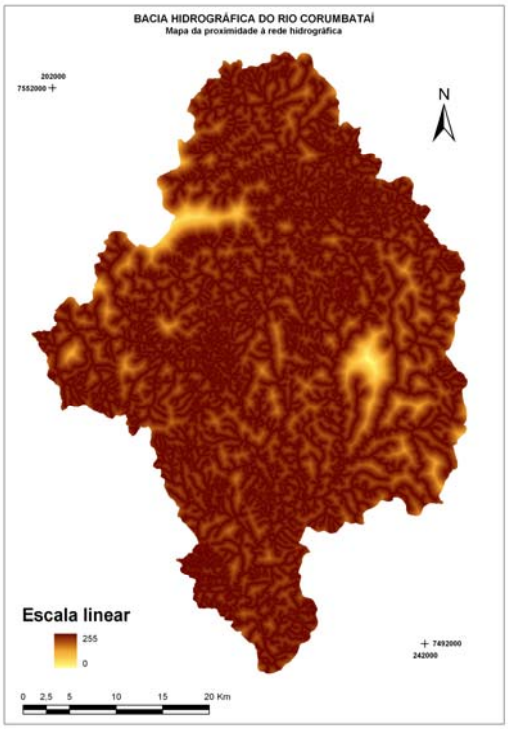


Figura 23 - Mapa de proximidade à rede hidrográfica da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.2.6 Restrições

O mapa de restrição (Figura 24) é obtido pela análise booleana, que resulta em valor de pixel igual a 1 (um) em áreas onde é possível a restauração florestal e 0 (zero) em áreas em que não é considerada a restauração, tais como, matas nativas, cerrados, Floresta Estadual Navarro de Andrade, em Rio Claro, áreas de mineração, malha viária, rede hidrográfica e áreas urbanas.

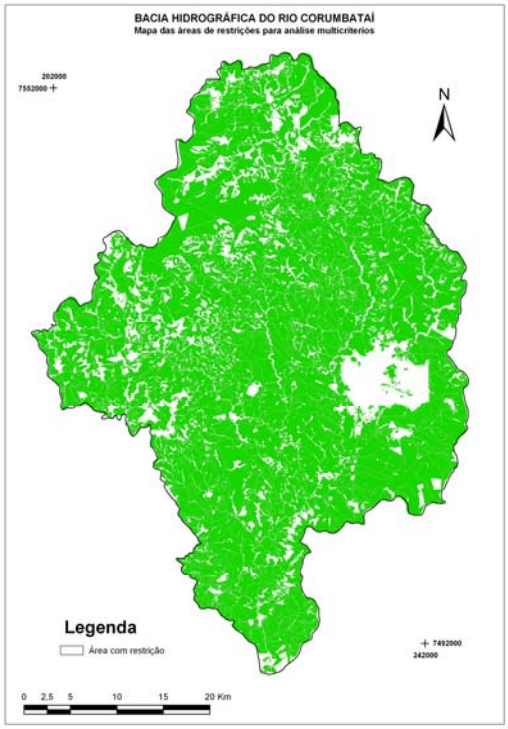


Figura 24 - Mapa de áreas de restrição para análise multicritérios da bacia do Rio Corumbataí. Fonte: Vettorazzi (2006)

3.3.3 Padronização

Todos os mapas de fatores foram padronizados a uma escala comum de 0-255, processo este essencial, já que os fatores apresentam diferentes unidades de medida. A padronização permitiu que os fatores estivessem valorados em uma unidade comum de medida, o grau de prioridade, tornando-os comensuráveis e passíveis de agregação pela análise multicritérios.

3.3.4 Fluxo do modelo de avaliação

No fluxo do modelo de avaliação utilizado (Figura 25) é possível observar as etapas a serem transcorridas para que o mapa de adequação seja gerado.

Primeiramente deve-se garantir que os fatores definidos estejam num mesmo sistema de valoração escalar e, para tanto, cada mapa fator é submetido ao processo de padronização, gerando, assim, mapas padronizados com células valoradas entre 0 e 255.

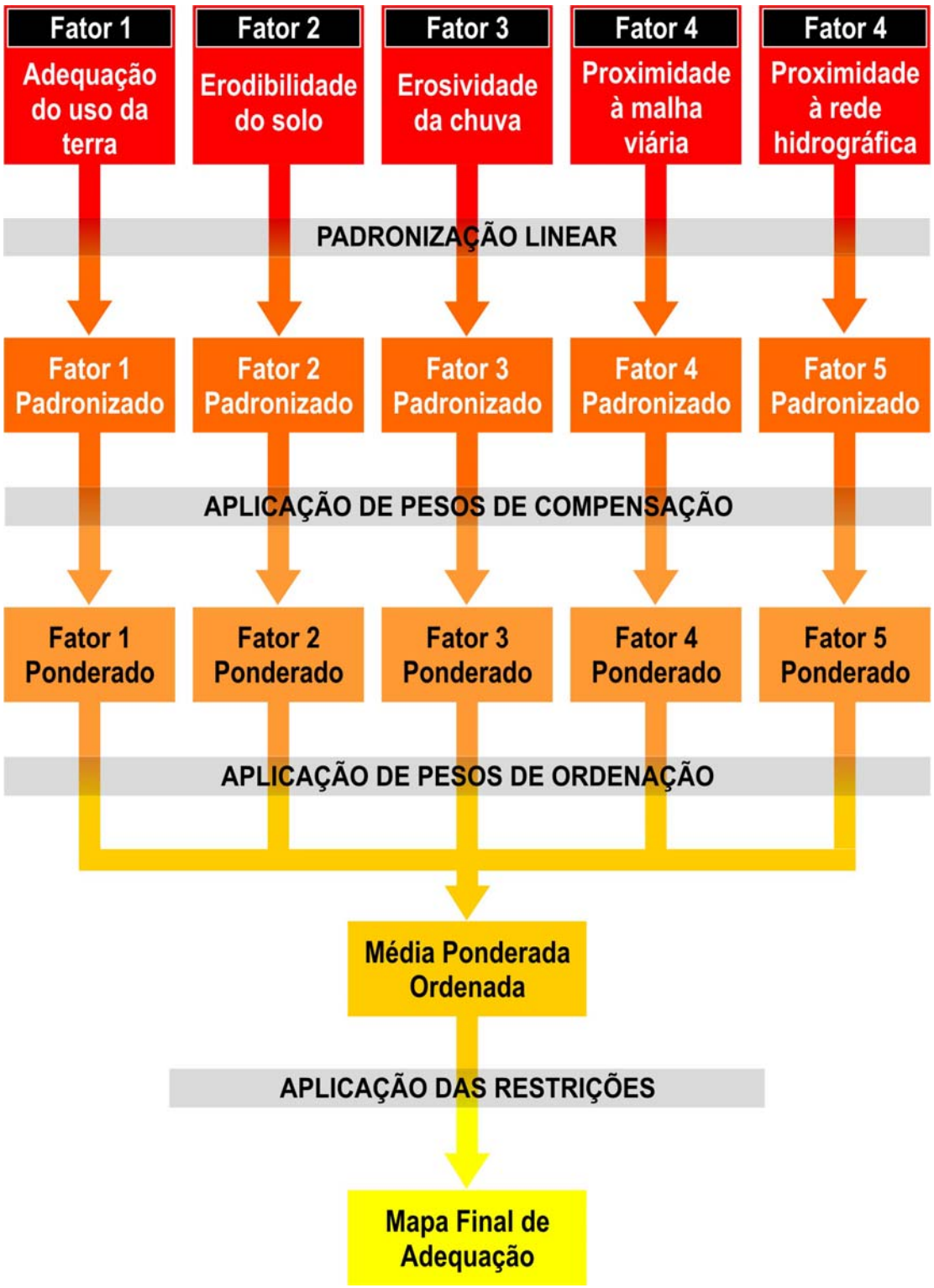


Figura 25 - Fluxo do modelo de avaliação multicritérios utilizado na geração de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos

Baseado nos valores de importância relativa informados na matriz de comparação pareada ocorre a segunda etapa de transformação de valores nos mapas de fatores. Esta etapa caracteriza-se pela aplicação dos pesos de compensação produzindo como resultados mapas ponderados de acordo com os respectivos pesos. Nesta etapa também é produzido um mapa de adequação segundo o método CLP.

Na terceira etapa são aplicados, nos mapas ponderados, os pesos de ordenação que caracterizam o método MPO. Os pesos de ordenação são aplicados na ordem em que os fatores são definidos no processo de ranqueamento. O produto aqui gerado é o mapa de adequação segundo o método MPO.

A última etapa consiste em retirar do mapa de adequação as áreas que não são adequadas à finalidade proposta na análise multicritérios. Assim, as restrições são aplicadas ao mesmo, gerando o mapa final de adequação.

3.3.5 Exatidão dos mapas de áreas prioritárias

A última fase do processo de desenvolvimento de um software consiste em validar os resultados por ele produzidos, já que a confiabilidade nas informações que podem ser obtidas a partir destes produtos é essencial nos processos decisórios. Nenhuma decisão deve ser baseada em dados e informações não confiáveis. Assim, parâmetros que possibilitem a quantificação exata do mapa produzido são essenciais nestes casos, para determinar o índice de exatidão dos mapas gerados. Segundo Mangabeira (2002) um dos parâmetros mais utilizados e eficientes na determinação da exatidão é o índice Kappa (k), o qual é obtido mediante a adoção de uma referência para a comparação dos mapeamentos produzidos. Matsukuma (2002) corrobora com isso afirmando que a avaliação do desempenho dos algoritmos de classificação digital baseia-se comumente na matriz de erros e do índice Kappa. Neste processo, há a comparação entre a verdade terrestre e os resultados obtidos com a classificação digital. Similar a classificação digital, o FGest produz mapas temáticos composto por classes, o que justifica o uso do índice de Kappa na verificação de seus resultados.

A verificação da exatidão dos mapas de áreas prioritárias gerados após a aplicação dos métodos Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada foi feita pela comparação pixel a pixel dos referidos mapas, tomando como base dados

de referência conhecidos através de mapas produzidos por Vettorazzi (2006), que aplicou os mesmos métodos, com uso do software Idrisi Kilimanjaro.

Na a área de estudo deste trabalho, os mapas raster possuem 3441 linhas e 2445 coluna, totalizando 8.413.245 células. Para realizar a comparação total dos mapas de áreas prioritária à restauração florestal gerados, um algoritmo foi desenvolvido com objetivo de automatizar e viabilizar esta tarefa. Este algoritmo gera uma matriz de confusão com a exatidão das classes geradas e possibilita assim realizar o cálculo do índice de Kappa para cada um dos mapas de áreas prioritárias gerados pelo FGest.

O índice Kappa consiste em uma análise multivariada discreta, que tem como base o uso de uma matriz de erros, também chamada de matriz de confusão ou de contingência, para estimar a exatidão do mapa.

Segundo Ponzoni e Almeida (1996) a partir de uma matriz de erros (Tabela 3), existem várias maneiras de estimar a exatidão de um mapa temático. Dentre elas destaca-se a estimativa do índice de Kappa (k), baseado no uso da análise multivariada discreta, que é utilizada como medida de concordância entre o mapa e a referência que se tem adotado para a estimativa da exatidão. Se esta referência for a verdade terrestre, o valor de k expressaria a concordância entre os dados gerados e a realidade de campo. Já, no caso desta referência ser outro mapa temático, o valor de k expressaria então o grau de concordância entre dois mapas temáticos. De acordo com Congalton et al. (1983), esse parâmetro é calculado pela form. (12):

Tabela 3 - Exemplo de matriz de erro ou confusão, com destaque para a diagonal principal

MAPA	VERDADE TERRESTRE						
	Classe 1	**Classe 2**	**Classe 3**	**Classe 4**	**Classe 5**	**Classe 6**	**Total**
Classe 1	**42**	2	1	0	0	0	45
Classe 2	2	**38**	0	0	0	1	41
Classe 3	0	0	**27**	0	1	0	28
Classe 4	0	0	1	**9**	0	0	10
Classe 5	0	0	0	1	**9**	0	10
Classe 6	0	0	0	0	0	**8**	8
Total	44	40	29	10	10	9	142

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r} (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^{r} (x_{i+} * x_{+i})} \tag{12}$$

sendo que: r é o número de linhas da matriz

x_{ii} é o número de observações na linha i e coluna i que se refere a cada elemento da diagonal principal;

x_{i+} e x_{+i} são aos totais marginais da linha i e da coluna i, respectivamente; e

N é o número total de observações da matriz de erros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho serão apresentados e discutidos em duas etapas. Primeiramente as discussões referem-se ao *software* desenvolvido, o FGest, que possibilita a utilização de análise multicritérios em dados espaciais. Software é um elemento de sistema lógico que é constituído de instruções, estruturas de dados e documentação, e é o produto final de um projeto de desenvolvimento de um sistema de informação, que deve atender as necessidades apontadas durante a fase de análise de requisitos, com desempenho de execução otimizado e gerar bons resultados em cada etapa de processamento.

Em uma segunda etapa serão discutidos os resultados da validação do FGest em comparação com informações conhecidas.

4.1 Desenvolvimento e comunicação do FGest

O ambiente de desenvolvimento utilizado, juntamente com a linguagem de programação C#, mostraram-se uma excelente escolha, porque propiciaram ao desenvolvedor um trabalho respaldado em vasta documentação, juntamente com boas opções de objetos para criar um software com interface amigável com o usuário. As ferramentas para montagem de painéis, botões e caixas de texto, dentre outras, associadas aos recursos da linguagem, tornaram a tarefa de programação bastante segura e facilitada. A linguagem C# apresenta, também, grande potencial para trabalhar com *array* que foi recurso importante nos algoritmos desenvolvidos para as avaliações CLP e MPO.

O primeiro ponto a ser discutido diz respeito à forma de comunicação do FGest com outros softwares. Em termos de comunicação com SIGs, o FGest possui algoritmos de importação e exportação de mapas *raster* para o Spring, enquanto que para o ArcGIS o FGest lê diretamente os arquivos *raster* gerados através das ferramentas Raster to ASCII e grava arquivos de mesmo tipo para ser lido pela ferramenta ASCII to Raster, ambas pertencentes ao módulo ArcToolBox do ArcGIS.

O FGest foi modelado para trabalhar com um tipo padrão de mapa *raster*, que possibilita a comunicação com outros sistemas e SIGs, bastando para tanto que estes também tenham opção de uso de mapas *raster* e que permitam leitura e gravação dos mesmos no formato ASCII. A vantagem de o FGest trabalhar com um padrão de mapa *raster* consiste em que os algoritmos de processamento de padronização de fatores, ranqueamento e das avaliações pelos métodos CLP e MPO e suas respectivas sub-rotinas não necessitam serem reestruturados quando fontes de dados diferentes dos padrões Spring e ArcGIS forem utilizadas..

Para que dados de outros SIGs, diferentes dos dois citados anteriormente, sejam usados nas avaliações multicritérios, duas alternativas podem ser utilizadas. A primeira delas é o desenvolvimento de uma nova rotina de importação e exportação de dados, que transforme os mapas *raster* da nova fonte para o padrão FGest. Para tanto, é necessário que um profissional desenvolva esta rotina em C#, compile e gere um novo arquivo executável para o FGest. A segunda alternativa, e a mais simples delas, é editar o mapa *raster* no formato ASCII, gerado pela nova fonte, utilizando um editor de texto, por exemplo, o editor “bloco de notas” do Windows, deixando-o no padrão FGest. A tarefa de edição é restrita às informações de como o mapa *raster* é montado, já que a diferença entre o padrão do FGest e o padrão dos outros softwares se dá na forma em como estas informações são apresentadas no formato ASCII.

O padrão de arquivo ASCII do FGest é dividido logicamente em duas partes. A primeira parte, chamada de cabeçalho, consiste em dados correspondentes às informações que montam o mapa *raster*, que são o número de colunas, número de linhas, dados do sistema de coordenadas espaciais, resolução espacial e valor utilizado para células com dados nulos. No Quadro 4 é apresentado um exemplo de cabeçalho de um mapa *raster* no padrão FGest. Neste exemplo, o mapa *raster* possui 2445 colunas, 3441 linhas e resolução espacial com células de tamanho igual a 20 metros. Ainda neste exemplo, tem-se que a primeira célula do mapa *raster* encontra-se na posição UTM com coordenada E 199200 m e coordenada N 7487635 m. Por último as células que deverão ser consideradas nulas durante o processamento possuem valor -9999.

ncols	2445
nrows	3441
xllcorner	199200
yllcorner	7487635
cellsize	20
NODATA_value	-9999

Quadro 4 - Cabeçalho de arquivo do padrão FGest, correspondente à configuração de mapa *raster*

A segunda parte da divisão lógica do arquivo ASCII padrão FGest, é chamada de corpo do arquivo, consistindo em dados numéricos distribuídos em colunas e linhas correspondentes ao formato do mapa, e que constituem os respectivos valores de cada célula. No Quadro 5 é mostrada parte do corpo de um arquivo no formato ASCII, onde podem ser observados dados numéricos que correspondem aos valores de células que compõem o mapa *raster*.

-9999 -9999 -9999 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 24 38
38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 38 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39 39 51 51
51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 51 63 63
63 63 63 63 63 63 63 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 6463 63 6
96 96 96 96 96 96 96 96 96 97 97 97 97 97 97 98 98 98 98 98 98 98 98 98 99 99 99
63 63 63 63 63 63 63 63 63 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64 64

Quadro 5 - Corpo de arquivo do padrão FGest, correspondente a parte de mapa *raster*

Outro ponto que merece destaque nas discussões dos resultados foi a inserção, no software desenvolvido, do algoritmo de padronização de mapas *raster*, já que os mesmos podem ser importados dos SIGs com valores de células que tornem impossíveis os processos de agregação utilizados nas avaliações multicritérios do FGest.

Jiang e Eastman (2000) afirmam que uma maneira de padronizar dados de valores quantificados de formas diferentes é através do processo de reescalonamento

dos valores das células em uma nova faixa de valores em uma base numérica comum. Como os mapas *raster* nem sempre se apresentam em uma base de dados numérica comum, o FGest foi munido da rotina de padronização, que teve objetivo de equacionar esse descompasso de valoração de critérios. Como a representação contínua da paisagem é importante em processos de avaliação multicritérios e que Valente (2005) afirma que é possível fazer a representação contínua da paisagem baseada na lógica *Fuzzi*, esta lógica foi introduzida na rotina de padronização de mapas *raster* do FGest, que apresenta como resultado a geração de mapas *raster* através de uma padronização linear com faixa de valores de cada atributo numa escala numérica que se inicia em zero e vai até duzentos e cinqüenta e cinco (8 bits).

Um resultado bastante importante no desenvolvimento do FGest diz respeito ao ranqueamento de fatores. Observando o conceito da Média Ponderada Ordenada, introduzido por Yager (1988), é possível ver que o controle contínuo sobre o grau de ANDness e de ORness e sobre o grau de compensação (*tradeoff*) entre critérios é definido pelos pesos que os critérios recebem com base em sua ordem de ranqueamento. Assim, estabelecer o ranqueamento dos fatores é um passo importante no processo de avaliação MPO. O resultado do ranqueamento indica o grau de influência do fator no processo de análise. Valente (2005) e Vettorazzi (2006), utilizando o *software* Idrisi Kilimanjaro, descrevem método para estabelecer o ranqueamento da importância dos fatores na análise, em que o usuário deve executar repetidas operações até que o ranqueamento esteja completo. Assim, foi desenvolvido e acrescentado ao FGest um algoritmo em que o próprio *software* apresenta o ranqueamento ao usuário de forma automática, o que gera ganho de tempo no processo e minimiza a possibilidade de erro no ranqueamento, já que a interferência humana no processo é menor.

Também é relevante nas discussões o tratamento das funcionalidades do FGest. Uma visão macro das funcionalidades do sistema ajuda ao desenvolvedor e ao usuário entender o funcionamento do mesmo. Bezerra (2007) afirma que uma excelente maneira de um observador entender o funcionamento de um sistema é através do diagrama de casos de uso. A análise de um diagrama deste tipo consiste em ver as interações do sistema e de agentes externos que utilizam este sistema.

A Figura 26 mostra o Diagrama de Casos de Uso do FGest, onde podem ser observadas as principais funcionalidades do mesmo. Neste diagrama pode ser visto que o ator que interage com os processos do sistema é chamado de Analista, que representa qualquer pessoa que faça uso do FGest para análise multicritérios. Uma funcionalidade do sistema na maioria das vezes é desdobrada em vários algoritmos durante o processo de desenvolvimento, utilizando a técnica “dividir para conquistar”.

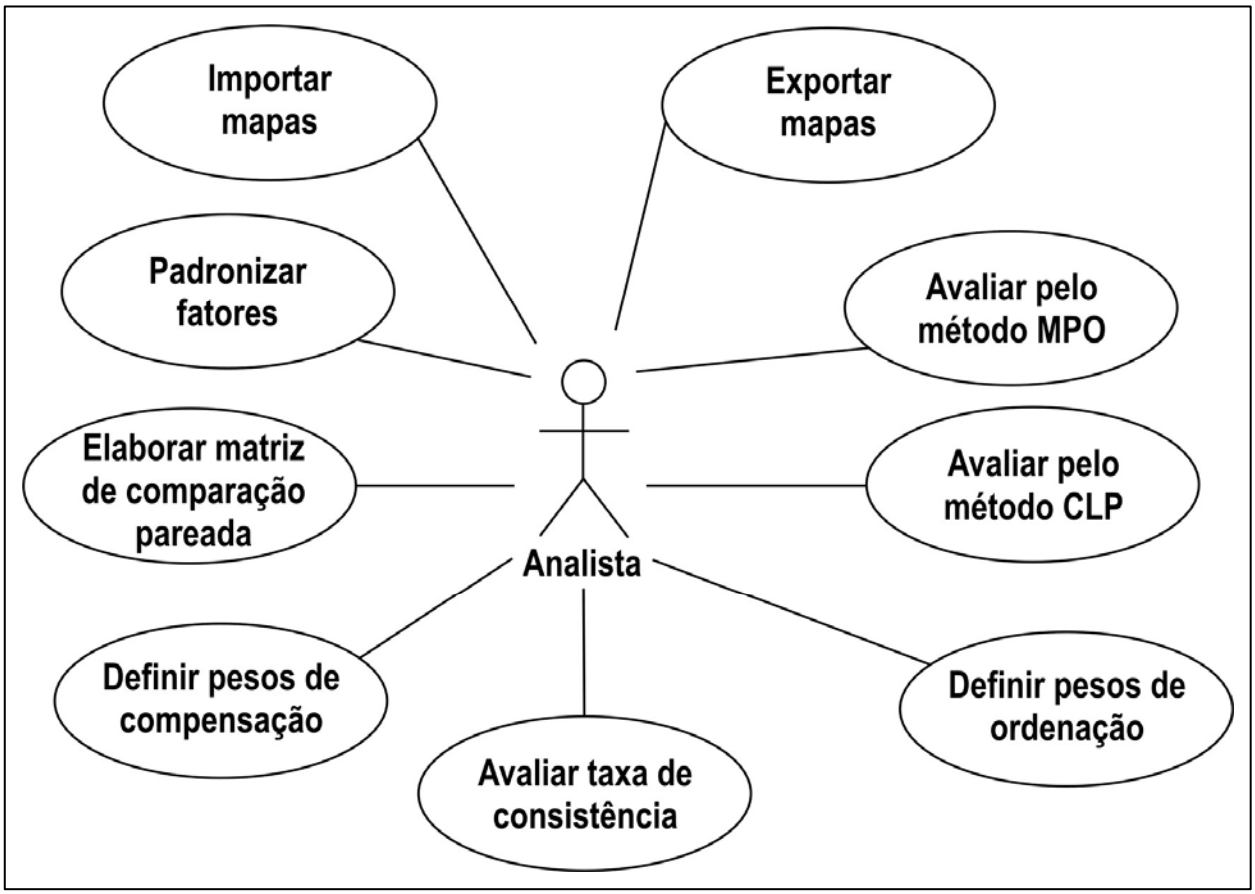


Figura 26 - Diagrama de casos de uso do FGest

“Dividir para conquistar” é uma técnica muito usada em toda ciência da computação e diz respeito a minimizar a complexidade de desenvolvimento e execução de algoritmos. Consiste em dividir o problema em instâncias menores, resolvendo estas instâncias de forma mais simplificada e depois agrupando as soluções.

Diante do exposto, pode-se ressaltar que o código fonte do FGest, possui divisão lógica em unidades funcionais, estando segmentado em vários blocos logicamente

relacionados, o que possibilitou uma prática muito importante que é o reuso de trechos de código que operam sobre dados diferenciados. Cada bloco segmentado foi desenvolvido com propósito único e claro, o que facilita a legibilidade, depuração, manutenção e reutilização do mesmo, o que também propiciou maior confiabilidade do produto final, já que houve verificação independente e extensiva por módulos antes do uso dos mesmos.

Todas as funcionalidades do FGest encontram-se distribuídas entre os vários algoritmos existente no código fonte escrito na linguagem de programação C#. Os algoritmos muitas vezes estão subdivididos em algoritmos menores, encarregados de executar atividades específicas de processamento, o que garante maior agilidade do sistema e, ainda, a reutilização de rotinas durante o processo de desenvolvimento. Os algoritmos principais do FGest são:

- ✓ Importação e exportação de mapas
- ✓ Definição de fatores e restrições
- ✓ Padronização de fatores
- ✓ Avaliação multicritérios pelo método CLP
- ✓ Ranqueamento dos fatores segundo grau de influência na avaliação CLP
- ✓ Avaliação multicritérios pelo método MPO

Um problema freqüente em relação a sistemas de informação refere-se à capacidade do sistema em ter seu código fonte interpretado corretamente sempre que manutenções forem necessárias, tanto para correção do mesmo quanto para a inserção de novos algoritmos. Deve ser lembrado que um sistema de informação é definido com um todo composto por partes, que se interagem perfeitamente para atingir um mesmo objetivo. A deficiência na tarefa de interpretar corretamente o código fonte de um sistema pode ocasionar durante a manutenção, ou precocemente durante o projeto de desenvolvimento, um sistema com partes ou rotinas que não se complementem adequadamente, diminuindo assim a vida útil do mesmo. Bezerra (2007) mostra que as etapas de um projeto de sistema de informação são: Levantamento de requisitos; análise de requisitos; projeto; implementação; testes e implantação. Para a manutenção de um sistema estas etapas também devem ser consideradas. A vida útil de um sistema

encerra-se quando as etapas existentes no ciclo de vida do mesmo tornam-se onerosas ao ponto de não ser compensador continuar com processos de manutenção e propor o desenvolvimento de um sistema totalmente novo.

Atento ao exposto, durante o desenvolvimento do FGest sempre houve a preocupação em deixar o código fonte escrito de tal forma documentado que possa ser interpretado por outras pessoas, que não o seu desenvolvedor, prática esta que cria vantagens para uso do mesmo na incrementação do próprio projeto ou na utilização do código na sua totalidade ou em parte em outros projetos.

Outro ponto a ser considerado e discutido é a capacidade de processamento e tempo de resposta do software. Para avaliar a capacidade de processamento do FGest, foram realizados testes com simulação de uma área de estudo. Estes testes mostraram que o sistema desenvolvido comporta processamento de avaliação multicritérios, tanto pelo método CLP quanto pelo método MPO, cujo tamanho da matriz tridimensional, que armazena os critérios, contenha até 97.200.000 (noventa e sete milhões e duzentas mil) células. Em uma primeira simulação foram realizadas avaliações que envolveram cinco mapas critérios e um mapa restrição. Cada um desses mapas *raster* foi composto de 4050 linhas e 4000 colunas, contendo, então, 16.200.000 (dezesseis milhões e duzentas mil) células, com resolução espacial de 20 metros cada, o que representa uma área de estudo equivalente a 6.480 Km^2 (seis mil quatrocentos e oitenta quilômetros quadrados). Em outra simulação, também com cinco mapas critérios e em uma escala de trabalho mais generalizada e resolução espacial de 50 metros, a capacidade de processamento foi correspondente a uma área de 40.500 Km^2 (quarenta mil e quinhentos quilômetros quadrados). Nestas duas simulações o tempo médio gasto para processamento das avaliações CLP e de três cenários MPO foi de 77 s e 104 s, respectivamente, utilizando um *hardware* com processador Intel® Core™ 2 Duo e 2048 MB DDR SDRAM e sistema operacional Windows XP.

Outro ponto importante nas discussões de um sistema de informação refere-se ao produto final e subprodutos resultantes de processamentos do mesmo. O produto final gerado pelo FGest é o mapa resultante do processo da avaliação multicritérios pelo método MPO. Porém, produtos intermediários são gerados através das várias rotinas

de processamento, como o mapa de avaliação pelo método CLP, mapas padronizados pelo método *Fuzzy* e a lista dos fatores gerada pelo processo de ranqueamento.

Utilizando o diagrama de fluxo de dados (DFD) (Figura 27) é possível observar quando os dados entrados no sistema são processados e transformados, o que possibilita um ótimo entendimento do funcionamento do mesmo, complementando, assim, a visão obtida pela análise do diagrama de casos de uso visto anteriormente.

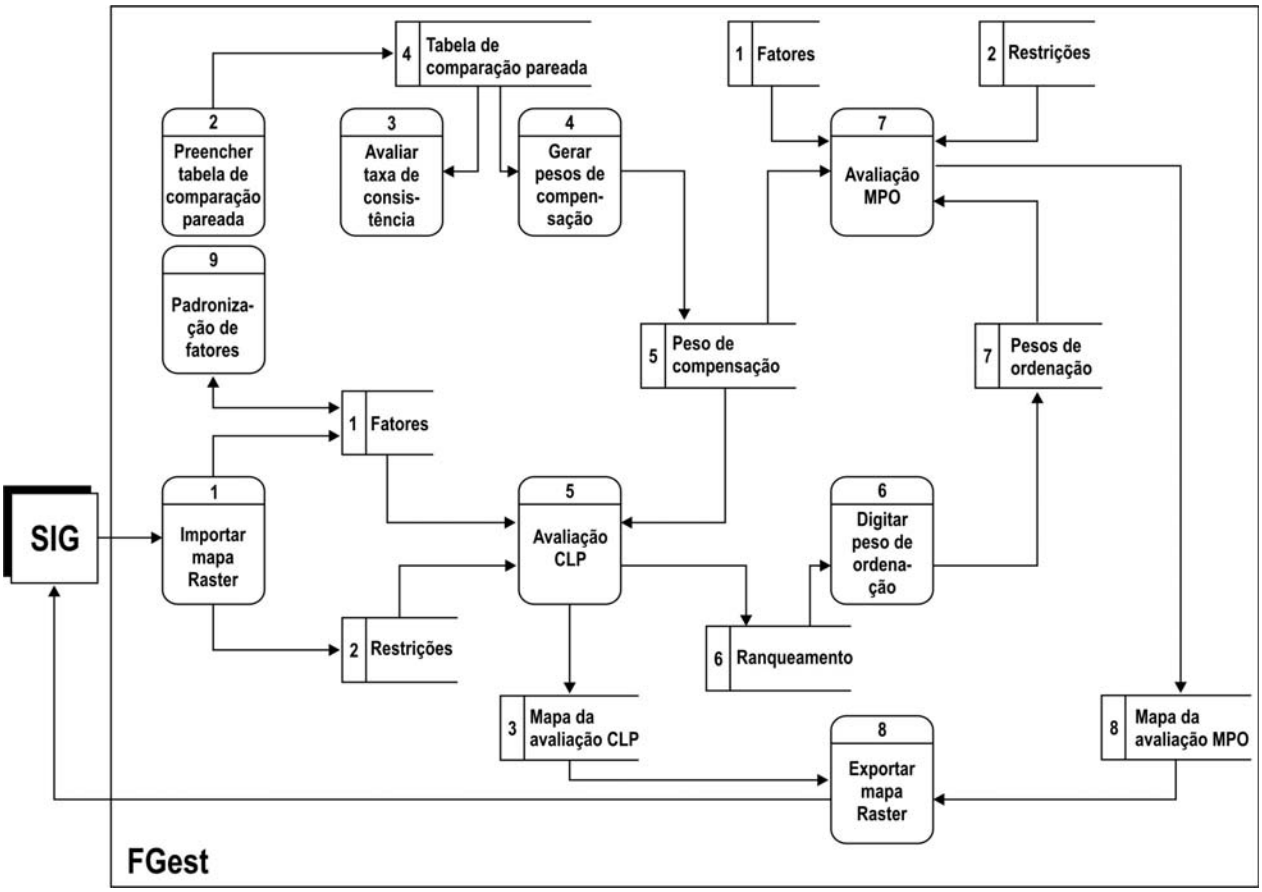


Figura 27 - Diagrama de fluxo de dados do FGest

Os processos de transformação são visualizados como retângulos em pé e com cantos arredondados, enquanto que os repositórios de dados são visualizados por duas linhas horizontais paralelas, fechadas pelo lado esquerdo e abertas pelo lado direito. Já as setas indicam o sentido dos dados entre os processos de transformação. No diagrama apresentado, o SIG é a entidade externa ao sistema FGest e se comunica com o mesmo através dos processos de importação e exportação de mapas *raster*.

Para entender a geração dos produtos pelo FGest, deve-se analisar o DFD iniciando pelo processo 1 (importar mapa *raster*), que é responsável por uma das entradas de dados no sistema e, que recebe do SIG mapas critérios *raster* no formato ASCII. Este processo faz um processamento de validação dos mapas e os armazena nos repositórios identificados como Fatores e Restrições.

O processo 9 (padronizar fatores), quando utilizado, busca os mapas fatores no repositório 1, padroniza-os segundo a lógica *Fuzzy*, como discutido anteriormente, e os devolve ao mesmo repositório.

Outro ponto de entrada de dados no FGest é por intermédio do processo 2 (preencher tabela de comparação pareada), que recebe do usuário as importâncias relativas de cada fator importado no processo 1. Estes dados são armazenados no repositório 4 (tabela de comparação pareada) e são utilizados na rotina que gera os pesos de compensação, executada no processo 4 (gerar pesos de compensação). O processo 3 (avaliar taxa de consistência) é responsável por verificar a coerência dos dados informados na tabela de comparação pareada, sendo fundamental para que bons resultados possam ser produzidos nas avaliações multicritérios pelos métodos CLP e MPO.

Os pesos de compensação são a base da avaliação CLP, que pondera e combina os mapas fatores e restrições, gerando o mapa de avaliação CLP. O processo 5 (avaliação CLP) é responsável por gerar o mapa de avaliação CLP, que é armazenado no repositório 3 (mapa da avaliação CLP) e o ranqueamento da importância dos fatores que fica armazenado no repositório 6 (ranqueamento).

Outra entrada de dados ocorre no processo 6 (digitar pesos de ordenação), onde o usuário, baseado no ranqueamento da importância dos fatores, informa os pesos de ordenação, que ficam no repositório 7 (pesos de ordenação).

O processo 7 (avaliação MPO) busca dados nos repositórios fatores, restrições, pesos de compensação e pesos de ordenação, e gera o mapa de avaliação MPO enviado para o repositório 8.

Fechando o ciclo de processamento do FGest, o processo 8 (exportar mapa *raster*) busca dados nos repositórios 3 (mapa da avaliação CLP) e 8 (mapa da

avaliação MPO) e os coloca no padrão SIG de mapa *raster* com formato ASCII, para serem lidos pelo SIG que originou todo o processamento descrito.

Então, em uma análise mais simples, são produtos do FGest os mapas de fatores padronizados, gerado no processo 9, pesos de compensação, gerados no processo 4, mapa da avaliação CLP e lista de ranqueamento da importância dos fatores, gerados pelo processo 5, e o mapa de avaliação MPO, gerado pelo processo 8.

4.2 Validação do FGest

Os demais resultados deste trabalho foram produzidos no processo de validação do FGest e resultantes dos processos de avaliação multicritérios, segundo os métodos CLP e MPO, para produção de mapas de áreas prioritárias à restauração florestal, na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos.

Ponto importante em atividades de processamento de dados é o tempo de resposta que o software utiliza para gerar resultados, sempre que um comando é acionado. Antes mesmo de apresentar os mapas de áreas prioritárias, é importante colocar que o tempo de resposta da execução das avaliações multicritérios, tanto para o método CLP quanto para o método MPO, podem ser bem avaliados, considerando o tamanho da área de estudo deste trabalho. Nas avaliações multicritérios foram utilizados cinco mapas fatores e um mapa de restrições, todos no formato *raster*, com 3441 linhas, 2445 colunas e resolução espacial de 20 metros. A área considerada na avaliação corresponde ao produto das linhas e colunas do mapa *raster*, totalizando 3.365,298 Km^2, enquanto que a área da bacia hidrográfica do rio Corumbataí, objeto de estudo desta validação, é de aproximadamente 1.710 Km^2. A execução da validação do FGest ocorreu em um computador com processador Intel® Core™ 2 Duo e 2048 MB DDR SDRAM e sistema operacional Windows XP. Após várias tomadas de tempo, o tempo médio de resposta para gerar o mapa *raster* da avaliação CLP no formato ASCII, foi de 40 segundos, enquanto que para gerar três mapas *raster*, correspondentes aos cenários Risco médio/baixo, risco médio e risco médio/alto, da avaliação MPO foi de 54 segundos.

4.2.1 Ponderação dos atributos

Considerando que as variáveis que interferem na escolha de áreas prioritárias à restauração florestal na bacia do Rio Corumbataí, SP, visando à conservação de recursos hídricos, contribuem com pesos diferenciados no processo final de decisão, estabeleceu-se uma ponderação de acordo com a importância de cada uma para a aptidão da área.

O FGest possibilita o cálculo dos pesos de compensação através da comparação da importância relativa das variáveis duas a duas, diminuindo a subjetividade na decisão. O peso de compensação de cada variável foi estimado através do método Analytical Hierarchy Process (AHP) aplicado à matriz de comparação pareada. Os pesos obtidos estão apresentados no Quadro 6. A relação de importância entre cada par de fatores foi obtida por Vettorazzi (2006), tendo sido quantificada empregando-se a escala contínua de nove pontos, o que possibilitou o cálculo do peso de cada fator.

A Taxa de Consistência (TC) calculada foi 0,06, considerada adequada segundo Saaty (1980), não havendo a necessidade de reorganização da matriz, por meio da alteração dos valores de comparação entre fatores.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	**Pesos**
Fator 1	1					**0,1570**
Fator 2	1	1				**0,2425**
Fator 3	1/5	1/5	1			**0,0440**
Fator 4	2	1/3	3	1		**0,1541**
Fator 5	3	2	7	3	1	**0,4024**

Quadro 6 - Pesos de compensação obtidos através da matriz de comparação pareada

Notas: Taxa de Consistência (TC) = 0,06

Fator 1: adequação do uso do solo; Fator 2: erodibilidade do solo; Fator 3: erosividade da chuva; Fator 4: proximidade à malha viária; Fator 5: proximidade à rede hidrográfica.

4.2.2 Mapa de áreas prioritárias segundo método CLP

A ferramenta Avaliação CLP do FGest possibilita a montagem da tabela de comparação pareada através do comando Busca fator/Adiciona. É possível verificar se

os dados de importância relativa estão dentro da faixa de valores possíveis (de um a nove) através do comando Validação. Já o comando Cálculo gera os pesos de compensação para os fatores, de acordo com a importância relativa informada. Este comando também calcula a Taxa de Consistência.

É possível realizar, se necessário, pequenos ajustes nos pesos calculados, sendo obrigatório, então, utilizar o comando Cálculo taxa de consistência, para validar as alterações.

Antes de executar o comando Executar avaliação método CLP é necessário definir o endereço e nome do mapa de adequação que será gerado, operação esta feita através do comando Arquivo destino.

A Figura 28 mostra a tela e dados de avaliação pelo método CLP.

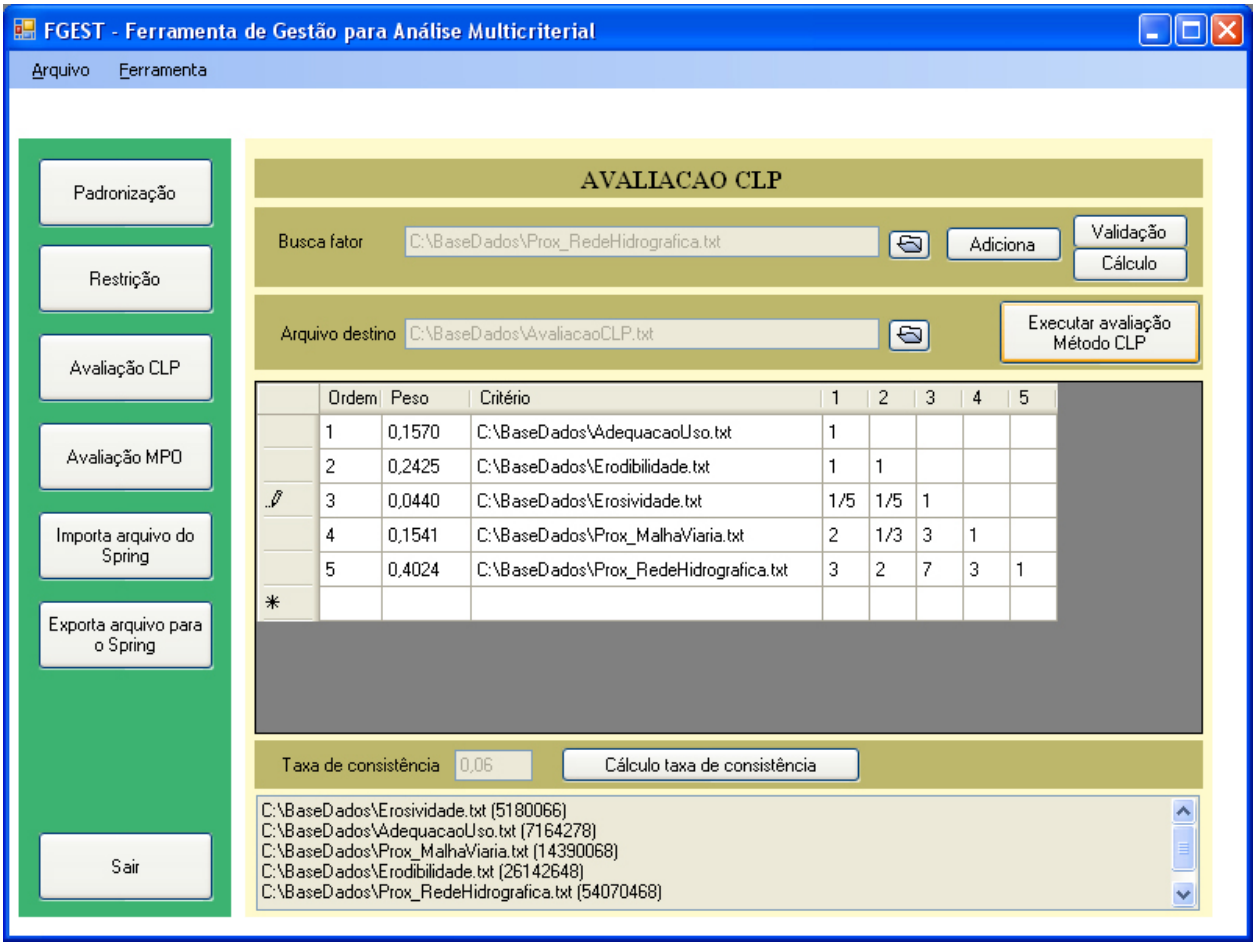


Figura 28 - Tela de avaliação multicritérios pelo método CLP

A Taxa de Consistência (TC) obtida foi de 0,06, valor este menor que o limite máximo de 0,10 proposto por Saaty (1980), indicando que os valores de comparação entre os fatores estão adequados.

O fator de maior peso foi a proximidade à rede hidrográfica (0,4024), seguido de erodibilidade (0,2425), adequação do uso do solo (0,1570), proximidade à malha viária (0,1541) e, finalmente, erosividade (0,0440).

A execução da avaliação no modelo Combinação Linear Ponderada resultou em um primeiro mapa de áreas prioritária (Figura 29).

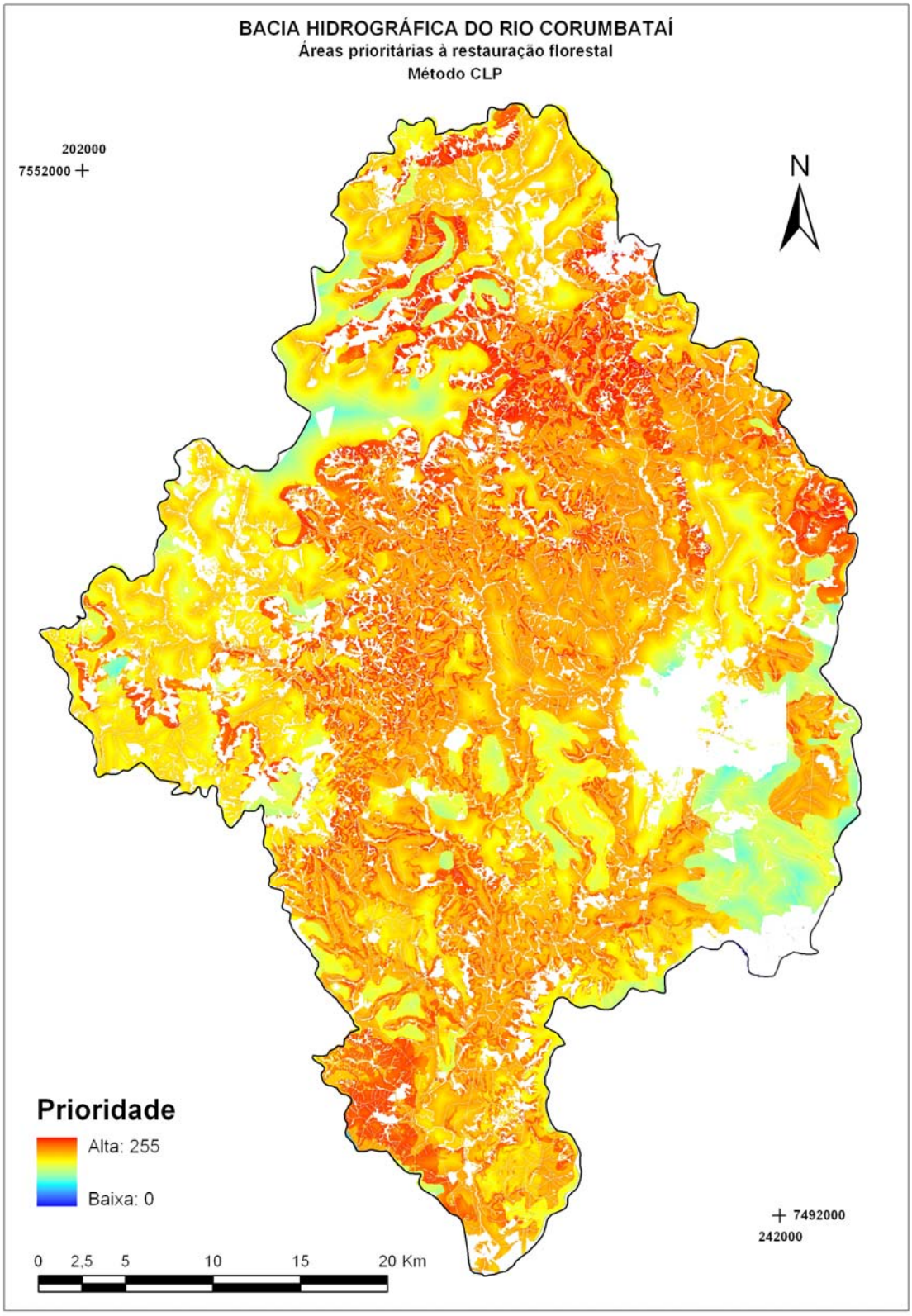


Figura 29 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (escala contínua de prioridades)

4.2.3 Ranqueamento

O ranqueamento proposto pelo FGest após o processo de avaliação pelo método CLP deve ser utilizado para definir a ordem inversa de influência dos fatores no resultado final.

Este ranqueamento é um dos resultados apresentados pelo comando Avaliação CLP e o quadro inferior da tela de avaliação CLP (Figura 30) mostra o ranqueamento realizado neste trabalho: O fator menos influente é o Erosividade da chuva, seguido por Adequação ao Uso, Proximidade à malha viária, Erodibilidade do solo e, finalmente, pelo fator Proximidade à rede hidrográfica, que é o mais influente.

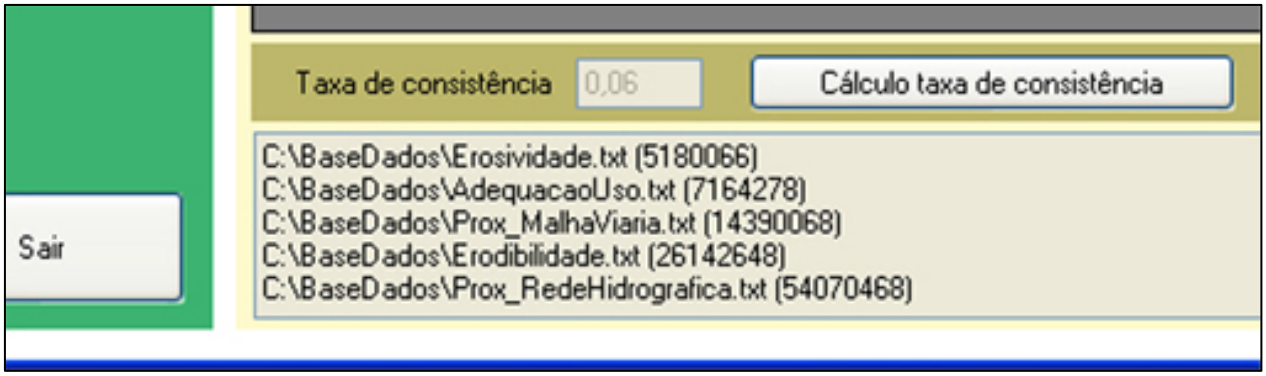


Figura 30 - Resultado do ranqueamento. Ordem inversa de influência dos fatores

4.2.4 Mapa de áreas prioritárias segundo método MPO

No método da MPO, dada a flexibilidade do mesmo na produção de cenários com diferentes níveis de risco e compensação, utilizando a ferramenta MPO do FGest, foram gerados dois mapas de áreas prioritárias, correspondendo às situações de risco médio/baixo com nível médio de compensação (Figura 31), e risco médio/alto, com nível médio de compensação (Figura 32).

Antes de executar o processo de avaliação, no método MPO é necessário definir os pesos de ordenação, apresentados no Quadro 7.

Fatores (em ordem inversa de grau de influência sobre o resultado final)							
	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	**Risco**	**Compensação**
Risco médio/baixo, compensação média	0,4300	0,2639	0,1900	0,0941	0,0220	**0,7464**	**0,6465**
Risco médio, compensação total (equivalente à CLP)	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	**0,5000**	**1,0000**
Risco médio/alto, compensação média	0,0220	0,0941	0,1900	0,2639	0,4300	**0,2536**	**0,6465**

Quadro 7 - Pesos de ordenação para dos fatores no método Média Ponderada Ordenada

Nota: Fator 1: erosividade da chuva; Fator 2: adequação do uso do solo; Fator 3: proximidade à malha viária; Fator 4: erodibilidade do solo; Fator 5: proximidade à rede hidrográfica.

4.2.5 Reclassificação dos mapas de áreas prioritárias

Para melhor visualizar os mapas de áreas prioritárias nos métodos CLP e MPO, cada mapa foi reclassificado em cinco categorias (classes de mesma amplitude), com graus de prioridade para a restauração florestal apontados como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, que podem ser visualizados nas Figuras 33, 34 e 35.

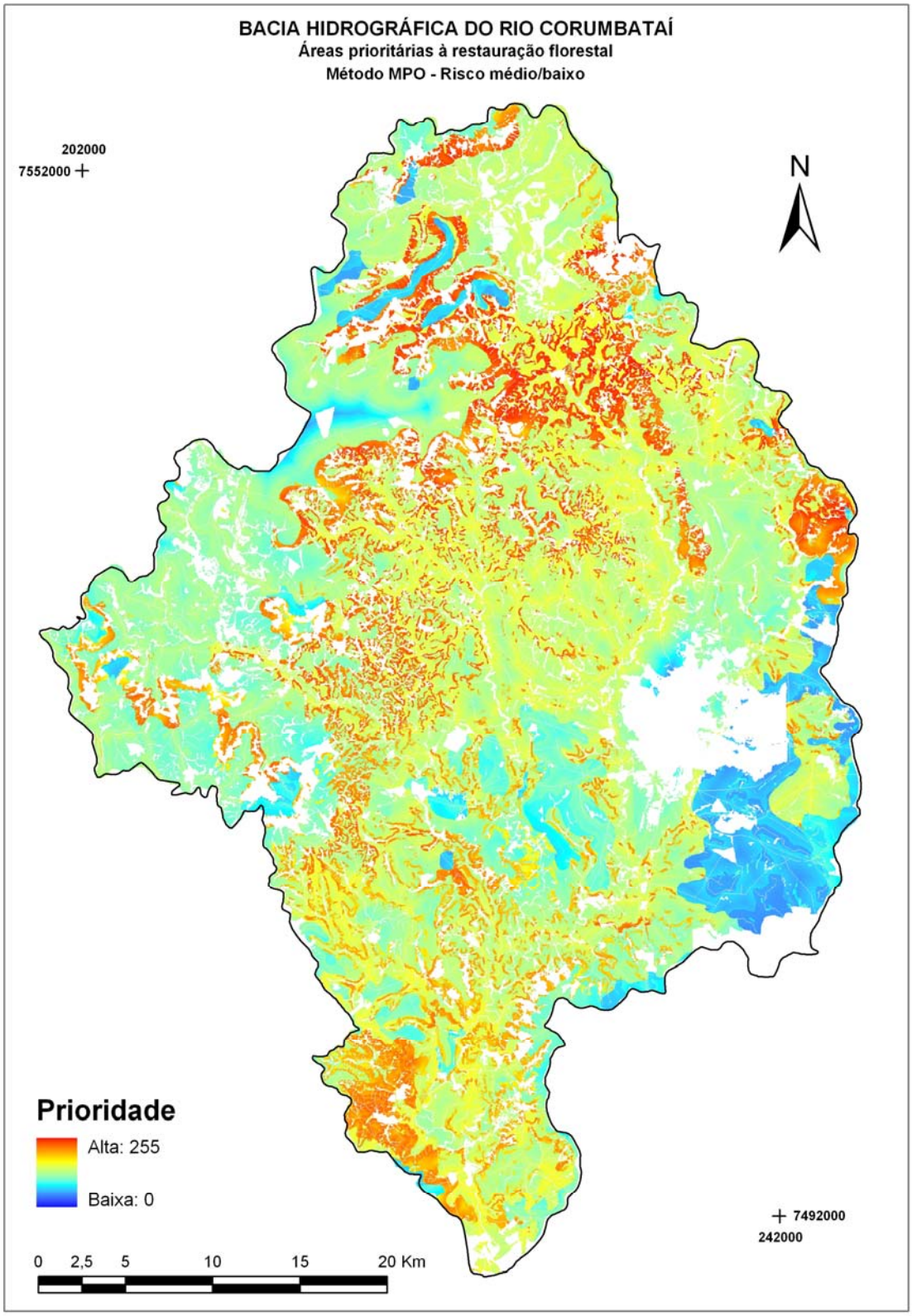


Figura 31 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (escala contínua de prioridades)

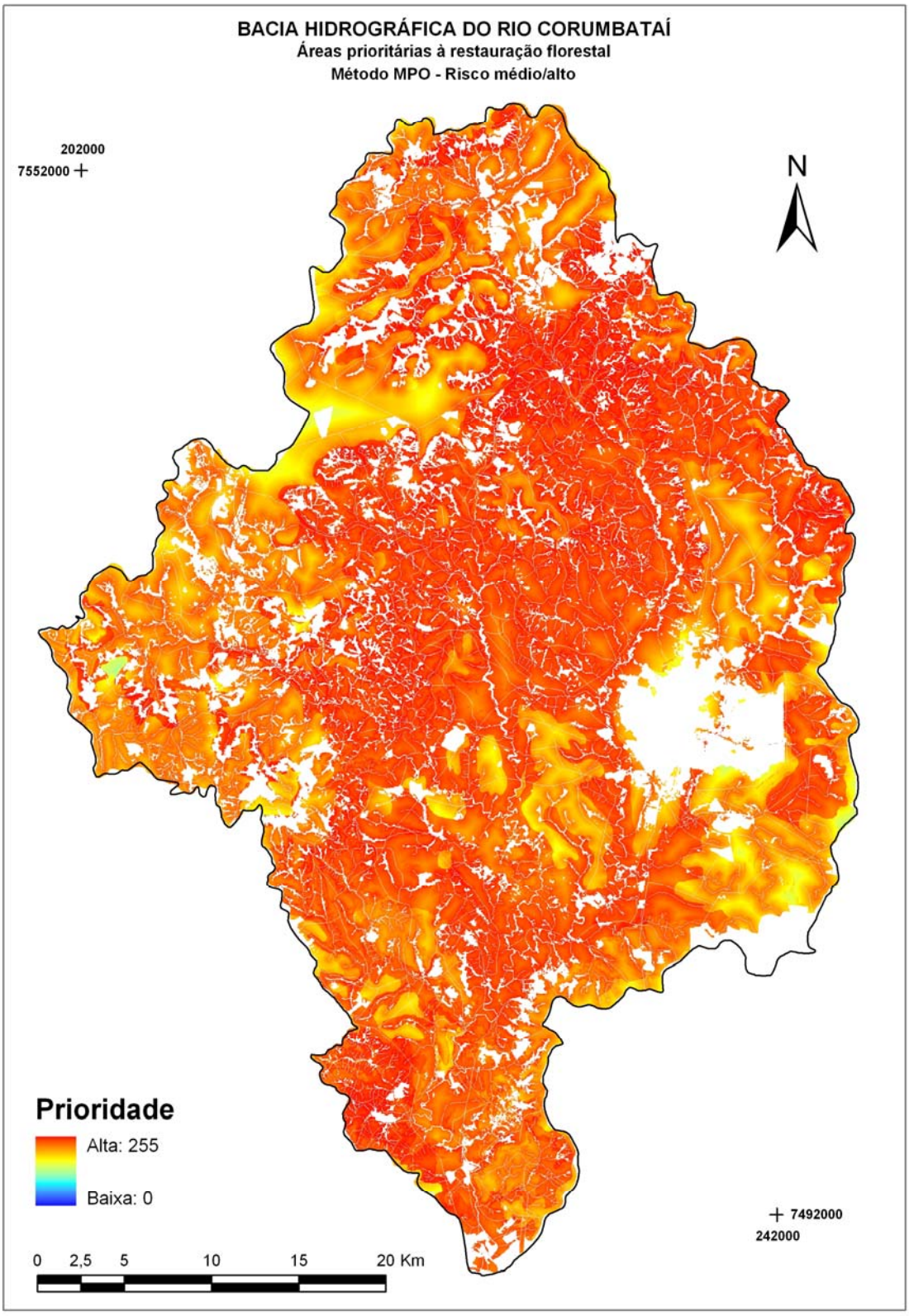


Figura 32 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (escala contínua de prioridades)

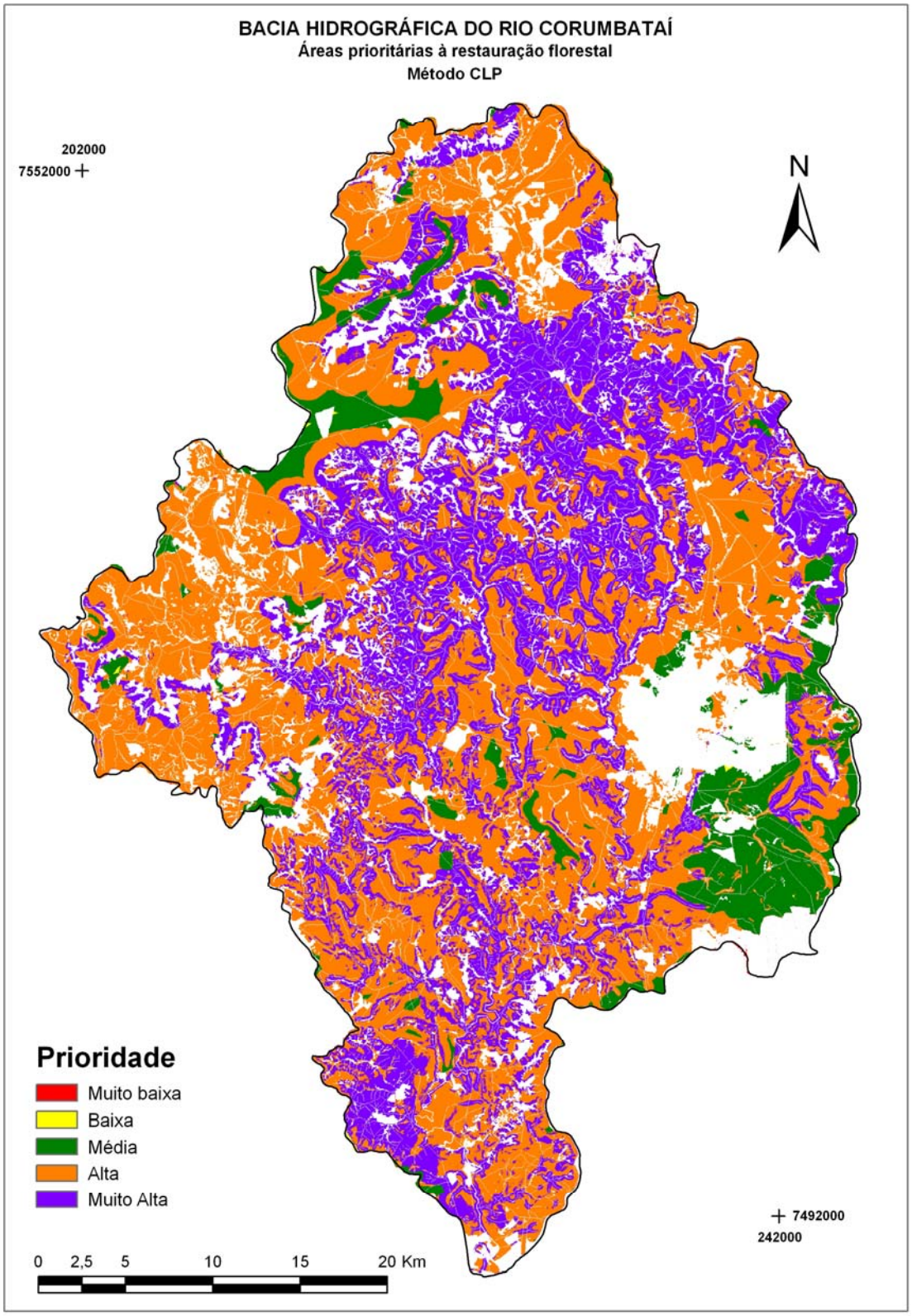


Figura 33 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (cinco níveis de prioridade)

Tabela 4 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Combinação Linear Ponderada

Nível de prioridade	Porcentagem da área
Muito Baixo	0
Baixo	0,05
Médio	8,78
Alto	55,33
Muito Alto	35,84
Total	100,00

Segundo Congalton (1991), uma matriz de erro pode ser usada como ponto de partida para aplicações de técnicas estatísticas para obtenção, dentre outros, do índice de exatidão global, em que se divide o total de pixels classificados corretamente (diagonal da matriz) pelo número total de pixels da matriz, e da exatidão de cada classe do mapa, através do cálculo do índice de Kappa, utilizado para inferir a exatidão desses mapeamentos. Para obter a exatidão de um mapa, dados de referência devem ser usados, podendo os mesmos serem obtidos a partir de trabalhos de campo ou de documentos auxiliares, como fotografias aéreas, cartas topográficas e mapas temáticos.

Na obtenção da exatidão dos mapas de áreas prioritárias gerados pelo FGest, após a aplicação dos métodos Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada, foi feita em comparação com mapas temáticos similares produzidos por Vettorazzi (2006). As Tabelas 5, 7 e 9 mostram as matrizes de confusão resultantes das comparações dos mapas gerados pelo FGest, neste trabalho, com os respectivos mapas produzidos por Vettorazzi (2006).

Na matriz de confusão, a diagonal indica o número de pontos onde houve coincidência entre o mapa temático gerado pelo FGest e o mapa base de comparação.

Tabela 5 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Combinação Linear Ponderada (cinco níveis de prioridade)

MAPA	MAPA VETTORAZZI (2006)							
	Nula	**Muito Baixa**	**Baixa**	**Média**	**Alta**	**Muito Alta**	**Total**	**Exatidão (%)**
Nula	**5017171**	0	0	0	0	0	5017171	100,000
Muito Baixa	0	**33582**	0	0	0	0	33582	100,000
Baixa	0	0	**1356**	0	0	0	1356	100,000
Média	0	0	0	**295322**	0	0	295322	100,000
Alta	0	0	0	0	**1860604**	0	1860604	100,000
Muito Alta	0	0	0	0	0	**1205210**	1205210	100,000
Total	5017171	33582	1356	295322	1860604	1205210	8413245	

Notas: Índice de exatidão global: 100%
Pontos coincidentes em negrito

A matriz de confusão do mapa obtido pelo método da Combinação Linear Ponderada, com cinco níveis de prioridade, mostra índice de exatidão global igual a 100% (cem por cento). As porcentagens de acerto para cada classe de prioridade deste mapa pode ser observada na coluna “Exatidão” da Tabela 5. A exatidão deste mapa, segundo o índice de Kappa foi igual a 1 (um).

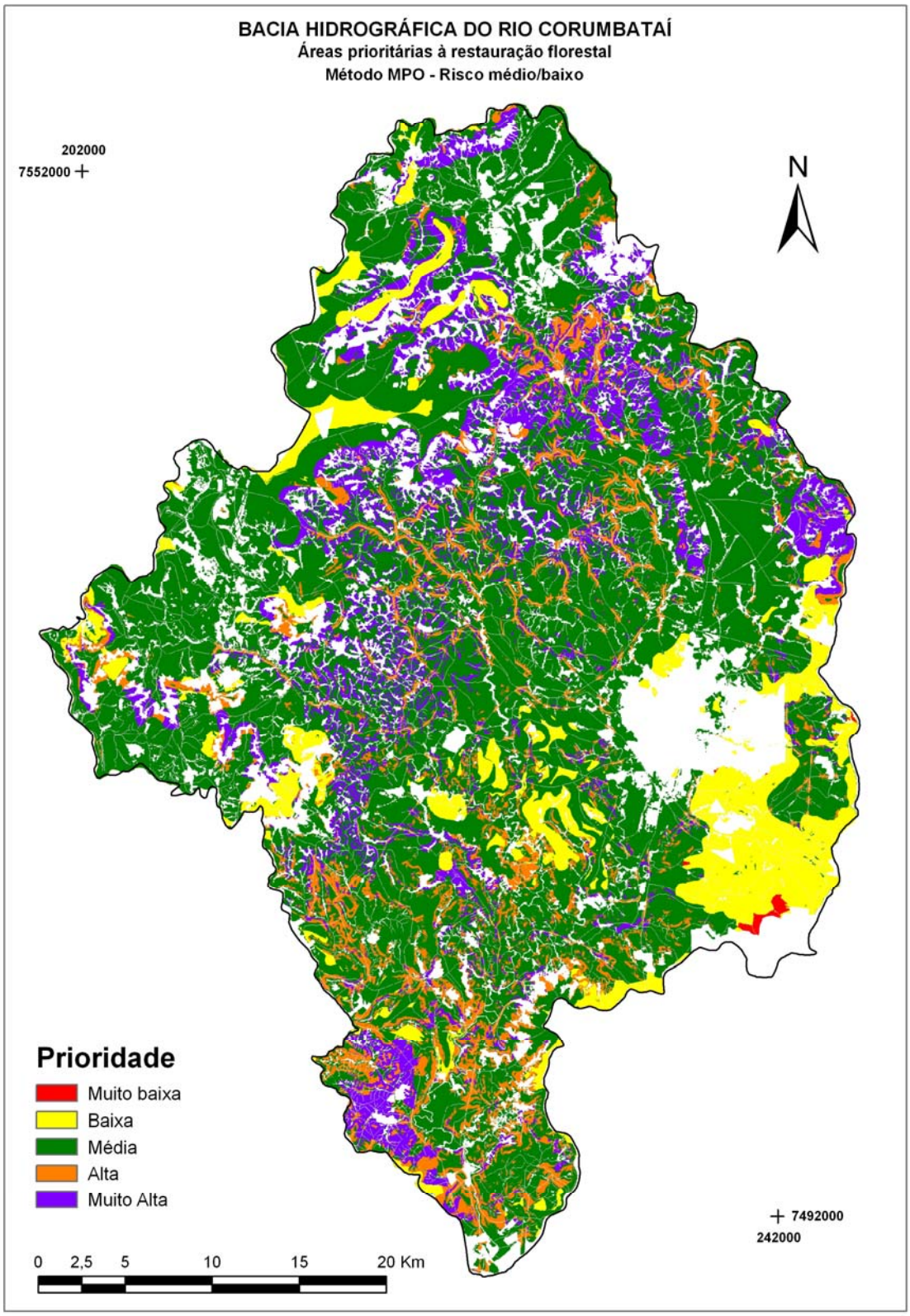


Figura 34 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (cinco níveis de prioridade)

Tabela 6 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo

Nível de prioridade	Porcentagem da área
Muito Baixo	0,15
Baixo	10,66
Médio	64,26
Alto	11,11
Muito Alto	13,82
Total	100,00

Tabela 7 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/baixo (cinco níveis de prioridade)

MAPA	MAPA VETTORAZZI (2006)							
	Nula	**Muito Baixa**	**Baixa**	**Média**	**Alta**	**Muito Alta**	**Total**	**Exatidão (%)**
Nula	**5051237**	0	0	0	0	0	5051237	100,000
Muito Baixa	0	**5069**	0	0	0	0	5069	100,000
Baixa	0	0	**358305**	132	0	0	358437	99,963
Média	0	0	1099	**2159362**	15	0	2160476	99,948
Alta	0	0	0	17015	**356442**	80	373537	95,424
Muito Alta	0	0	0	0	493	**463996**	464489	99,894
Total	5051237	5069	359404	2176509	356950	464076	8413245	

Notas: Índice de exatidão global: 99, 777%
Pontos coincidentes em negrito

A matriz de confusão do mapa obtido pelo método da Média Ponderada Ordenada, para opção de risco médio/baixo, com cinco níveis de prioridade, mostra índice de exatidão global igual a 99, 777%. As porcentagens de acerto para cada classe de prioridade deste mapa pode ser observada na coluna “Exatidão” da Tabela 7. A exatidão deste mapa, segundo o índice de Kappa foi igual a 0, 998.

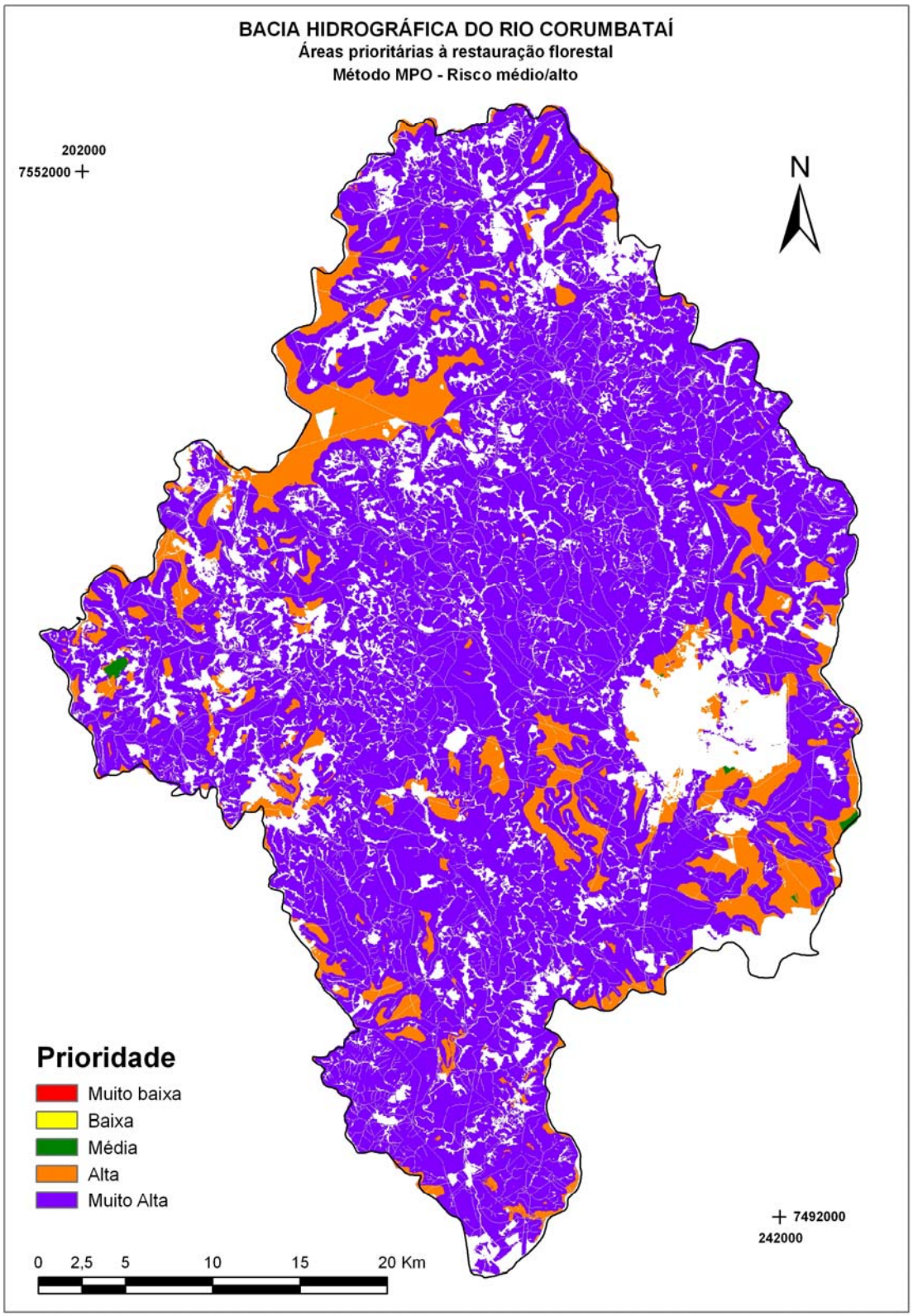


Figura 35 - Áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (cinco níveis de prioridade)

Tabela 8 - Porcentagem de área para os cinco níveis de prioridade obtidos pela aplicação do método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto

Nível de prioridade	Porcentagem da área
Muito Baixo	0
Baixo	0
Médio	0,14
Alto	12,60
Muito Alto	87,26
Total	100,00

Tabela 9 - Matriz de confusão: Mapa de áreas prioritárias à restauração florestal geradas pelo método da Média Ponderada Ordenada, risco médio/alto (cinco níveis de prioridade)

MAPA	MAPA VETTORAZZI (2006)							
	Nula	**Muito Baixa**	**Baixa**	**Média**	**Alta**	**Muito Alta**	**Total**	**Exatidão (%)**
Nula	**5051237**	0	0	0	0	0	5051237	100,000
Muito Baixa	0	**0**	0	0	0	0	0	100,000
Baixa	0	0	**0**	0	0	0	0	100,000
Média	0	0	0	**4577**	21	0	4598	99,543
Alta	0	0	0	0	**422341**	1156	423497	99,727
Muito Alta	0	0	0	0	31	**2933882**	2933913	99,999
Total	5051237	0	0	4577	422393	2935038	8413245	

Notas: Índice de exatidão global: 99, 986%
Pontos coincidentes em negrito

A matriz de confusão do mapa obtido pelo método da Média Ponderada Ordenada, para opção de risco médio/alto, com cinco níveis de prioridade, mostra índice de exatidão global igual a 99, 986%. As porcentagens de acerto para cada classe de prioridade deste mapa pode ser observada na coluna “Exatidão” da Tabela 9. Neste mapa o índice de Kappa foi igual a 0, 999.

4.2.6 Considerações finais

Como o método da Combinação Linear Ponderada oferece compensação total entre os fatores, pode-se observar que no mapa de áreas prioritárias obtido por este método (Figura 33) a rede hidrográfica influencia fortemente a avaliação, já que o peso de compensação obtido é de 0,4024. Assim como o fator erodibilidade também tem predominância considerável no resultado final, influenciado pelo peso de compensação

igual a 0,2425. Embora o fator de uso adequação do uso da terra tenha peso de compensação menor que os anteriores (0,157), também teve certo grau de influência no resultado, como pode ser claramente observado em duas áreas, sendo a primeira delas na região sul/sudoeste enquanto a outra mais ao leste/nordeste da área de estudo. Completando os fatores de compensação, o fator proximidade à malha viária obteve 0,1541 e, por último o fator erosividade com 0,044.

Este grupo de ponderação obtido teve influência direta sobre a espacialização das áreas prioritárias à restauração geradas na análise, ocorrendo certa concentração das mesmas próximas aos corpos da drenagem, uma vez que o fator proximidade à rede hidrográfica foi o que recebeu o maior peso, e em áreas de solos mais sensíveis à erosão potencializadas pela adequação ao uso das terras.

Na avaliação pelo método da Média Ponderada Ordenada, considerando o cenário risco médio/baixo (Figura 34), pode-se observar que a hidrografia ainda tem certo grau de influência no resultado, mesmo sendo atribuído a este fator o peso de ordenação mais baixo (0,022). Já a adequação do uso da terra apresenta grande influência no resultado final, pois além do peso de compensação ter gerado certa influência, como discutido acima, a mesma ainda é incrementada pelo valor do peso de ordenação, estipulado em 26,39. Já os baixos pesos de ordenação para os fatores proximidade à rede hidrográfica (0,022) e erodibilidade do solo (0,0941) minimizaram a influência dos altos pesos de compensação dos mesmos (0,4024 e 0,2425 respectivamente), o que serviu para reclassificar áreas de prioridade para graus menores. Também é possível observar as duas áreas destacadas na análise do mapa de áreas prioritárias obtido pelo método CLP, o que confirma a importância do fator adequação ao uso da terra.

Quanto ao cenário risco médio/alto da avaliação pelo método da Média Ponderada Ordenada, o que ocorreu foi uma potencialização dos fatores que já possuíam forte influência no método CLP (proximidade à rede hidrográfica e erodibilidade do solo), resultando em quase a totalidade da bacia hidrográfica destacada como área de prioridade à restauração florestal (Figura 35).

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados possibilitam concluir que:

1) O FGest, desenvolvido neste trabalho, pode ser utilizado como ferramenta de planejamento e gestão de bacias hidrográficas. O processo de validação mostrou que este software desempenhou com sucesso o papel de ferramenta computacional para análise multicritérios com dados ambientais espacializados, gerando resultados adequados ao mapeamento de áreas prioritárias à restauração florestal em bacias hidrográficas, visando à conservação de recursos hídricos.
2) A interface de comunicação proposta, com os SIGs ArcGIS e Spring, através da utilização de arquivos ASCII, possibilitaram a importação de mapas fatores e restrições e a exportação de mapas gerados nas avaliações multicritérios pelos métodos CLP e MPO. Este método abre ainda a possibilidade de comunicação com outros softwares que manipulem arquivos *raster* no formato ASCII.
3) O método criado para gerar o ranqueamento de fatores atende as prerrogativas da avaliação pelo método MPO, automatizando a tarefa e diminuindo a atividade manual do usuário em comparação a outros métodos estudados.

REFERÊNCIAS

ANUNCIAÇÃO, W.R. da. **Avaliação de desempenho da gestão de estoque utilizando uma metodologia multicritério em apoio a decisão:** um estudo de caso no sistema de estoque centralizado da Petrobrás. 2003. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/2905.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2008.

ARAÚJO, C.C.; MACEDO, A.B. Multicriteria geologic data analysis for mineral favorability mapping: application to a metal sulphide mineralized area, Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil. **Natural Resources Research**, New York, v. 11, n. 1, p. 29-43, 2002. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/6kdvtquc566c9bvw/>. Acesso em: 27 set. 2007. DOI:10.1023/A:1014235703541

ARAÚJO, V.M.R.H. de. Sistemas de informação: nova abordagem teórico-conceitual. **Ciência da Informação,** Brasília, DF, v. 24, n. 1, 1995. Disponível em: <http://dici.ibict.br/archive/00000141/>. Acesso em: 4 ago. 2008.

BABAN, S.M.J.; WAN-YUSOF, K. Modelling optimum sites for locating reservoirs in tropical environments. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 17, n.1, p. 1-17, 2003. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/h439l861k4657154/>. Acesso em: 27 set. 2007. DOI:10.1023/A:1023066705226

BANA E COSTA, C.A.; STEWART, T.J.; VANSNICK, J. Multicriteria decision analysis: some thoughts based on the tutorial and discussion sessions of the ESIGMA meetings. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 28-37, 1997. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 2 out. 2007. DOI:10.1016/S0377-2217(96)00380-3

BANA E COSTA, C.A.; VANSNICK, J. Applications of the MACBETH approach in the framework of an additive aggregation model. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, Hoboken, v. 6, p. 107-114, 1997. Disponível em: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/14582/PDFSTART?CRETRY=1&SRETRY=0>. Acesso em: 18 out. 2007.

BASNET, B.B.; APAN, A.A.; RAINE, S.R. Selecting suitable sites for animal waste application using a raster GIS. **Environmental Management**, New York, v. 28, n. 4, p. 519-531, 2001. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/ucpwpuym3tp9jcjd/fulltext.pdf>. Acesso em: 23 set. 2007. DOI:10.1007/s002670010241

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livro Ceres, 1985. 392 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BETENCOURT, P.R.B. **Desenvolvimento de um modelo de análise multicriterial para justificativa de investimentos em tecnologia da informação**. 2000. 121 p. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <http://volpi.ea.ufrgs.br/teses_e_dissertacoes/td/000343.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2008.

BEZERRA, E. **Princípios de análise e projeto de sistemas com UML**. Rio de Janeiro: Elsevier: Campus, 2007. 369 p.

BORKO, H. Information science: what is it? **American Documentation**, Washington v. 19, n. 1, p. 3-5, 1968.

BRANS, J.P.; MARESCHAL, B.; VINCKE, P.H. PROMETHEE: a new family of outranking methods in MCDM**. International Federation of Operational Research Societies**, 1984. p. 477-490.

BUSH, V. As we may think. **The Atlantic Monthly,** Boston, v. 176, n. 1, p.101-108, 1945. Disponível em: <http://www.theatlantic.com/doc/194507/bush>. Acesso em: 4 out. 2007.

CALIJURI, M.L.; MELLO, A.L.O.; LORENTZ, J.F. Identificação de áreas para implantação de aterros sanitários com uso de análise estratégica de decisão. **Informática Pública**, Belo Horizonte, v. 4, n. 2, p. 231-250, 2002. Disponível em: http://www.ip.pbh.gov.br/ANO4_N2_PDF/ip0402calijuri.pdf Acesso em: 27 set. 2007.

CHARLES BABBAGE INSTITUTE. **Calvin N. Mooers Papers**. Center for the History of Information Technology, Charles Babbage Institute, University of Minnesota, Minneapolis. 1992. Disponível em: <http://www.cbi.umn.edu/collections/inv/cbi00081.html>. Acesso em: 4 out. 2007.

CENTRO DE ANÁLISE E PLANEJAMENTO AMBIENTAL. **Atlas ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Centro de Análise e Planejamento Ambiental. 2004. Disponível em: <http://ceapla.rc.unesp.br/atlas>. Acesso em: 31 out. 2007.

CHEN, K.P.; BLONG, R.; JACOBSON, C. MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk-decision making in natural hazards. **Environmental Modelling and Software,** Kidlington, v. 16, n. 4, p. 387-397, 2001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com Acesso em: 23 set. 2007.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 236 p.

CONGALTON, R. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 37, p. 35- 45, 1991.

CONGALTON, R.G.; ODERWALD, R.G.; MEAD, R.A. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Washington, v. 49, n. 12, p. 1671-1678, 1983. Disponível em: <http://www.asprs.org/publications/pers/scans/1983journal/dec/1983_dec_1671-1678.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2008.

DAI, F.C.; LEE, C.F.; ZHANG, X.H. GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 61, n. 4, p. 257- 271, 2001. Disponível em: http://www.sciencedirect.com Acesso em: 23 set. 2007.

DeMARCO, T. **Análise estruturada e especificação de sistema**. Tradução de Maria Beatriz Gomes Soares Veiga de Carvalho. Rio de Janeiro: Campus, 1989. 348 p.

DETONI, M.M.M.L. **Aplicação de metodologia multicritério de apoio à decisão na definição de características de projetos de construção**. 1996.184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta96/detoni/indice/index.htm>. Acesso em: 2 out. 2007.

DIAS, L.M.C.; ALMEIDA, L.A.; CLÍMACO, J.N. **Apoio multicritério à decisão: métodos e software dedicados à avaliação de um conjunto discreto de alternativas**. Coimbra: Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra, 1997. 100 p.(Colecção Apontamentos).

DRUCKER, P.F. **Práticas de administração de empresas**. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1962. 270 p.

EASTMAN, J.R. **IDRISI Kilimanjaro**: guide to GIS and Image Processing, Worcester: Clark Labs, Clark University, 2003. Disponível em: <http://www.mtholyoke.edu/courses/tmillett/course/geog307/files/Kilimanjaro%20Manual.pdf>. Acesso em: 9 out. 2007.

EASTMAN, J.R.; JIANG, H. Fuzzy measures in multi-criteria evaluation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL ACCURACY ASSESSMENT IN NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL STUDIES, 2., 1996, Fort Collins. **Proceedings...** Fort Collins: USDA Forest Service, 1996. p. 527-534.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999. 412 p.

FERRAZ, S.F. de B.; VETTORAZZI, C.A. Identificação de áreas para recomposição florestal com base em princípios de ecologia de paisagem. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 575-583, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rarv/v27n4/a18v27n4.pdf>. Acesso em: 5 out. 2007.

FREITAS, H.M.R.; BECKER, J.L.; KLADIS, C.M.; HOPPEN, N. **Informação e decisão:** sistemas de apoio e seu impacto. Porto Alegre: Ortiz, 1997. 214 p.

GARCIA, G.J.; VOLK, M.; KRÖNERT, R; RODE, M. An integrated approach for the investigation of impacts of land use changes on soil and water in the Corumbataí watershed, SP, Brazil. In: LIEBEREI, R., BIANCHI, H-K., BOEHM, V., REISDORFF, C. (Ed.) GERMAN-BRAZILIAN WORKSHOP ON NEOTROPICAL ECOSYSTEMS – ACHIEVEMENTS AND PROSPECTS OF COOPERATIVE RESEARCH. 2000. Hamburg, Sept.3-8 Water Quality, Water Dynamics, Water Management - Summaries of Lectures, Session 3. 2002: Neotropical Ecosystems, **Proceedings**…Hamburg: GKSS-Geesthacht, 2000. p. 146-147.

GARCIA, G.J.; ANTONELLO, S.L.; MAGALHÃES, M.G.M. The environmental atlas of the Corumbatai watershed – SP, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia,** Rio de Janeiro**,** v..58, n. 01,p.73-79, Abril, 2006.

GARFIELD, E. A tribute to Calvin N. Mooers: a pioneer of information retrieval. **The Scientist**, Philadelphia, v. 11, n. 6, p. 9, 1997. Disponível em: <http://www.garfield.library.upenn.edu/commentaries/tsv11(06)p09y19970317.pdf>. Acesso em: 4 out. 2007.

GANE, C.; SEARSON, T. **Análise estruturada de sistemas**. Rio de Janeiro: LCT, 1983. 257 p.

GENELETTI, D. Using spatial indicators and value functions to assess ecosystem fragmentation caused by linear infrastructures. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 out. 2007.

GOMES, L.F.A.M. **TODIM**: a system for the evaluation of public transportation projects. Rio de Janeiro, n. 24, p.16, 1987. (Memorando Técnico).

GORE, A. **The digital earth**: understanding our planet in the 21st century. 31 de janeiro, 1998. California Science, Los Angeles. 1998. Palestra. Disponível em: <http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=6210>. Acesso em: 18 out. 2007.

GKARAVELI, A.; GOOD, J.E.G.; WILLIAMS, J.H. Determining priority areas for native woodland expansion and restoration in Snowdonia National Park, Wales. **Biological Conservation**, Barking, v. 115, n. 3, p. 395-402, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 out. 2007.

INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. **Conservação dos recursos hídricos por meio da recuperação e da conservação da cobertura florestal da bacia do Rio Corumbataí**. Piracicaba, 2001. Plano Diretor. 301 p.

JACQUET-LEGREZE, E.; SISKOS, J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making: the UTA method. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam: Elsevier Science, v. 10, p. 151-164, 1982. Disponível em: <http://www.elsevier.com/authored_subject_sections/S03/Anniversary/EJOR_free5.pdf>. Acesso em: 27 set. 2007.

JIANG, H.; EASTMAN, J.R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 14, n. 2, p. 173-184, 2000. Disponível em:<http://www.uwyo.edu/rnew5200/Readings/Jiang&Eastman.pdf>. Acesso em: 15 out. 2007.

KEENEY, R.L. **Value-focused thinking**: a path to creative decision making. Cambridge: Harvard University. Press, 1992. 416 p.

LI, X.; YEH, A. G.O. Zoning land for agricultural protection by the integration of remote sensing, GIS, and cellular automata. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 67, n. 4, p. 471-477, 2001. Disponível em: <http://www.asprs.org/publications/pers/2001journal/april/2001_apr_471-477.pdf>. Acesso em: 5 out. 2007.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 3., 1980, Recife. **Anais...** Recife: SBCS, 1980. p. 13.

MALCZEWSKI, J. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. New York: John Wiley, 1999. 392 p.

MALCZEWSKI, J. On the use of Weighted Linear Combination method in GIS: Common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, Oxford, v. 4, n. 1, p. 5-22, 2000. Disponível em: <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/119013066/PDFSTART?CRETRY=1&SRETRY=0>. Acesso em: 5 out. de 2007.

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, New York, v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 5 out. 2007.

MALCZEWSKI, J. Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging (OWA) approach. **International Journal of Environmental Technology and Management**, Geneve, v. 6, n. 1/2, p.7-19, 2006. Disponível em: <http://www.inderscience.com/storage/f521211161098734.pdf>. Acesso em: 15 out. de 2007.

MANGABEIRA, J.A.C. **Tipificação de produtores rurais apoiada em imagens de alta resolução espacial, geoprocessamento e estatística multivariada:** uma proposta metodológica. 2002. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. Disponível em: <http://www.tipifica.cnpm.embrapa.br/>. Acesso em: 10 jul. 2008.

MATSUKUMA, C.K. **Análise comparativa de algoritmos de classificação não-supervisionada, no mapeamento do uso e cobertura do solo**. 2002. 84 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2002.

MELLO, J.C.C.B.S. de; GOMES, E. G.; LETA, F.R.; PESSOLANI, R.B.V. Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no projeto Aerodesign. **Engevista**, Niterói, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003.

MICROSOFT. Developer Center. **Visual C#.** 2007. Disponível em: <http://www.microsoft.com/brasil/msdn/csharp/default.mspx>. Acesso em: 16 out. 2007.

MILLER, R.C.; GUERTIN, D.P.; HEILMAN, P. Information technology in watershed management decision making. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 40, n. 2, p. 347-357, 2004. Disponível em: <http://www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01034.x>. Acesso em: 18 out. 2007.

MONTIBELLER NETO, G. **Mapas cognitivos**: uma ferramenta de apoio à estruturação de problemas. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1996. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta96/neto/index/index.htm>. Acesso em: 18 out. 2007.

MOOERS, C.N. Zatocoding applied to mechanical organization of knowledge. **American Documentation**, Washington, v. 2, n. 1, p. 20-32, 1951.

MORALES, N.; ANTONELLO, S.L. Gestão das águas subterrâneas com uso de ferramentas de geoprocessamento. **Revista Ciência em Extensão**, São Paulo, v. 1, n. Supl, p. 167, 2004.

MORENO, J. **Bacia hidrográfica**: convergência de investigação científica e unidade de gestão territorial - a contribuição de geoprocessamento. Rio Claro: UNESP/IGCE, 2007. (Relatório Científico).

MOURA, A.C.M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. 2. ed., Belo Horizonte: Ed. da autora, 2005. 294 p.

OLIVEIRA, D. de P.R. de. **Planejamento estratégico**: conceitos, metodologias e práticas. 20. ed. São Paulo: Atlas, 2004.335 p.

OLIVEIRA, E. P. **Modelo conceitual de um sistema de apoio à decisão para gestores de logística e transporte em canais de exportação agrícola**. 2007. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

OLIVEIRA, J.B.; MENK, J.R.F.; BARBIERI, J.L.; ROTTA, C.L.; TREMOCOLDI, W. **Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de Araras. Convênio Embrapa - Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo; Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária; Instituto Agronômico, Divisão de Solos, Seções de Pedologia e Fotointerpretação, 1981b. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H.; ALMEIDA, C.L.F. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo**: quadrícula de São Carlos. Campinas: Convênio Embrapa - Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo; Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária; Instituto Agronômico, Divisão de Solos, Seção de Pedologia, 1981a. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H.; BEJAR, O.I.G.; OLIVEIRA, E.R.; LONGOBARDI, R.C.; ASSIS, E. A. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo**: quadrícula de Piracicaba. São Paulo: Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo; Coordenadoria da Pesquisa Agropecuária; Instituto Agronômico; Secretaria de Economia e Planejamento; Coordenadoria de Ação Regional; Instituto Geográfico e Cartográfico, 1989. 1 mapa. Escala 1:100.000.

PERINOTTO, J.A.; LINO, I.C. Geologia, recursos minerais e passivos ambientais. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. CEAPLA. 2004. Disponível em: <http://ceapla.rc.unesp.br/atlas/>. Acesso em: 12 dez. 2007.

PONZONI, F.J.; ALMEIDA, E.S. A estimativa do parâmetro kappa (k) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., 14-19 abril, 1996, Salvador. **Anais eletrônicos...** São José dos Campos: INPE, 1996. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.05.09.39/doc/T130.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2008.

PRESSMAN, R.S. **Engenharia de software**. Tradução de José Carlos Barbosa dos Santos. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 1995. 1056 p.

RAMOS, R.A.R.; MENDES, J.F.G. Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: o caso de Valença. **Revista Engenharia Civil**, Guimarães, n.10, p.7-29, 2001. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/2511/1/Pag_7-30.pdf>. Acesso em: 15 out. 2007.

RANDHIR, T.O.; CONNOR, R.O.; PENNER, P.R.; GOODWIN, D.W. A watershed-based land prioritization model for water supply protection. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.143, p.47-56, 2001. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 18 out. 2007.

RAO, M.S.V.C.; SASTRY, P.D.; YADAR, K.; KHAROD, S.K.; PATHAN, P.S.; DHINWA, K.L.; MAJUMDAR, D.; PHATA, K. A weighted index model for urban suitability assessment – a GIS approach. Bombay: Metropolitan Regional Development Authority, 1991. 134p

ROY, B. Classement et choix en presence de points de vue multiple: la methode ELECTRE. **Revue d'Informatique et de Recherche Opérationelle**, Paris, v. 8, p.57-75, 1968.

ROY, B. Decision science or decision aid science? **European Journal of Operational Research**, Brussels, v. 66, n.2, p. 184–203, 1993.

SAATY, T.L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, New York, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SALAM, M.A.; KHATUN, N.A.; ALI, M.M. Carp farming potential in Barhatta Upazilla, Bangladesh: a GIS methodological perspective. **Aquaculture**, v. 245, n. 1/4, p. 75-87, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 out. 2007.

SANTOS, S.C.; GARCIA, G.J. Desenvolvimento integrado e gestão para a bacia hidrográfica do rio Corumbataí. **Estudos Geográficos**, Rio Claro, v. 4, n. 1, p. 89-106, 2006. Disponível em: <http://cecemca.rc.unesp.br/ojs/index.php/estgeo/article/viewFile/211/181>. Acesso em: 5 Jan. 2008.

SARACEVIC, T. Ciência da informação: origem, evolução e relações. **Perspectivas em Ciências da Informação**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 41-62, 1996. Disponível em: <http://www.eci.ufmg.br/pcionline/index.php/pci/article/viewFile/235/22>. Acesso em: 3 out. 2007.

SIGEST. **Sistema integrado de gestão do uso múltiplo das águas**: aplicação no sistema Tietê-Paraná. 2004. Disponível em: <http://www.sigest.fcth.br/homesigest/index.htm>. Acesso em: 3 out. 2007.

SIMON, H.A. **The new science of management decision**. NewYork: Harper, 1960. 50 p.

SCHOEMAKER, P.J.H., RUSSO, J.E. A pyramid of decision approaches. **California Management Review**, Berkeley, v.36, n.1, p. 9-31, 1993. Disponível em: <http://forum.johnson.cornell.edu/faculty/russo/A%20Pyramid%20of%20Decision%20Approaches.pdf>. Acesso em: 18 out. 2007.

STAIR, R.M. **Principles of information systems** - a managerial approach. 2nd ed. Danvers : Boyd & Fraser, 1996. 656 p.

STORE, R.; KANGAS, J. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, , v.55, n.2, p.79-93, 2001. <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 09 out. 2007

TAGLIANI, C.R.A. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2003. p. 1657-1664. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2002/10.31.13.33/doc/13_028.pdf>. Acesso em: 18 out. 2007.

TIM, U.S.; JAIN, D.; LIAO, H.H. Interactive modeling of ground-water vulnerability within a geographic information system environment. **Ground Water**, Westerville, v. 34, n. 4, p. 618-627, 1996.

TINOCO, J.E.P.; KRAEMER, M.E.P. **Contabilidade e gestão ambiental**. São Paulo: Atlas, 2004. 303 p.

VALENTE, R.O.A. **Definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal por meio da abordagem multicriterial em ambiente SIG**. 2005. 121 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

VALENTE, R.O.A.; VETTORAZZI, C.A. Mapeamento de uso e cobertura do solo da bacia do rio Corumbataí, SP. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n.196, p. 10, 2003. Disponível em: <http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr196.pdf>. Acesso em: 1 set 2007.

VALENTE, R.O.A.; VETTORAZZI, C.A. A abordagem multicriterial na definição de áreas prioritárias para conservação e preservação florestal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.19.15.50.42/doc/1681.pdf>. Acesso em: 26 set. 2007.

VARMA, V.K.; FERGUSON, I.; WILD, I. Decision support system for the sustainable forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, n. 1/2, p. 49-55, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 5 out. 2007.

VELLASCO, M.M.B.R. Lógica nebulosa. In: **ICA**: Núcleo de Pesquisa em Inteligência Computacional Aplicada. Rio de Janeiro: PUC, 2008. Disponível em: <http://www.ica.ele.puc-rio.br/cursos/download/LN-cursop1.pdf>. Acesso em: 3 jan. 2008.

VETTORAZZI, C.A. **Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. 2006. 151 p. Tese (Livre Docente do Departamento de Engenharia Rural) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. , Piracicaba, 2006. Disponível em:<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/livredocencia/11/tde-06072007-103043/>. Acesso em: 13 jun. 2007.

VLAHOS, N.; HERBST, J. Prioritizing watershed land for conservation: a case study in the Hammonasset Watershed, Connecticut. **Journal of the New England Water Works Association**, Boston, v. 114, n. 1, p. 10-25, 2000.

VOOGD, H. **Multicriteria evaluation for urban and regional planning**. London: Pion, 1983. 125 p.

WANG, D.H.; MEDLEY, K.E. Land use model for carbon conservation across a Midwestern USA landscape. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdam, v. 69, n. 4, p. 451-465, 2004. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 5 out. 2007.

WAZLAWICK, R.S. **Análise e projeto de sistemas de informação orientados a objetos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004. 298 p.

WILSON, D.J.; DROSTE, R.L. Design considerations for watershed management decision support systems. **Water Quality Research Journal of Canada**, Gloucester, v. 35, n. 2, p. 163-188, 2000. Disponível em: <http://digital.library.mcgill.ca/wqrj/pdfs/WQRJ_Vol_35_No_2_Art_01.pdf>. Acesso em: 18 out. 2007.

WOLF, A.M. **Avaliação do processo produtivo de uma empresa de comercialização de produtos ecológicos visando identificar oportunidades para seu aperfeiçoamento**. 2002. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em:<http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/877.pdf> Acesso em: 27 set. 2007.

YAGER, R.R. On Ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision-making. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, New York, v. 8, n. 1, p. 183-190, 1988.

ZANATTA, D.L. **Avaliação de uma cooperativa de arroz com vistas a identificar oportunidades de aperfeiçoamento**. 1999. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999. Disponível em: <http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/1509.pdf>. Acesso em: 27 set. 2007.

ZANELLA, I.J. **As problemáticas técnicas no apoio à decisão em um estudo de caso de sistemas de telefonia móvel celular**. 1996. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em: <http://www.eps.ufsc.br/disserta96/italo/index/index.htm>. Acesso em: 18 out. 2007.

ZAVATINI, J. A.; CANO, H. Variações do ritmo pluvial na bacia do rio Corumbataí - SP. **Boletim de Geografia Teorética**, Rio Claro, v.23, n. 45/46, p. 215-240, 1993.