

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ANÁLISE DE FRAGILIDADE AMBIENTAL COM MÉTODOS  
MULTICRITÉRIO - CRÍTICAS E PROPOSTA METODOLÓGICA**

**ABIMAEI CEREDA JUNIOR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Sergio Antonio Röhm

São Carlos

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

C414af

Cereda Junior, Abimael.  
Análise de fragilidade ambiental com métodos multicritério  
– críticas e proposta metodológica / Abimael Cereda Junior.  
-- São Carlos : UFSCar, 2011.  
147f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,  
2011.

1. Planejamento físico-ambiental. 2. Geoprocessamento.  
3. Fragilidade ambiental. 4. Métodos multicritério. 5. São  
Carlos (SP). I. Título.

CDD: 711.42 (20<sup>a</sup>)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana  
C. P. 676 – 13.560-970 – São Carlos – SP  
Fone/FAX: (16) 3351-8295  
e-mail: [ppgeu@ufscar.br](mailto:ppgeu@ufscar.br)  
home-page: [www.ufscar.br/~ppgeu](http://www.ufscar.br/~ppgeu)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**ABIMAEEL CEREDA JUNIOR**

Tese defendida e aprovada em 28/02/2011  
pela Comissão Julgadora

Prof. Dr. Sergio Antonio Röhm - Presidente  
Orientador (DECiv/UFSCar)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Sueli do Carmo Bettine  
(Faculdade de Engenharia Ambiental/PUC - Campinas)

Prof. Dr. Waldir José Gaspar  
(DAU/Centro Universitário Belas Artes de São Paulo)

Prof. Dr. Edson Augusto Melanda  
(DECiv/UFSCar)

Prof. Dr. José Augusto de Lollo  
(PPGEU/UFSCar)

Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva  
Presidente da CPGEU

*Haverá algo de que se possa dizer: “Veja! Isto é novo!”?  
Não! Já existiu há muito tempo, bem antes da nossa  
época.... O que acontece ao tolo, também me acontecerá.  
Que proveito eu tive em ser sábio? Então eu disse a mim  
mesmo: Isso não faz o menor sentido! Nem o sábio, nem  
o tolo serão lembrados para sempre; nos dias futuros  
ambos serão esquecidos. Como pode o sábio morrer  
como o tolo morre?*

Eclesiastes Cap. 1, Versículo 10 e Cap. 2, Versículo 15  
Bíblia Sagrada Nova Versão Internacional

## **AGRADECIMENTOS**

Dizem ser este o espaço mais fácil de escrever, em que o aluno pode ser “livre”, deixar em seus agradecimentos uma marca pessoal, mostrando estilo menos acadêmico. Discordo. O trabalho científico como um todo é onde podemos ser livres, formulando nossas hipóteses, criando nossas teorias e pondo-as à prova. Discordo também porque os agradecimentos talvez sejam a parte mais difícil de um trabalho acadêmico, não pela ingratidão, mas sim porque tenho muito que agradecer.

O risco de uma lista enorme de nomes, lugares comuns, piadinhas internas é sempre eminente. Mas como não deixar que isto ocorra, mas ao mesmo tempo ser grato?

Começar por Deus? Pela mãe? Irmã? Noiva? Ou por se tratar de um trabalho acadêmico, o orientador, a banca, o corpo técnico-acadêmico da universidade?

Os amigos mais chegados que um irmão? Os amigos feitos na graduação, pós-graduação, cursos, seminários...? Os colegas de caminhada? Os alunos que tanto ouviram falar desta tese?

Ou seria melhor lembrar daqueles que já se foram, mas que foram importantes para este trabalho ser concluído? E não digo somente os que já deixaram este mundo, mas também aqueles que já deixaram o mundo de convivência, como professores da graduação?

O melhor é que você - leitor deste trabalho – encontre em uma das categorias acima seu agradecimento. Por quê? Porque você sabe o quanto sou grato a você, e não são palavras nesta página que mudarão isto.

Meu muito obrigado.

Esta pesquisa contou com apoio da FAPESP no período de 01/06/2007 a 29/02/2008, processo número 06/07069-2

## RESUMO

CEREDA JUNIOR, A. **Análise de Fragilidade Ambiental com Métodos Multicritério - críticas e proposta metodológica**. 2011. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

A tentativa de apre(e)nder o território por técnicas, para posterior modificação e intervenção, é um fato que, para alguns pesquisadores, tornaram o *homem* humano. O entendimento do que cerca um grupo de indivíduos pode levar, no entanto, a uma leitura determinista ou mesmo uma sobreposição sem critério dos elementos considerados, o que leva a distorções no entendimento do complexo sistema dito ambiental. Assim, não basta que haja coleta de dados e sua simples superposição, e para dados espaciais, o acúmulo de mapas: são necessários critérios técnicos, sociais e econômicos, bem como a discussão conceitual-metodológica sobre a representação do Espaço Geográfico. Por meio de teorias e orientações metodológicas, tal apreensão pode se dar não somente apropriando-se das partes componentes do sistema, mas sim da integração entre eles, como na Cartografia de Síntese. Desta forma, métodos são necessários para a reorganização deste, transformando dados em informações (e estas em conhecimento), permitindo que gestores e população possam pensar, analisar e agir no seu Espaço. Para isso, os métodos multicritérios possibilitam romper com as representações estáticas do meio, superando o paradigma de inventário, sendo este um dos objetivos da presente tese, a partir dos pressupostos da Fragilidade Ambiental e da utilização dos métodos multicritério da Combinação Linear Ponderada e da Média Ponderada Ordenada, o que gera o Mapa de Fragilidade Ambiental para parte da Bacia do Rio Monjolinho, em São Carlos – SP, ancorados na abordagem Ecodinâmica. Desta forma, além do produto cartográfico que pode subsidiar ações do poder público, foi possível a comprovação da hipótese de que adoção de um destes métodos, a partir do seu arcabouço teórico e articulação metodológica, possibilita caminhar rumo ao principal objetivo da Cartografia de Síntese e também do Planejamento, seja o urbano ou ambiental: a reintegração de variáveis que se concretizam territorialmente de maneira una e não isolada, podendo com o uso do método da Média Ponderada Ordenada haver a transferência da inteligência coletiva técnica e social para um Sistema de Informações Geográficas.

**Palavras-chave:** Análise Multicritério. Fragilidade Ambiental. Sistemas de Informações Geográficas (SIG). São Carlos.

## ABSTRACT

CEREDA JUNIOR, A. **Environmental Fragility Analysis with Multi-Criteria Methods – Critiques and Methodological Proposal**. 2011. 147f. Doctoral dissertation (Urban Engineering). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

The attempt to understand the environment through techniques for posterior modifications and interventions is a fact that, for some researchers, made *man*, human. The understanding on which surrounds a group of individuals can lead, however, to a deterministic reading or even to a superposition, lacking criteria, of the elements in consideration, which leads to distortions in understanding the complex system called environment. Therefore, it's not enough that the gathering of data, and its simple overlap exists, and for spatial data, the accumulation of maps. There is the need of, technical, social and economical criteria to improve understanding, as well as a conceptual-methodological discussion regarding the representation of the Geographical Space. Throughout methodological theories and orientations, such grasp can be achieved by the understanding of, not only one component, but the integration of all components, like in Synthesis Cartography. So, the methods are necessary for the reorganization, transforming data in information (and information onto knowledge), allowing that managers and population can think, analyze and act onto the Space they are inserted in. Thereunto, the multi-criteria methods allows breaking with the statistical representations of the environment, overcoming the inventory paradigm, been that one of the purposes of the present theses, from assumptions of the Environmental Fragility and the utilization of multi-criteria methods of Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging, which generates the Map of Environmental Fragility for part of the watershed of Monjolinho River in São Carlos - SP, anchored on the Eco-dynamical approach. Likewise, besides the cartographical product which can subsidize actions from the public power, it was possible the verification of hypotheses that the introduction of one of these methods, from its correct understanding and articulation, allows it to step up to the main purpose of Synthesis Cartography and Planning, be it urban or environmental: the re-integration of variables that concretize territorially in a unison an non-isolated manner, which throughout the Ordered Weighted Averaging method can lead to the transfer of collective technical intelligence, to a Geographic Information System.

**Key words:** Multi-criteria Analysis. Environmental Fragility. Geographic Information Systems (GIS). São Carlos.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PARADIGMA DOS QUATRO UNIVERSOS.....	56
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DA REALIDADE EM LAYERS.....	57
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE VENN.....	62
FIGURA 4 - ESCALA DE IMPORTÂNCIA.....	71
FIGURA 5 – PESOS DE ORDENAÇÃO NO ESPAÇO DE DECISÃO ESTRATÉGICA. ADAPTADO DE VALENTE E VETTORAZZI (2005).....	77
FIGURA 6 – NÍVEIS COMPILATÓRIOS DA PRESENTE PESQUISA, A PARTIR DE LIBAULT (1971) ....	98
FIGURA 7 – MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL, PROPOSTO PELO AUTOR.....	99
FIGURA 8 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA AS CATEGORIAS HIERÁRQUICAS DE CLASSES DE DECLIVIDADE.....	101
FIGURA 9 – PESOS DE ORDENAÇÃO NO ESPAÇO DE DECISÃO ESTRATÉGICA.....	114
MAPA 1 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS - SP.....	81
MAPA 2 - MAPA HIPSOMÉTRICO DO OBJETO DE ESTUDO.....	82
MAPA 3 – ÁREA DE ESTUDO.....	85
MAPA 4 - MAPA DE DECLIVIDADES.....	89
MAPA 5 - MAPA PEDOLÓGICO.....	91
MAPA 6 - MAPA DE USO E OCUPAÇÃO.....	93
MAPA 7 - MAPA PLUVIOMÉTRICO.....	96
MAPA 8 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA DECLIVIDADE.....	102
MAPA 9 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA PEDOLOGIA.....	105
MAPA 10 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA GRAUS DE PROTEÇÃO.....	106
MAPA 11 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA COMPORTAMENTOS PLUVIOMÉTRICOS.....	107
MAPA 12 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA.....	111
MAPA 13 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – MÉDIA PONDERADA ORDENADA CENÁRIO 1.....	115
MAPA 14 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – MÉDIA PONDERADA ORDENADA CENÁRIO 2.....	116
MAPA 15 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – MÉDIA PONDERADA ORDENADA CENÁRIO 3.....	117
MAPA 16 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – MÉDIA PONDERADA ORDENADA CENÁRIO 4.....	118
MAPA 17 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – MÉDIA PONDERADA ORDENADA CENÁRIO 5.....	119
MAPA 18 –FRAGILIDADE AMBIENTAL – BOOLEANO TABELA BIDIMENSIONAL.....	122
MAPA 19 – PONTOS DE CONTROLE FOTOGRÁFICO.....	125



## LISTA DE TABELAS

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES ECODINÂMICAS.....	46
QUADRO 2 - PROCEDIMENTOS EM PLANEJAMENTO AMBIENTAL COM SIGs.....	54
QUADRO 3 – ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY.....	70
QUADRO 4 – MOSAICO DE CLASSES DE FRAGILIDADE MUITO FRACA .....	127
QUADRO 5 – MOSAICO DE CLASSES DE FRAGILIDADE FRACA .....	128
QUADRO 6 – MOSAICO DE CLASSES DE FRAGILIDADE MÉDIA .....	129
QUADRO 7 – MOSAICO DE CLASSES DE FRAGILIDADE FORTE.....	130
QUADRO 8 – MOSAICO DE CLASSES DE FRAGILIDADE MUITO FORTE.....	131
TABELA 1 - CATEGORIAS HIERÁRQUICAS DE CLASSES DE DECLIVIDADE. ....	48
TABELA 2 - CLASSES DE FRAGILIDADE DE SOLO. ....	48
TABELA 3 - GRAUS DE PROTEÇÃO A PARTIR DO TIPO DE COBERTURA VEGETAL. ....	49
TABELA 4 - NÍVEIS HIERÁRQUICOS DOS COMPORTAMENTOS PLUVIOMÉTRICOS.....	50
TABELA 5 - EXEMPLO DE MATRIZ .....	70
TABELA 6 - APLICAÇÃO DE MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA .....	72
TABELA 7 - MÉDIA DOS TOTAIS ANUAIS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS DA ÁREA DE ESTUDO (2000-2002) .....	94
TABELA 8 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA AS CATEGORIAS HIERÁRQUICAS DE CLASSES DE SOLO .....	103
TABELA 9 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA AS CATEGORIAS HIERÁRQUICAS DE GRAUS DE PROTEÇÃO A PARTIR DO TIPO DE COBERTURA VEGETAL .....	104
TABELA 10 - PADRONIZAÇÃO <i>FUZZY</i> PARA AS CATEGORIAS HIERÁRQUICAS DOS COMPORTAMENTOS PLUVIOMÉTRICOS .....	104
TABELA 11 - PONDERAÇÃO DE CRITÉRIOS AHP .....	108
TABELA 12 – PESOS DE ORDENAMENTO AND, OR E CLP PARA MPO.....	113
TABELA 13 – PESOS DE ORDENAMENTO APLICADO PARA MPO – NOVOS CENÁRIOS .....	113
TABELA 14 – CLASSES TEMÁTICAS DE FRAGILIDADE AMBIENTAL.....	124
TABELA 15 – ÁREAS DAS CLASSES DE FRAGILIDADE .....	124

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - CÁLCULO DO VALOR DE $W_i$ .....	73
EQUAÇÃO 2 - CÁLCULO PARA O VALOR DE $\lambda_{máx}$ .....	74
EQUAÇÃO 3 - CÁLCULO DA RAZÃO DE CONSISTÊNCIA .....	74
EQUAÇÃO 4 - CÁLCULO DO $SCORE$ .....	74
EQUAÇÃO 5 - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DE $ANDNESS$ .....	78
EQUAÇÃO 6 - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DE $ORNESS$ .....	78
EQUAÇÃO 7 - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DE $TRADE-OFF$ (COMPENSAÇÃO) .....	78

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
OBJETIVOS E HIPÓTESE .....	16
<b>1 PRESSUPOSTOS AMBIENTAIS</b> .....	<b>18</b>
1.1 PAISAGEM E REPRESENTAÇÃO .....	26
1.2 BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PAISAGEM .....	35
<b>2 INTEGRAÇÃO DE DADOS CARTOGRÁFICOS AMBIENTAIS</b> .....	<b>39</b>
2.1 FRAGILIDADE AMBIENTAL E ECODINÂMICA .....	41
2.1.1 <i>Unidades de Instabilidade Emergente e Potencial</i> .....	47
2.2 OS SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....	52
2.3 PARADIGMAS DE MAPEAMENTO .....	59
2.3.1 <i>Análise Multicritério</i> .....	64
2.3.2 <i>Método da Combinação Linear Ponderada (CLP)</i> .....	68
2.3.3 <i>Método da Média Ponderada Ordenada (MPO)</i> .....	75
<b>3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>80</b>
3.1 OBJETO DE ESTUDO .....	80
3.2 O MODELO DE FRAGILIDADE AMBIENTAL .....	86
3.3 SOFTWARES E MAPAS BASE.....	86
3.3.1 <i>Declividade</i> .....	87
3.3.2 <i>Pedologia</i> .....	90
3.3.3 <i>Graus de Proteção ao Solo</i> .....	92
3.3.4 <i>Comportamento Pluviométrico</i> .....	94
<b>4 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS</b> .....	<b>97</b>
4.1 PADRONIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS.....	100
4.1.1 <i>Critério Declividade</i> .....	101
4.1.2 <i>Critérios Pedologia, Proteção ao Solo e Comportamento Pluviométrico</i> 103	
4.2 PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS .....	108
4.3 FRAGILIDADE AMBIENTAL - COMBINAÇÃO LINEAR PONDERADA (CLP) .....	109

4.4	FRAGILIDADE AMBIENTAL - MÉDIA PONDERADA ORDENADA (MPO).....	112
4.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	120
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>132</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>136</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>147</b>

## INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970 grandes transformações começam não só a ocorrer mas também a se concretizar na organização do espaço geográfico, com a mudança no paradigma ambiental e o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas. A preocupação com o processo de intervenção antrópica no espaço, com suas consequências desastrosas pela falta de planejamento - ou mesmo este alinhado às pressões do capital e sua lógica de não esgotamento dos recursos - levaram a uma revisão dos planos e ações para ocupação e uso do território.

Ao se restringir temporalmente os impactos das descobertas científicas e técnicas para apropriação do espaço do fim do século 18 até os dias atuais – um momento ínfimo ao se pensar na dimensão de escala geológica – as mudanças ocorridas no sistema geosfera-atmosfera-hidrosfera-biosfera foram profundas e complexas, alterando o equilíbrio dinâmico e as interações internas a esta, justificadas pela necessidade do crescimento e desenvolvimento econômico, mesmo que este só ocorra *strictu sensu* aos atores hegemônicos.

A sociedade e suas organizações, sejam elas humanas, econômicas ou políticas, procuram formas de controle do espaço e seu território, o que altera a dinâmica natural e permite uma falsa sensação de controle do mesmo. Nesta ótica, o meio ambiente é visto como um capítulo à parte no processo de ocupação, fato que pode ser comprovado ao trabalhar com textos ou relatórios que tratam “o homem e a natureza”, “o homem e o meio ambiente”, “a sociedade e meio ambiente”.

Segundo Oliva (1999), ao se referir à relação homem/natureza, admite-se a existência destas duas esferas distintas da realidade, o social e natural, dicotomia esta inexistente, sendo a sociedade parte integrante e indissociável dos processos naturais, seja em sua participação intrínseca, na sua alteração, destruição ou recuperação.

Como exposto, no início da década de 1970, a discussão do pós-Segunda Guerra Mundial tem um novo marco, a Conferência de Estocolmo que, segundo Afonso (2006), é considerada um marco histórico na discussão das questões

ambientais, sendo a primeira reunião voltada à discussão dos aspectos políticos, sociais e econômicos dos problemas ambientais de maneira integrada.

Assim, uma série de discussões antes restritas a círculos científicos e específicos começa a tomar forma e força, de maneira ampla, como a degradação do meio ambiente, os limites dos recursos renováveis e não renováveis da Terra e os modelos de desenvolvimento adotados.

São herança deste momento histórico o surgimento de conceitos apropriados e utilizados - por vezes de forma incorreta - pela grande mídia e alguns setores de pesquisa, como o ecodesenvolvimento, desenvolvimento sustentável e a avaliação de impacto ambiental.

O planejamento das ações que interferem no meio ambiente, considerando as restrições e visando a conservação dos recursos naturais, surge como ferramenta indispensável para garantir a convivência, se não pacífica, organizada das relações transversais e holísticas do homem com o seu meio.

A abordagem integradora de diversas áreas do conhecimento, ou holística, permite o entendimento do processo global, as interconexões entre os elementos e o caráter dinâmico da paisagem, se concretizando especialmente nos Geossistemas (ou ecossistemas).

Contudo, segundo Cereda Junior (2006) a apropriação pelos planejadores e gestores de métodos, metodologias e técnicas para entendimento integrado da paisagem nem sempre é feita de forma a considerar as complexas relações entre os componentes da natureza, e quando o é, baseia-se no paradigma do inventário ambiental, visão que deve ser superada, uma vez que a caracterização e levantamento de dados imutáveis não condizem com a realidade dinâmica e integrada que se materializa no espaço.

Nos estudos relativos a planejamento, observa-se uma série de denominações, como planejamento ambiental, estratégico, participativo ou regional. Seja qual for o método ou metodologia adotada, o planejamento tem como objetivo primário a tomada de decisões. Para isto, são necessários estudos integrados que selecionem e sistematizem informações sobre a área ou local onde ele será aplicado e identifique o estado do ambiente, a pressão exercida sobre ele e a resposta dada pela sociedade para sua melhoria (VETTORAZZI, 2006).

Tais estudos estão presentes como instrumentos na Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), lei nº 6.938/81, em seu artigo 9º, como o estabelecimento de padrões de qualidade ambiental; o zoneamento ambiental; a avaliação de impactos ambientais; o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras.

Se no Brasil institucionalizaram-se instrumentos para entendimento holístico do meio – como o zoneamento ambiental e os métodos de avaliação de impactos ambientais – muitos trabalhos, como confirma Vettorazzi (2006), sejam em âmbito acadêmico, órgãos públicos ou privados, possuem um viés muito mais de inventário de dados físicos, bióticos, sociais e econômicos, pensada por especialistas da área, mas com análise integrada fraca ou inexistente.

A questão se coloca de maneira mais crítica na elaboração do diagnóstico ambiental e na clareza dos critérios que norteiam a delimitação das unidades de zoneamento, com regras para identificação das unidades de zoneamento altamente qualitativas e carregadas de subjetivismo sem critérios técnicos, ficando algumas vezes à mercê da leitura superficial ou ineficiente da equipe envolvida na pesquisa.

Leyton (2004) levanta cinco fatos principais para isto: não se modela a incerteza; fatos qualitativos são transformados em quantitativos sem critério adequado; o meio ambiente é um sistema complexo; a perda de informação e a falta de rigor matemático nos cálculos.

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) permitem o suporte para a análise integrada e a resolução dos cinco pontos listados por Leyton (2004). Contudo, sem metodologia clara e uma visão realmente integradora, o que se faz é uma Cartografia Digital avançada ou mesmo um repositório de mapas em formatos computacionais.

Cabe salientar que a diferença fundamental entre os SIGs e a Cartografia Digital são seus componentes: os Sistemas de Informações Geográficas possuem quatro componentes – entrada, banco de dados, análise e saída – enquanto a cartografia digital possui a entrada, o design dos mapas e a saída.

Tais Sistemas, que surgem também na década de 1970, se converteram em ferramentas essenciais para a manipulação e tratamento dos dados geográficos, sendo que Buzai & Baxendale (2006) afirmam terem trazido uma revolução não só

tecnológica, mas também intelectual, já que a primeira trouxe procedimentos metodológicos e técnicos para o tratamento dos dados espaciais e, a segunda, importantíssima para a discussão ambiental, mudou a forma de pensar a realidade, pois traz a questão da interdisciplinaridade em seu seio e uma nova consciência espacial.

Contudo, se os SIGs trabalham com massas de dados impensáveis, há alguns poucos anos permitem a modelagem em tridimensional inerente aos seus métodos; processam dados de inúmeras fontes, como os de Sensores Remotos, levantamentos de campo e integração de variáveis, a maioria dos trabalhos continua sob a égide de uma cartografia digital automatizada, ou mesmo métodos pautados na simples integração acumulativa dos dados.

Segundo Cereda Junior (2006; 2010) o modelo booleano de integração de dados, a ser discutido no capítulo 2, impõe limites rígidos entre as classes de zoneamento ambiental, e é, ainda hoje, o mais utilizado, seja pela implementação de tais ferramentas nos softwares, seja pela facilidade de uso e acesso às informações. Entretanto, a utilização de tal modelo ocasiona a atribuição dos pesos de cada variável sob critérios fixos, tendo por resultado cartográfico regiões delimitadas com limites estáticos ou rígidos.

Surgem assim modelos que avançam nas formas de representação, onde os pesos das variáveis derivam de resultados de técnicas de suporte à decisão, nos quais as limitações inerentes ao modelo booleano são contornadas, principalmente pelo uso de superfícies de decisões numéricas que melhor se adaptam às transições gradativas entre as ocorrências representadas nos mapas temáticos.

A utilização de métodos de análise multicritério é uma temática amplamente encontrada na literatura especializada. Contudo, para zoneamentos ambientais, ainda é um tema a ser explorado, não só de maneira quantitativa, mas qualitativa, uma vez que diversos trabalhos afirmam trabalhar com análise multicritério, mas sua operacionalização continua se dando por meio de simples procedimentos de sobreposição.

Castillo-Rodriguez *et al.* (2010), que utilizam a análise multicritério para a definição de unidades ambientais geomorfológicas, salientam que nas últimas duas décadas os Sistemas de Informações Geográficas, bem como os produtos de



Sensoriamento Remoto, tornaram a aquisição de dados e a quantificação dos recursos naturais mais fáceis, reduzindo tempo e custo. Os autores apontam, ainda, que se tornou possível a integração com as ferramentas presentes nos pacotes computacionais. Contudo, ao mesmo tempo em que ressaltam este avanço, citam trabalhos com mais de nove anos, como Bastian (2000), Bocco *et al.* (2001), López-Blanco & Billers-Ruíz (1996) e Walsh *et al.* (1998).

Se for considerada a temática da Fragilidade Ambiental, com sua gênese em Tricart (1977), assessor<sup>1</sup> no Brasil, em 1975, do Projeto RADAMBRASIL, bem como Ross (1990; 1994), pesquisador da USP de São Paulo (bem como inúmeros órgãos e projetos), a aplicação de métodos multicritério ainda é pequena, e, mesmo baseada no paradigma booleano, apresenta algumas falhas de implementação quando existentes. Alguns trabalhos devem ser citados, como de Donha *et al.* (2006), Calijuri *et al.* (2007), Fierz (2008) e Nascimento (2009), que avançam na discussão e utilização de novas técnicas para determinação da Fragilidade Ambiental, bem como outros trabalhos, que apresentam vieses diferentes, operacionalizações ou discussões complementares.

## **Objetivos e Hipótese**

A partir dos fundamentos da Ecodinâmica de Tricart (1977) e Ross (1990 e 1994), autores ancorados na análise integrada do ambiente e com a paisagem como unidade integralizadora, procura-se a ruptura nas técnicas de mapeamento de síntese inseridos no paradigma booleano, conforme proposto por Cereda Junior (2006), com a geração do Mapa de Fragilidade Ambiental baseada na abordagem multicritério com utilização dos métodos de Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada. Como objetivo específico, será comparado o resultado obtido pelo autor para a Carta de Fragilidade Ambiental a partir do uso de operadores booleanos com aqueles a serem produzidos com os métodos apresentados nesta tese.

---

<sup>1</sup> assessor para a elaboração de cartas geomorfológicas e desenvolvendo a metodologia para as pesquisas sobre o Quaternário em várias regiões do país, em estudos visando o planejamento do rio São Francisco, do Pantanal e do litoral da Bahia. Participou ainda de programas de pesquisas aplicadas no Rio Grande do Sul, onde realizou estudos ecológicos em colaboração com a UFRGS. (CARDOSO, 2003)

Supõe-se que um método de análise multicritério com métodos não booleanos, que relacione um amplo conjunto de variáveis, associado a um Sistema de Informações Geográficas, traduza a essência teórico-metodológica da proposta de Fragilidade Ambiental de Ross (1994). A análise multicritério também traz novos olhares e horizontes sobre o uso dos sistemas computacionais para análise geográfica, uma vez que, contraditoriamente, os avanços das técnicas parecem cada vez mais se aproximarem de uma cartografia digital/automatizada e não da cartografia de síntese, que permite aos gestores melhor embasamento para a organização territorial de forma abrangente e integrada, a partir de fatores ambientais que possuem relações indissociáveis.

## **CAPÍTULO 1**

### **PRESSUPOSTOS AMBIENTAIS**

*É triste pensar que a natureza fala e que o gênero humano não a ouve. Victor Hugo*

Depreende-se da definição de meio ambiente, dada pela ABNT (1989), como se poderia esperar de uma norma técnica, de caráter conciso, o seguinte: “O meio ambiente consiste em um determinado espaço, onde ocorre a interação entre os componentes bióticos (fauna e flora), abióticos (águas, rocha e ar) e bióticos-abióticos (solo)”.

Entretanto, o meio ambiente deve ser entendido de maneira mais ampla, principalmente no que tange à intervenção humana. Grinover (1989), por exemplo, entende o meio ambiente como um jogo de interações complexas entre o meio suporte (elementos abióticos), os elementos vivos (elementos bióticos) e as práticas sociais produtivas do homem.

Em tais ocupações humanas, os padrões espaciais e o meio ambiente, segundo Tuan (1980), são reflexos do estilo de vida de um povo, que é a soma de suas atividades econômicas, sociais e ultraterrenas.

Para Sachs (1986), o meio ambiente vivido e transformado pela sociedade abarca o natural, as tecno-estruturas criadas pelo homem (ambiente artificial) e o ambiente social (ou cultural).

Assim, a influência humana não pode ser desconsiderada, sendo, esta, responsável pela modificação da dinâmica espacial, e, segundo Tommasi (1994), tais mudanças, decorrentes da ação dos processos do meio físico ou dos processos tecnológicos caracterizam alterações ambientais.

George (1972), além de considerar o meio ambiente como um sistema de relações extremamente complexas, muito sensível às variações de qualquer um de seus fatores e desencadeando reações em cadeia onde havendo qualquer ação humana imprudente será rompido um desses equilíbrios (mantido por esteios bem pouco firmes), assim o define:

meio global com o qual se defrontam as coletividades humanas e diante do qual elas se encontram em situação de relacionamento dialético, feito de ações e de reações, e que põe em campo todos os elementos do meio. Dependendo do nível técnico da civilização dos grupos humanos e da influência exercida pelo meio natural, o meio ambiente surge predominantemente como obra da natureza ou como obra humana: finalmente, em seu interior desenrolam-se processos físicos e fisiológicos que os homens desencadeiam e controlam, ou aos quais devem se submeter, tanto nas condições de sua existência como em sua própria substância.

Mesmo sendo a ruptura desta frágil unidade - meio ambiente - inevitável, Garcias (1997) considera que a ocupação do espaço para a edificação concentrada do *habitat* humano resulta na alteração do meio ambiente natural, ponderando que concomitantemente a ela ocorre, também, a busca pelo equilíbrio natural, seja ele com a ocupação urbana ou por processos naturais, com a renovação contínua do meio ambiente se concretizando espacialmente no Geossistema.

Por Geossistema entende-se a “organização espacial oriunda dos processos do meio ambiente físico e biótico”, conforme Christofolletti (1990) e, de forma mais abrangente, na definição de Monteiro (1978), como

um sistema singular, complexo, onde interagem elementos humanos, físicos, químicos e biológicos e onde os elementos sócio-econômicos não constituem um sistema antagônico e oponente, mas sim estão incluídos no funcionamento do próprio sistema.

Assim, podemos entender o Meio Ambiente, ao se integrar ao conceito de Geossistema, como a soma e as relações entre os domínios ecológico, social, econômico e político, incluindo todas as interações entre os elementos naturais e a sociedade humana.

Sabendo, portanto, que os processos ambientais estão em ação, Bitar (1995), entende-os como processos do meio físico e processos tecnológicos. Os processos do meio físico são aqueles decorrentes das interações entre os elementos, com predominância de componentes abióticos e referem-se ao desenvolvimento de sucessões de fenômenos potencializados pela interação de componentes materiais e tipos de energia, podendo ser deflagrado, acelerado ou retardado por agentes físicos, químicos e biológicos (fauna e flora). Já os processos tecnológicos

relacionam-se às interferências do homem no meio ambiente, sendo responsáveis pelas atividades modificadoras do mesmo.

Para o entendimento deste complexo processo, a análise ambiental, torna-se, assim, indispensável à necessidade de se conhecer o ambiente em que se vive e, assim, ser possível propor planejamento e manejo do uso do solo, principalmente em ambiente urbano.

Conforme afirma Vilas Boas (2005) a gestão do meio ambiente pode ser definida como um processo de tomada de decisões que devem considerar a variável ambiental de um sistema. Decisões relacionadas com o meio ambiente são decisões complexas que buscam alcançar objetivos tangíveis e/ou intangíveis, envolvem aspectos essencialmente quantitativos e/ou eminentemente qualitativos e os interesses em conflito que as cercam são significativos. Tudo isso dificulta o processo de escolha de caminhos e o uso de instrumentos auxiliares na escolha de alternativas de políticas, programas e projetos ambientais.

Especificamente no contexto urbano brasileiro, Grostein e Jacobi (1998), salientam que os problemas ambientais têm-se avolumado a passos agigantados e sua lenta resolução tem-se tornado de conhecimento público pela virulência dos impactos.

Tauk (1995) lembra as dificuldades encontradas para se realizar um estudo de análise do meio ambiente, uma vez que as preocupações com o espaço em que a humanidade ocupa são relativamente recentes. A grande problemática se insere no estabelecimento de padrões para tais estudos, com uma base metodológica que atenda aos requisitos de qualquer local, com vistas ao ordenamento territorial, nos projetos de ecodesenvolvimento regional, nos estudos de impactos ambientais, entre outros.

Deve-se, contudo, salientar que tal metodologia, a ser adotada para a integração das variáveis ambientais, deve respeitar os diversos níveis presentes na paisagem, sejam as características físicas, humanas, econômicas, de tal forma que se respeite as condições locais, sua história e que considere a experiência dos pesquisadores da área, evitando a criação de modelos em série de análises ambientais somente verticais.

Se, segundo definição de Silva e Souza (1988), a análise ambiental equivale a desmembrar o ambiente em suas partes componentes internas e externas, a grande questão colocada é como se entender tal complexidade, onde os componentes e variáveis estão em intensa relação, em um Geossistema. Neste sentido, o ambiente tem caráter integrador, uma visão sintética da realidade em que o pesquisador se encontra inserido

Surge, assim, a abordagem integradora de diversas áreas do conhecimento, ou *holística*, que busca o entendimento do processo global, as conexões entre os elementos e o caráter dinâmico da paisagem. Ressalta-se que esta deve ser entendida não pela sua compartimentação, mas sim, pelo resultado da compreensão da relação dialética existente entre seus elementos, já que é um instrumento de análise que se desenvolve a partir do estabelecimento de um paradoxo, qualidade esta dos sistemas de interação complexos, como a paisagem, a ser apresentada e discutida posteriormente.

Meirelles (1997) explica que o termo holístico deriva do conceito de *holismo*, que é usado em Filosofia para indicar a tendência da natureza em formar todos por meio de uma evolução criativa, que é maior do que a soma das partes. Conseqüentemente, um levantamento holístico considera que a paisagem é mais do que simplesmente o total de seus atributos ou de seus parâmetros observados de forma separada. Este termo pode ser considerado como sinônimo do levantamento integrado, no qual o resultado da combinação de seus componentes é maior que a soma das partes. Contudo, a busca da investigação em conjunto não deve ficar somente no plano teórico, mas também com a modelagem dos dados e o uso de sistemas de informação, entender e compreendê-lo da melhor forma.

Após este entendimento e compreensão, ações devem ser tomadas, e, segundo Tommasi (1994), alterações ambientais podem ser qualificadas e quantificadas, sendo ou não favoráveis ao ecossistema e à sociedade humana. Neste sentido, a Agenda 21 (ONU, 1992) - plano de ação para ser adotado global, nacional e localmente, por organizações do sistema das Nações Unidas, governos e pela sociedade civil, em todas as áreas em que a ação humana impacta o meio ambiente - com suas bases conceituais pautadas na sinergia das áreas ambiental, social e econômica, indica que

a crescente pressão sobre os recursos naturais vem criando competição e conflitos e resultando no uso sub-otimizado tanto da terra quanto de seus recursos. Planejamento físico integrado, planejamento de uso integrado e gerenciamento ambiental são os caminhos práticos para se chegar à solução para tais conflitos e para se mover em direção a um uso mais eficiente e efetivo da terra e de seus recursos naturais. Está reconhecido que esta integração deve se dar em dois níveis, considerando-se de um lado todos os fatores sociais e econômicos e de outro todos os componentes e fontes ambientais, tais como: ar, água, biota, geologia, recursos da terra etc.

A busca por abordagens integradas e transformadoras está presente no capítulo 10 da Agenda 21 (ONU, 1992), em específico em seu capítulo denominado Abordagem Integrada do Planejamento e do Gerenciamento dos Recursos Terrestres, indicando que é imprescindível:

- Adotar sistemas de planejamento e gerenciamento que facilitem a integração de componentes ambientais tais como ar, água, terra e outros recursos naturais, utilizando o planejamento ecológico da paisagem (LANDEP) ou outras abordagens centradas, por exemplo, em um ecossistema ou uma bacia hídrica;
- Adotar sistemas melhorados para a interpretação e a análise integrada de dados sobre o uso da terra e os recursos terrestres;
- Aplicar sistematicamente técnicas e procedimentos que permitam avaliar os impactos ambientais, sociais e econômicos, bem como os riscos, custos e benefícios das ações específicas;
- Analisar e testar métodos de inclusão das funções da terra e dos ecossistemas e dos valores dos recursos terrestres nas contas nacionais;
- Fortalecer os sistemas de informação, observação sistemática e avaliação dos dados ambientais, econômicos e sociais vinculados aos recursos terrestres nos planos mundial, regional, nacional e local, bem como o potencial produtivo da terra e as modalidades de uso e gerenciamento da terra;
- Fortalecer a coordenação entre os atuais sistemas setoriais de dados sobre a terra e os recursos terrestres e reforçar a capacidade nacional de reunir e avaliar dados.

Esta busca pela abordagem integrada, inserida num processo de planejamento com uso de sistemas de informação, bem como técnicas e procedimentos, está presente na Agenda 21 Global e vem sendo resgatada nas Agendas 21 Locais, sob a égide da chamada sustentabilidade.

O Relatório Brundtland – Nosso Futuro Comum – produzido em 1987 pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento, ONU (1987), traz a definição de desenvolvimento sustentável como sendo o desenvolvimento que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades.

De maneira mais completa, a Food and Agriculture Organization of the United Nations define sustentabilidade como sendo o gerenciamento e conservação das bases de recursos naturais, e a orientação de mudanças tecnológicas e institucionais de tal forma a assegurar a obtenção e a satisfação das necessidades humanas para as gerações atuais e futuras. Este desenvolvimento sustentável (nos setores agrícola, florestal e de pesca) conserva terra, água, plantas e animais sendo ambientalmente não degradante, tecnicamente apropriado, economicamente viável e socialmente aceitável. (FAO, 1988)

A sustentabilidade, como termo ou mesmo como entendimento conceitual, antes restrita aos meios científicos e governamentais, a cada dia toma maior vulto na mídia, sendo, em diversos casos, apropriada de forma indevida. Esta apropriação, com fins exploratórios ou danosos, principalmente no que tange ao meio ambiente (entendido de maneira integrada), deve ser combatida principalmente ao se trabalhar com mapeamento de variáveis ambientais.

Diversas áreas do conhecimento se apropriaram do “meio ambiente” como objeto de estudo, seja para planejamento, exploração econômica ou para fins de preservação. Contudo, tais interesses estão intrinsecamente ligados, com uma linha tênue de separação e o mesmo ocorre com o termo sustentabilidade. Uma das maiores complexidades na caracterização e proposição das dimensões da sustentabilidade é, justamente, o entendimento do processo global e a sua efetivação em processos de planejamento e gestão espacial.



Para Lanna (1995), o planejamento ambiental constitui-se em instrumento fundamental do processo de gestão do espaço, sendo que para sua realização existe uma grande disponibilidade de métodos e modelos, que variam desde a concepção filosófica sobre a qual se constrói até a unidade espacial de referência, como bio-região, zona ecológico-econômica, bacia hidrográfica, etc.

O planejamento ambiental definido por Lanna (1995) é

um processo organizado de obtenção de informações, reflexão sobre os problemas e potencialidades de uma região, definição de metas e objetivos, definição de estratégias de ação, definição de projetos, atividades e ações, bem como definição do sistema de monitoramento e avaliação que irá retroalimentar o processo. Este processo visa organizar a atividade socioeconômica no espaço, respeitando suas funções ecológicas de forma a promover o desenvolvimento sustentável.

Santos (2004) define planejamento como um meio sistemático de determinar o estágio onde se encontra um determinado fato, onde se deseja chegar, bem como as estratégias para atingir tais objetivos. Corrobora, portanto, a autora, a importância não somente das fases de coleta, organização e análise sistematizada da informação, mas, também, do objetivo de tais ações: decisões ou escolhas acerca das melhores alternativas para o aproveitamento dos recursos disponíveis.

Segundo Christofletti (1999), o conhecimento geográfico é o suporte para o planejamento ambiental, e este

envolve-se com os programas de utilização dos sistemas ambientais, como elemento condicionante de planos nas escalas espaciais do local, regional e nacional, uso do solo rural, execução de obras de engenharia e planejamento econômico. Em função de focalizar os ecossistemas e os Geossistemas (sistema físico), os seus objetivos podem sublinhar perspectivas ecológicas e geográficas.

Desta forma, o planejamento deve andar atrelado aos anseios e necessidades dos setores sociais e governamentais, expressos em políticas ambientais, tal como define Meirelles (1997), como sendo o componente institucional estruturado de tal forma que garanta a implantação dos procedimentos da Agenda 21, capítulo 10, com sucesso.

Tal implementação vem se dando no âmbito das prefeituras a partir dos Planos Diretores, que tem por fundamento orientar a atuação do poder público e da

comunidade em suas atividades, levando à formulação de políticas públicas. O chamado zoneamento territorial, que serve de instrumento legal para direcionar os (ab)usos no município, vem sendo utilizado, também, com o objetivo de compartimentar os diversos sistemas ambientais componentes do espaço estudado, colaborando na tentativa de integração entre as variáveis consideradas (SANTOS, 2004).

Para tal integração se realizar são necessárias metodologias e técnicas aplicáveis e, segundo Christofolletti (1999), devem ocorrer pela vertente holística e reducionista de forma simultânea e interativa.

A primeira apresenta os princípios gerais, necessários à compreensão de como as entidades ambientais físicas expressam-se em organizações espaciais, se estruturam e funcionam como diferentes unidades complexas em si mesmas e na hierarquia de aninhamento, com foco na complexidade do sistema todo. A segunda, reducionista, foca-se nas partes, ou seja, um estudo em cada um dos componentes, a fim de melhor conhecer seus aspectos, que juntos formam a estrutura complexa da abordagem holística.

Este trabalho ancora-se no segundo viés, apresentado por Meirelles (1997), ou seja, o desenvolvimento (ou aprimoramento) de uma metodologia constituída de procedimentos sequenciais, que resultem na transformação das informações relativas aos fatores físico, econômico e social, proporcionando aos planejadores subsídios para suas decisões.

Para o desenvolvimento e a aplicação de metodologias para avaliação do meio físico, métodos e técnicas devem ser levados em consideração. Entretanto, de nada servem se não estiverem embasadas numa forte carga conceitual. Por isto, a conceituação e entendimento da paisagem são imprescindíveis para a completa compreensão do ambiente, não só se pautando em resultados técnico-operacionais.

## 1.1 Paisagem e Representação

Houaiss e Villar (2001) definem paisagem como

extensão de território que o olhar alcança num lance; como um conjunto de componentes naturais ou não de um espaço externo que pode ser apreendido pelo olhar; como espaço geográfico de um determinado tipo.

Os dicionários que melhor definem o termo *paisagem* são os que utilizam formulações do século XVII, segundo Bolós y Capdevila (1992), como no dicionário Webster, em que a paisagem é definida de forma mais ampla, contemplando:

- a esfera pictórica "a imagem que representa a vista de um setor natural";
- a esfera física, "superfície terrestre, relevo de uma região em seu conjunto produzido ou modificado por forças geológicas";
- e a esfera que se pode chamar de integrada "território ou parte da superfície terrestre que a vista pode observar simultaneamente, incluindo todos os objetos discernidos".

Nestes conceitos, percebe-se a forte influência do sentido visual, para caracterização do termo, ligado ao que poderíamos chamar de *fenótipo* do espaço. A consulta de diversos dicionários mostra que a paisagem é principalmente entendida como "o que se vê num lance de vista".

Entretanto, para a ciência geográfica, a *paisagem* se coloca como um desafio não só conceitual, mas também metodológico. Bertrand (1972) afirma que *estudar uma paisagem é, antes de tudo, apresentar um problema de método*.

A questão reside, principalmente, nas críticas de diversos cientistas à subjetividade envolvida no conceito. Esta subjetividade vai além da formação científica e cultural do pesquisador, envolvendo suas relações sociais e filiação filosófica. Como já apresentado, ao se tratar da paisagem sob a ótica holística, está se levando em consideração que o ambiente é uma entidade totalmente integrada podendo, portanto, ser estudada como um todo.

A concepção do estudo das paisagens, a partir da ótica sistêmica, visa garantir os fundamentos conceituais, sobre os quais deveria estar inserida a análise sobre a sustentabilidade. Rodriguez e Vicente da Silva (2002), afirmam que enquanto a sustentabilidade é vista como um paradigma no sentido de rever as interações da Sociedade com a Natureza, convertendo-se na bússola para a implementação dos processos de planejamento e gestão ambiental e territorial, isto exige a aplicabilidade de sólidas fundamentações teóricas e metodológicas, sustentadas em visões holísticas, integradoras e sistêmicas das unidades ambientais naturais e sociais.

Os autores explicam que a idéia de ter uma visão totalizadora das interações da Natureza com a Sociedade no mundo acadêmico começou no final do século XVIII e princípio do século XIX, com os trabalhos de Kant, Humboldt e Ritter. Assim, a análise das interações da Natureza com a Sociedade foram empreendidas dentro do contexto da Geografia e tiveram como consequência o surgimento de duas formas de analisar a configuração do planeta Terra: uma visão voltada para a Natureza (com as concepções principalmente de Humboldt, e posteriormente do russo Dokuchaev), firmando as bases para a Geografia Física e a Ecológica Biológica, e uma visão centrada no Homem e na Sociedade, que foi a concepção da Geografia Humana ou a Antropogeografia de Karl Ritter.

Alexander *von* Humboldt, cientista alemão que viveu entre 1769 e 1859, já considerado o último acadêmico completo das ciências naturais, apresentou ideias para a formação de um corpo científico sobre a paisagem, presentes em sua obra fundamental “Cosmos”.

Bolós y Capdevila (1992) afirma que

para Humboldt, a Natureza (incluindo o homem) vive graças a uma mudança contínua de formas e movimentos internos. Humboldt adota uma concepção de natureza perfeitamente adaptada à concepção de paisagem integrada.

O cerne da concepção de Humboldt sobre a paisagem está em definir a importância das relações existentes entre os elementos, considerando este conjunto funcional como um organismo vivo (DIAS, 1998).

Sobre Humboldt, Schier (2003) ainda afirma que ele possuía visão holística da paisagem, de forma que associava elementos diversos da natureza e da ação humana, sistematizando, assim, a ciência geográfica.

Conforme afirma Rodriguez e Vicente da Silva (2002), esta visão possuía uma acepção fortemente natural, na qual era expressa a ideia da interação entre todos os componentes naturais, como rocha, relevo, clima, água, solo e vegetação, e um espaço físico concreto. Este conceito integrador expressava nova visão da Geografia Física em contradição com a visão tradicional da análise isolada dos componentes naturais, que não permitia a interpretação das influências mútuas entre os componentes naturais, empreendidos sob uma visão metafísica e mecanicista. Também entrava em contradição com a visão extrema do determinismo físico e ambiental, empreendido pelas concepções radicais da Geopolítica Alemã, encabeçada por Ratzel.

Entretanto, cabe destacar que o termo holístico só vai surgir mais tarde, em 1926, com o sul-africano Jan Christiaan Smuts, com o conceito de que o universo, bem como suas partes, origina unidades que formam um todo de complicação crescente (DIAS, 1998).

Bolós y Capdevila (1992) assim descreve, segundo os preceitos de Jan Christiaan Smuts, o holístico:

Estas unidades globais – compostas da matéria inerte, matéria viva e ‘matéria pensante’ (homem) –, não se reduzem nunca à soma de seus elementos constituintes, uma vez que cada elemento aparece disposto, interconectado, estruturado de uma determinada maneira.

Schier (2003) faz um resgate sucinto e completo do conceito de paisagem nas Escolas Geográficas. A Geografia Alemã, representada por Otto Schlüter, Siegfried Passarge e Karl Hettner, utiliza o conceito da paisagem como categoria científica e a compreendeu até os idos de 1940 como um conjunto de fatores naturais e humanos.

Dias (1998) ressalta que a utilização do termo *landschaft*, base da Geografia Germânica, foi o primeiro tratamento científico do conceito de paisagem. A *landschaft* foi posteriormente ampliada em seu corpo teórico pela *landschaftskunde*

(segunda metade do século XIX), que buscou a integração ainda que com forte carga determinística nas relações entre o homem e o meio.

Nos anos 1960, Victor Sotchava, especialista siberiano, pela primeira vez tentou elaborar a Teoria dos Geossistemas, utilizando toda a teoria sobre paisagens (*Landschaft*) elaborada pela Escola Russa, interpretando-a sob a visão da Teoria Geral de Sistemas. Assim, o conceito de *Landschaft* (paisagem natural) foi considerado como sinônimo da noção de Geossistema sendo a paisagem considerada como uma formação sistêmica, formada por cinco atributos sistêmicos fundamentais: estrutura, funcionamento, dinâmica, evolução e informação, trazendo à Geografia Física a análise funcional (RODRIGUEZ e VICENTE DA SILVA, 2002).

Já os catedráticos da Escola Francesa, influenciados por Paul Vidal de la Blache e Jean Rochefort, caracterizaram a *paysage* (ou o *pays*) como o relacionamento do homem com o seu espaço físico. Segundo Rodriguez e Vicente da Silva (2002), Paul Vidal de La Blache considerava o homem como o agente principal que modelava o planeta Terra e que a natureza era a base das possibilidades, para que a sociedade a modelasse em dependência de sua cultura. O entorno levou a uma concepção não determinista (ou determinismo social) no estudo das relações Natureza-Sociedade.

Mendonça e Venturi (1998) entendem que o termo francês *pays* representa uma derivação direta de *pagus* e, possivelmente, foi nessa língua que a expressão paisagem [*paysage*] primeiramente surgiu entre as línguas ocidentais, por volta do século XV, ainda que este termo pudesse estar também relacionado às expressões artísticas, como parte do sistema simbólico que permeia a relação do homem com a realidade.

De acordo com Bertrand (1972), a centralização da Geografia Francesa na noção de *região natural* não permitiu avanços significativos, uma vez que tal conceito foge à compreensão racional tanto pela definição quanto pelo seu conteúdo.

Em meados da década de 1940, nos Estados Unidos, a Revolução Quantitativa substituiu o termo *landscape*, que estava, até então, em uso naquele país, sob influência da geografia alemã, pelo conceito de *região* (Richard

Hartshorne, 1899-1992), sendo esta um conjunto de variáveis abstratas deduzidas da realidade da paisagem e da ação humana.

Paralelamente, surgiu na Alemanha e no Leste Europeu uma ideia mais holística e sinérgica da *landschaft*, denominada *landschaftskomplex*, que definiu as unidades da paisagem pelo conjunto dos seus processos ecológicos.

Esta ideia se encontra, entre outros, também na *landschaftsökologie* proposta por Carl Troll, em 1939, a chamada *ecologia da paisagem* ou mesmo geoecologia, proposta que tem origem em sua experiência em interpretação de fotografias aéreas.

Sobre a Geoecologia, Rodriguez e Vicente da Silva (2002) explicam que se tratava não só de estudar as propriedades dos Geossistemas no estado natural, mas procurar as interações, as pontes de relacionamento com os sistemas sociais e culturais, em uma dimensão sócio-ecológica, em articular a paisagem natural e a paisagem cultural. Essa visão de paisagem permite sua consideração como unidade do meio natural, como um dos sistemas que entram em interação com os sistemas sociais, para formar o meio ambiente global, ou seja, os sistemas ambientais.

Neste conceito, "as paisagens são divididas em *ecótopos* (ou *landschaftzellen*) que são unidades inteiramente comparáveis ao ecossistema" (BERTRAND, 1972).

Embora Bertrand (1972) considere o método desenvolvido por Troll um grande avanço sobre os estudos fragmentados dos geógrafos e biogeógrafos, por reagrupar os elementos da paisagem e reservar um lugar para o fenômeno antrópico, afirma, também, que se "trata de um método mais ecológico que geográfico", já que o autor não discute a questão da representação cartográfica de suas análises.

Dias (1998), em sua pesquisa histórica, afirma que, entre 1950 e a década de 1970, os estudos de paisagem passaram por uma estagnação, praticamente esquecida como objeto de estudo da ciência geográfica, retornando à Geografia (especialmente a Física), a partir da concepção de Geossistema. Vale destacar que durante este período se fortalecem os estudos em Cartografia Geotécnica nas Engenharias, principalmente para o Planejamento Regional.

As abordagens posteriores da Geografia Humana nas escolas humanística, cultural, e, inclusive, na Geografia Crítica, levaram a romper essa concepção de articulação entre a Paisagem Natural e a Paisagem Cultural. Considerava-se, assim, a Paisagem de uma forma isolada, como a aparência do espaço, sendo o espaço formado apenas pelas ações sociais.

A Teoria Geral dos Sistemas, proposta pelo biólogo Bertalanffy (1977), com bases na Segunda Lei da Termodinâmica, visava tanto a investigação científica dos sistemas em várias ciências quanto sua aplicação tecnológica e, ainda, a própria filosofia dos sistemas, no sentido de promover a discussão desse novo paradigma científico (RODRIGUES, 2001).

Rodrigues (2001) afirma que, até meados do século XX, essa teoria permaneceu pouco difundida, mas uma série de apropriações em diversos ramos científicos ocorreu a partir de então.

Segundo Gregory (1992), a Teoria Geral dos Sistemas propõe que os sistemas podem ser definidos como conjuntos de elementos com variáveis e características diversas, que mantêm relações entre si e o meio ambiente. A análise poderá estar voltada para a estrutura desse sistema, para seu comportamento, para as trocas de energia, limites, ambientes ou parâmetros.

Na visão de Bertalanffy (1977), um sistema pode ser fechado, se nenhum material entrar ou sair dele; é chamado de aberto se há importação e exportação de matéria. O sistema aberto define-se como um sistema com troca de matéria com seu ambiente, apresentando importação e exportação, construção e demolição dos materiais que o compõem.

A Geografia absorveu, a partir da década de 1960, tal teoria principalmente na área de Geografia Física, já que a abordagem positivista afastava qualquer possibilidade de utilização na Geografia Humana, segundo seus críticos.

Sotchava, Geógrafo soviético, foi responsável por conceituar os modelos e os sistemas, dentro da ciência da paisagem e, em 1963, diante da noção de *ecossistema* apresentada por Tansley em 1934, adaptou o termo a um conceito geográfico, inserindo nele a categoria espacial e definiu o conceito de *Geossistema* (DIAS, 1998).



Bolós y Capdevila (1992) esclarece que, para Sotchava, o Geossistema é um fenômeno natural que inclui todos os elementos da paisagem como um modelo global, territorial e dinâmico, aplicável a qualquer paisagem concreta, e que todo sistema natural é classificado como aberto, uma vez que nele entra e sai determinada quantidade de matéria e energia, fazendo dele um sistema dinâmico.

Sotchava (1977) afirma que o conceito de Geossistema vem conferir

precisão aos limites entre a Geografia Física e as outras disciplinas geográficas, definindo, ao mesmo tempo, a essência do seu campo de investigações e o seu lugar no conjunto da Geografia.

Sob esta ótica, Sotchava (1977) afirma que a preocupação central dos estudos da Geografia Física não é o simples estudo dos componentes da natureza, mas sim, as conexões entre eles, devendo o estudo não ficar restrito à morfologia da paisagem e suas subdivisões, mas extrapolar para o estudo da sua dinâmica, incluindo as conexões entre o homem e a natureza.

Intrínseco ao Geossistema, três são seus aspectos característicos, segundo Troppmair (1987), este sendo um sistema espacial natural, aberto e homogêneo: a morfologia (expressão física do arranjo dos elementos e da consequente estrutura espacial), a dinâmica (o fluxo de energia e matéria que passa pelo sistema e que varia no espaço e no tempo) e a exploração biológica (da flora, da fauna e do homem).

Troppmair (1983) afirma também que a estrutura, as inter-relações e a dinâmica que ocorrem em determinada área formando um Geossistema, dão a feição, a fisionomia daquele espaço, que nada mais é do que a própria paisagem vista como um sistema, como unidade real e integrada. Ou seja: a paisagem é um fato concreto, um termo fundamental e de importante significado para a Geografia, sendo a paisagem a fisionomia do próprio Geossistema.

Sotchava (1977) propõe a classificação de Geossistemas de forma bilateral (homogeneidade e diferenciação), em duas unidades: *geômero* (qualidade estrutural homogênea) e *geócoro* (estrutura diversificada).

Tricart (1979) critica esta proposta de Sotchava, afirmando que os princípios de classificação não são explicados, e que, por conta dos exemplos fornecidos reduzidos e pouco demonstrativos, não havia compreendido.

Se a discussão da paisagem é indispensável para se construir a ciência, metodologias que busquem entender as complexas relações que irão se concretizar no espaço são também fundamentais. Passos *apud* Dias (1998), afirma que responde à orientação da Geografia para o concreto, o visível, a observação do terreno, enfim, para a percepção direta da realidade geográfica.

Dias (1998) admite que a paisagem não deve ser vista apenas como determinada porção do espaço composta de elementos externos, visíveis e estáticos, mas como um mosaico constituído de elementos concretos e abstratos, visíveis e invisíveis, que materializam as relações estabelecidas entre o homem e o meio, e que é a expressão da organização de todos os elementos no espaço geográfico.

Bertrand (1972) talvez seja um dos pensadores da paisagem que melhor consegue integrar a esfera natural e a esfera humana de maneira tão completa e, ao mesmo tempo, mostrando ser uma tarefa simples, sem ser simplista:

“a paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados. É uma determinada porção do espaço, resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução.”

A partir da Teoria Geral dos Sistemas e, conseqüentemente, do Geossistema, surgiram para a Geografia Física diversas propostas de modelos conceituais, morfológicos e de classificação dos sistemas, incluindo-se os naturais (sistemas abertos), como as propostas de classificação apresentadas por Sotchava (1978) e por Bertrand (1972) e a abordagem ecodinâmica de Tricart (1977).

Nos anos 1980, a Geografia Física das Paisagens começou a ser denominada Ecogeografia ou Geoecologia, segundo Rodriguez e Vicente da Silva (2002). A Ecogeografia foi desenvolvida principalmente pela escola de Jean Tricart, sendo as unidades ecodinâmicas consideradas por essa linha de pensamento como sistemas ambientais por excelência, fundamentados no relevo e na Geomorfologia.

Tal abordagem - Geoecologia das Paisagens - advém dos anos 1930, por Karl Troll, conforme explicado anteriormente.

Apesar de diversas objeções feitas pela Escola Geográfica Marxista, Tricart (1980) defende níveis de compatibilização dessa teoria com a lógica dialética, num artigo em que se preocupa com a elucidação das funções do trabalho de campo na dialética da Geografia, afirmando Rodrigues (2001) que muito trabalho está por ser realizado no plano metodológico e que essa teoria necessitaria ser rediscutida para, de fato, ser aplicada ou aproveitada em estudos geográficos.

Ross (1994), por meio da análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados adota como unidade geográfica de análise a *bacia hidrográfica*, onde as intervenções humanas devem ser planejadas com o objetivo de um correto ordenamento territorial.

Em seu trabalho *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados*, Ross (1994) busca nos conceitos de Tricart (1977) fonte para criação de novos critérios de avaliação do meio físico e biótico, com aplicação no planejamento territorial.

Ross (1990) afirma que devido à

dificuldade da representação cartográfica a cores, a sobrecarga de informações típicas das cartas morfo ou ecodinâmicas, além dos problemas de escalas de representação geralmente médias ou pequenas, exigiram adaptações com modificações significativas na metodologia e na representação cartográfica final.

Pautado na base de Tricart (1977), e amparado pela discussão promovida por Ross (1990 e 1994), propõe-se discutir mais profundamente a Fragilidade (Ambiental e Ecodinâmica) e as Unidades que a compõe, bem como a unidade de paisagem adotada no presente trabalho: a Bacia Hidrográfica.

## 1.2 Bacia Hidrográfica como Unidade de Paisagem

Antes de apresentar a discussão sobre bacia hidrográfica como unidade de paisagem, é importante definir o que é uma bacia. Chorley *et al.* (1984) define bacia hidrográfica como sendo um sistema ou unidade geomorfológica, constituída de divisores de água, encostas, redes de drenagem e um canal principal de maior extensão. Definição que Polette *et al.* (2000) levam como base para definir como uma área topográfica, drenada por um curso de água ou sistema conectado de cursos de água de forma que toda vazão afluyente seja descarregada por uma simples saída.

Para Silveira (1993), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural de água precipitada, onde os escoamentos convergem para um único ponto, apresentando como constituintes básicos o conjunto de vertentes e as redes de drenagem, formadas pela confluência dos cursos d'água.

A dimensão “bacia hidrográfica”, segundo Cárcamo *apud* Arcuri 1997, é uma unidade geográfica natural que constitui um sistema, geralmente complexo, que, por sua própria natureza e característica, requer ser tratado em conjunto, do ponto de vista de sua operação e gestão.

Barrow (1998) conceitua bacias hidrográficas já no contexto de unidades de análise, sendo unidades biogeofísicas, com alto grau de integridade funcional, sendo sistemas relativamente homogêneos, mesmo quando as seções superiores, medianas e baixas possuem diferentes condições e atividades humanas. Assim, cada bacia hidrográfica é única, mas com características hidrológicas, geomorfológicas e ecológicas que permitem a classificação em unidades de paisagem operacional, servindo para planejamento e gestão.

Prochnow (1990) destaca a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, afirmando que a gestão e/ou gerência de bacia hidrográfica é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver questões ambientais nela existentes, mediante procedimentos integrados de planejamento e de administração.

Desta forma, pode-se verificar que o termo bacia hidrográfica possui em si mesmo um forte grau de integração e relacionamento com o meio físico e o meio humano. Rodrigues e Carvalho (2005) definem bacia hidrográfica de maneira

bastante completa, como sendo um meio natural espacialmente definido, no qual seus elementos mantêm relações dinâmicas entre os componentes físicos, biológicos e socioeconômicos. Pela sua distribuição espacial, apresentam, na maioria dos casos, diferentes paisagens que, em geral, representam diferentes estágios de sua evolução em termos de Geossistemas e geofácies.

Segundo o conceito de sistema aberto já discutido anteriormente, qualquer bacia hidrográfica representa um sistema aberto, onde há intensa troca de energia e de matéria entre os seus componentes havendo, ainda, entrada e saída de ambas do sistema, daí ser chamado de sistema aberto. Os sistemas abertos são integrantes dos chamados sistemas não-isolados, ou seja, que possuem relações com os demais sistemas do universo, conforme Christofolletti (1979).

Ainda segundo Christofolletti (1979) a análise de bacias hidrográficas começou a apresentar mais objetividade a partir de 1945, com trabalhos de Horton, com a colaboração de entre outros, como Strahler, que procurou leis para o desenvolvimento dos rios e de suas bacias, com uma abordagem quantitativa.

Quanto ao gerenciamento de bacias que, conforme Lanna (1995) é o

instrumento que orienta o poder público e a sociedade, no longo prazo, na utilização e monitoramento dos recursos ambientais – naturais, econômicos e sócio-culturais -, na área de abrangência de uma bacia hidrográfica, de forma a promover o desenvolvimento sustentável.

E ainda afirma que

teorias e metodologias de gestão ambiental devem se basear em um conceito superior, integrador do sistema como um todo, para que a análise detalhada de cada parte faça sentido: ou seja, o tratamento detalhado de cada parte pode ser realizado coerentemente, apenas se isto não resultar na perda da visão integradora do conjunto.

Desta forma, pode-se entender que a bacia é uma das alternativas para o planejamento e gerenciamento ambiental, tendo por vantagem que a rede de drenagem de uma bacia consiste em um dos caminhos preferenciais das relações de causa-efeito, particularmente aquelas que envolvem o meio hídrico e como

desvantagens argumenta que nem sempre os limites municipais e estaduais respeitam os divisores da bacia.

Ross e Prette (1998) afirmam que a bacia hidrográfica, como unidade natural, tem como elemento integrador os canais fluviais ou de drenagem natural, cujo referencial é a água. Contudo, mesmo sendo um sistema natural complexo, não pode ser considerada um sistema ambiental único, pois deve-se ter em consideração as questões socioeconômicas regionais que, na maioria dos casos, não respeitam os limites dos divisores de água.

Trazendo à tona a discussão sobre o gerenciamento apropriado, Barbosa *et al.* (1997) afirmam que as bacias devem ser consideradas como sistemas multiníveis que incluam água, solo e componentes sócio-políticos internos e externos, onde tal unidade de análise se constitui como a sobreposição de sistemas naturais e sociais. O sistema natural estaria definido nas bases aquáticas e terrestres (fauna, flora, recursos aquáticos e minerais), o sistema social determinando como essas bases serão utilizadas enquanto as políticas governamentais - como extensão da organização social e institucional - influem nos padrões locais de utilização dos recursos naturais.

No que tange às políticas governamentais, a Constituição Federal de 1988 afirma, em seu inciso XIX do artigo 21, que compete à União “instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso” (BRASIL, 1988). Desta forma, importante passo foi dado com a regulamentação deste artigo pela lei nº. 9.433, de 8 de janeiro de 1997, com a Política Nacional de Recursos Hídricos. Nela, foi criada o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, tendo por princípios gerais a gestão dos recursos hídricos por bacia hidrográfica; a observância aos usos múltiplos; o reconhecimento da água como valor econômico; a gestão descentralizada e participativa; e o reconhecimento da água como bem finito e vulnerável.

Segundo os termos do artigo 30, VIII da Constituição Federal, compete ao município “*promover, no que couber, adequado ordenamento territorial, mediante planejamento e controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano*”, seguido pelo artigo 182 e 183, regulados, posteriormente, pelo *Estatuto da Cidade* - Lei 10.257/01 (BRASIL, 2001).

Portanto, tendo como unidade de análise de paisagem a Bacia Hidrográfica (e assim, de planejamento e gerenciamento ambientais), buscaram-se métodos para a representação de seus compartimentos paisagísticos, bem como da Fragilidade Ambiental, resultado da inter-relação entre seus componentes. Para isto, a Cartografia de Síntese foi adotada como referencial teórico de análise e representação, como será analisado no próximo capítulo..

## **CAPÍTULO 2**

### **INTEGRAÇÃO DE DADOS CARTOGRÁFICOS AMBIENTAIS**

*A natureza reservou para si tanta liberdade que não a podemos nunca penetrar completamente com o nosso saber e a nossa ciência. Goethe*

Spörl (2001) afirma que por meio do mapeamento das fragilidades ambientais é possível identificar e analisar os ambientes em função de seus diferentes níveis de fragilidade, mapeando seus graus, e permitindo ações tecnicamente mais adequadas a essas condições.

O mapeamento temático urbano-ambiental, pautado na Cartografia de Síntese, é, portanto, utilizado como ferramental de integração. As diversas cartas sobrepostas por meio de procedimentos lógicos e computacionais auxiliam na tomada de decisão dos gestores.

A partir da Teoria Geral dos Sistemas e, conseqüentemente, do Geossistema, surgiram para a Geografia Física diversas propostas de modelos conceituais, morfológicos e de classificação dos sistemas, sendo a maioria deles compostos de propostas de cartografia, e esta, de síntese.

Como Martinelli e Pedrotti (2001) afirmam, o Geossistema constitui um constructo teórico visto como unidade dimensional ideal que abarca a integridade da realidade concreta, um espaço que hoje se confunde com o meio técnico-científico-informacional.

Os autores ainda afirmam que no contexto da cartografia ambiental, a cartografia das unidades de paisagem se concebem como uma cartografia de síntese, dotadas de morfologia, funcionamento e comportamento, que leva em conta a articulação dos diferentes níveis de análise em conformidade com as ordens de grandeza em que os fenômenos se manifestam, bem como as combinações e contradições que acontecem entre conjuntos espaciais de conteúdos distintos, definidos pelos fenômenos sob apreciação, num mesmo nível têmporo-espacial (LACOSTE, 1988).



Desta forma, como ressalta Martinelli (2005), no mapeamento de síntese os elementos não estão mais em simples superposição ou em justaposição, mas fundidos em tipos – as unidades taxonômicas. Constituem-se, assim, conjuntos espaciais que são agrupamentos de lugares caracterizados por integração de atributos ou variáveis, constituindo-se sistemas lógicos.

Esta confusão entre mapeamento de síntese e a simples superposição ou justaposição de análises se dá principalmente pelo emprego dos Sistemas de Informações Geográficas de maneira mais ampla, sem embasamento teórico-metodológico, e que, conforme Martinelli (2005) resulta em mapas muito confusos onde se acumula uma multidão de hachuras, cores e símbolos, até mesmo índices alfanuméricos, negando a própria ideia de síntese.

Dentro deste contexto, pelo menos dois paradigmas se apresentam para operacionalização computacional: o da álgebra booleana e a lógica *fuzzy*.

Na álgebra booleana, a combinação de mapas temáticos, representando as variáveis - físicas, ambientais, sociais ou quaisquer outras – é obtida com o uso de operadores condicionais. Cada tema é representado em um *layer* (plano de informação), combinados segundo uma sequência lógica para dar suporte a uma hipótese ou proposição definida.

Para Meirelles (1997), as fronteiras rígidas do modelo booleano não permitem que os erros ou ambiguidades sejam medidos, o que impede considerar o grau de imprecisão existente nos dados utilizados. A questão que se coloca na continuidade de estudos inseridos neste paradigma refere-se à natureza dos fenômenos e as características a serem cartografadas, já que os limites das classes temáticas serão estáticos ou rígidos, próprios da álgebra booleana.

Apresenta-se, assim, o paradigma *fuzzy*, um modelo empírico de relacionamento, onde as variáveis são estimadas por critérios estatísticos baseados em conhecimento dos especialistas e comparadas entre si. Assim, com a introdução de um modelo ajustado a se trabalhar com conceitos inexatos, as classes terão melhor representatividade, já que este é mais bem adaptado às transições gradativas entre as ocorrências espaciais do mundo real, por meio de superfícies de decisões numéricas.

Sendo assim, a partir das diversas metodologias que visam o entendimento da paisagem, e sua expressão cartográfica, sejam modelos booleanos ou *fuzzy*, faz-se necessária, para fins de aplicação e discussão teórica-metodológica, a adoção de um paradigma de mapeamento. Neste trabalho será adotada a Fragilidade Ambiental, trazendo o embasamento teórico necessário e a aplicação metodológica, com a definição das variáveis a serem utilizadas, inserida nos conceitos de Paisagem apresentados no capítulo 4.

## **2.1 Fragilidade Ambiental e Ecodinâmica**

Bertrand (1972) propõe uma metodologia baseada na Teoria Geral dos Sistemas, a qual, por meio da modelagem e da quantificação dos elementos da paisagem, procura entender de forma integrada as variáveis antes somente descritas ou analisadas qualitativamente, sugerindo, assim, métodos e teorias para o estudo quantitativo.

Entretanto, como salienta Spörl (2001), este equilíbrio é frequentemente abalado pelas intervenções antrópicas nos componentes ambientais, desencadeando desequilíbrios temporários ou até permanentes.

Sotchava (1977) e Tricart (1977), por sua vez, discutem conceitualmente tal proposta, sendo a contribuição destes autores de grande valia para o desenvolvimento desta metodologia ao sugerir a inserção de novas variáveis e também da forma de comunicação destes estudos, na linguagem da Geografia: a Cartografia Temática.

O mapa síntese, produto cartográfico da metodologia de Bertrand (1972), Sothava (1977) e Tricart (1977), apresenta a compartimentação da paisagem natural segundo suas características físico-bióticas, a partir de Unidades Ecodinâmicas, caracterizadas por uma série de atributos que alimentam o banco de dados.

Com base nesse conceito e visando aplicações ao Planejamento Ambiental, Ross (1990; 1994) acrescenta novos critérios estabelecendo a Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais, com a elaboração da Carta de Vulnerabilidade

Potencial, que relaciona os fatores naturais do território e a Carta de Vulnerabilidade Emergente, que relaciona os resultados da Carta de Vulnerabilidade Potencial com as intervenções antrópicas.

Thomaz (2000) esclarece que as propostas de Tricart (1977) e Ross (1990; 1994) se encontram integradas, pois a segunda é um aprofundamento da anterior, com ambas propondo uma taxonomia (classificação) dos ambientes fundada no grau de estabilidade/instabilidade da morfodinâmica atual.

Para a integração destes dados e geração dos produtos cartográficos, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são de fundamental importância, uma vez que, como define Burrough (1986), são poderosos conjuntos de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, processar e representar dados espaciais do mundo real.

Fischer e Nijakamp (1993) salientam ainda que os Sistemas de Informações Geográficas são essenciais em estudos que contemplam padrões e fluxos espaciais, nos quais as diferenças espaciais em diversas dimensões podem ser mostradas por representações estatísticas e estas representadas cartograficamente.

Sendo assim, a geração da Carta de Vulnerabilidade Potencial e a Carta de Vulnerabilidade Emergente não só tem importância para o poder público local, mas também é relevante como estudo em sua abrangência regional no contexto territorial das Bacias Hidrográficas.

Tricart (1977) afirma em seu capítulo sobre Classificação Ecodinâmica dos Meios Ambientes que “a ótica dinâmica impõe-se em matéria de organização do espaço”.

A partir desta e de todo embasamento teórico aqui apresentado, fica claro que a proposta Ecodinâmica é bastante apropriada para estudos que tenham por premissa a intervenção e o entendimento da organização do espaço, permitindo, conforme Tricart (1977) determinar como uma ação se insere na dinâmica natural, para corrigir certos aspectos desfavoráveis e para facilitar a exploração dos recursos ecológicos que o meio oferece.

A fim de definir o que se entende por Ecodinâmica, o autor de tal metodologia assim afirma que

o conceito de Unidades Ecodinâmicas é integrado no conceito de ecossistema. Baseia-se no instrumento lógico de sistemas, e enfoca as relações mútuas entre os diversos componentes da dinâmica e fluxos de energia e matéria no meio ambiente. Portanto, é completamente distinto do ponto de vista estático do inventário. [...] Esse tipo de avaliação exige bom conhecimento do funcionamento do sistema, ou seja, dos fluxos de energia/matéria que o caracterizam. Um inventário não pode fornecê-los, exatamente como um único censo de população não permite definir a dinâmica dessa população.

A Ecodinâmica, como verificado, vai muito além dos inventários e levantamentos de campo, cujo resultados são mapas que nada transformam a realidade, mas somente ilustram uma situação estática.

A proposta, embasada na Teoria Geral dos Sistemas (considerada por Tricart o melhor instrumento lógico que se dispõe para estudar os problemas do meio ambiente), procura não somente ser uma orientação teórica, mas apresentar uma orientação metodológica, baseada nos graus de estabilidade-instabilidade morfodinâmicas, afirmando o autor que diminuir a instabilidade morfodinâmica é um dos objetivos da administração e ordenamento do meio ambiente.

Portanto, a análise morfodinâmica das unidades de paisagem, atrelada aos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977), é realizada com a definição dos meios morfodinâmicos, classificados a partir de processos de pedogênese ou morfogênese.

Como salientam Crepani *et al.* (2000), quando existe o predomínio da pedogênese, prevalecem os processos formadores de solos; já, ocorrendo a morfogênese, os processos erosivos, modificadores das formas de relevo, são ativos.

A definição das unidades morfodinâmicas, estas, essencialmente sistêmicas, tem a base teórico-metodológica sustentada em diversas áreas do conhecimento.

A Geomorfologia possui influência determinante nos processos ecodinâmicos, sendo as informações de amplitude de relevo, a declividade e o grau de dissecação da unidade de paisagem, utilizadas para a determinação das unidades morfodinâmicas, como definem Crepani *et al.* (2000).

A quantificação empírica da energia potencial disponível para o escoamento superficial (*runoff*), responsável pelo transporte de materiais que esculpem as formas de relevo, é possível integrando essas informações (CREPANI *et al.*, 2000)

A Pedologia, como Ross (1994) destaca, utiliza as características de textura, estrutura, plasticidade, grau de coesão das partículas/espessura dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Crepani *et al.* (2000) ressaltam a importância da variável solo, já que estes são indicadores básicos da posição ocupada pela unidade dentro da escala gradativa da Ecodinâmica. Tais autores ainda afirmam

que a maturidade dos solos, produto direto do balanço morfogênese/pedogênese, indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênese gerando solos maduros, lixiviados e bem desenvolvidos.

A Fitogeografia tem sua importância relacionada à caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural, já que os processos morfogenéticos se relacionam com as coberturas vegetais de densidade (cobertura do terreno) mais baixa, enquanto os processos pedogenéticos ocorrem em situações onde a cobertura vegetal mais densa permite o desenvolvimento e maturação do solo (CREPANI *et al.*, 2000).

Ross (1994) afirma que, a partir de resultados obtidos em campo, em situações controladas ou com a utilização de sensores remotos, é possível a hierarquização de graus de proteção aos solos pela cobertura vegetal. Trabalhos como os de Stein *et al.* (1987) e outros são bases para a definição dos valores de proteção para cada tipo de vegetação.

A Climatologia associa às unidades de paisagem natural a quantificação empírica do grau de risco a que esta se submete. Como Crepani *et al.* (2000) definem, situações de intensidade pluviométrica elevada, isto é, com alta pluviosidade anual e curta duração do período chuvoso, promovem melhores condições para o desenvolvimento dos processos morfogenéticos, enquanto situações com baixa pluviosidade anual, distribuída em um maior período de tempo, levam a estados de menor risco para a integridade da unidade de paisagem.

A fim de integrar tais ramos de conhecimento e a gama de informações, classificando os meios morfodinâmicos, Tricart (1977) classifica-os em três tipos: os meios estáveis, os intergrades e os fortemente instáveis.

Os meios estáveis são aqueles que estão em *equilíbrio* ou *estabilidade morfogenética*. Isto significa que o sistema não está estagnado, mas possui uma lenta evolução, constante no tempo e com os fatores em harmonia. Desta forma, os processos pedogenéticos são favorecidos, em detrimento dos processos morfogenéticos.

Em meios morfodinâmicos estáveis, as manifestações catastróficas não estão presentes. São condições para sua existência: cobertura vegetal fechada, dissecação de relevo moderada e ausência de atividade vulcânica. Apesar de descritivamente isto parecer uma condição até certo ponto comum, por se tratar de um sistema, as relações estabelecidas entre os componentes são complexas.

Para Ross (1994), as Unidades Ecodinâmicas Estáveis são aquelas que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana. Desta forma, encontram-se em estado natural, como um bosque de vegetação natural.

Estas Unidades estão relacionadas às áreas nas quais o equilíbrio dinâmico natural foi preservado das atividades humanas, atuando a morfodinâmica em estado natural, predominando os processos de intemperismo físico-químico sob vegetação densa, sendo que o impacto das chuvas é atenuado pela cobertura vegetal.

Os meios intergrades são aqueles em transição, assegurando, como cita Tricart (1977), a passagem gradual entre os meios estáveis e os meios instáveis, ou seja, com balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas.

Já os meios fortemente instáveis são aqueles em que a morfogênese é o elemento predominante da dinâmica natural e fator determinante do sistema natural (TRICART, 1977).

As Unidades Ecodinâmicas Instáveis, para Ross (1994), são “aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente os ambientes naturais através dos desmatamentos e práticas de atividades econômicas diversas”. Ou seja, as atividades humanas desestabilizaram o equilíbrio dinâmico, onde as condições naturais de cobertura vegetal foram substituídas por pastagens, plantações etc.

A retirada da vegetação possibilitou, ainda, a atuação dos agentes climáticos, principalmente as chuvas, diretamente sobre os solos, gerando processos erosivos e perda de qualidade das águas de superfície em função da carga de sedimentos acumulados (SPÖRL, 2001).

De forma sucinta, Ross (1990) também sistematiza a análise morfodinâmica de Tricart, baseando-se: i) no estudo do sistema morfogenético (função das condições climáticas); ii) no estudo dos processos atuais, caracterizando os tipos, a densidade e a distribuição; iii) nas influências antrópicas e nos graus de degradação decorrentes; e iv) nos graus de estabilidade morfodinâmica, derivados da análise integrada dos sistemas morfogenéticos, dos processos atuais e da degradação antrópica. O Quadro 1 busca a síntese dos fatores que favorecem cada um destes quadros.

**Quadro 1 - Características das Unidades Ecodinâmicas**

<b>Unidades Ecodinâmicas Estáveis</b>	<b>Unidades Ecodinâmicas Instáveis</b>
Cobertura vegetal densa, capaz de pôr freio eficaz ao desencadeamento dos processos mecânicos da morfogênese.	Condições bioclimáticas agressivas, com ocorrência de variações fortes e irregulares de chuvas, ventos, geleiras.
Dissecação moderada do relevo, sem incisão violenta dos cursos d'água, sem solapamentos vigorosos dos rios, e vertentes de lenta evolução.	Relevo com vigorosa dissecação, apresentando declives fortes e extensos.
Ausência de manifestações vulcânicas e abalos sísmicos que possam desencadear paroxismos morfodinâmicos de aspectos mais ou menos catastróficos.	Presença de solos rasos ou constituídos por partículas com baixo grau de coesão.
	Inexistência de cobertura vegetal florestal densa.
	Planícies e fundos de vales sujeitos a inundações.
	Geodinâmica interna intensa (sísmicos e vulcanismo).

Fonte: Ross (1990)  
Elaboração do autor

A proposta de Tricart tem como produto cartográfico síntese a *Carta Ecodinâmica* que está pautada na simiologia francesa de cartas geomorfológicas, cujos documentos são de grande complexidade em função da elevada densidade de informações que os tornam de difícil leitura. Desta forma, buscando a utilização mais ampla nos processos de Planejamento Ambiental, permitindo não só a discussão teórica dos conceitos, mas também a metodológica e a cartográfica, Ross (1990;

1994) insere novos critérios para a definição das Unidades Ecodinâmicas Estáveis e Instáveis, que serão discutidos no próximo tópico.

### **2.1.1 Unidades de Instabilidade Emergente e Potencial**

Ross (1990; 1994) ao inserir novos critérios para a definição das Unidades Ecodinâmicas, propõe a modificação do nome de tais unidades. Assim, as Unidades Ecodinâmicas Instáveis passam a ser chamadas de Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente, classificando-as em diversos graus, desde Instabilidade Muito Fraca a Muito forte.

Já as Unidades Ecodinâmicas Estáveis têm seu conceito modificado para Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial, uma vez que o dinamismo do sistema e, principalmente, a ação humana atuam de forma incisiva nesta estabilidade. Elas também são classificadas em diversos graus, de Instabilidade Potencial Muito Fraca a Muito Forte.

Para a definição destas Unidades de Paisagem, gerando as Cartas de Fragilidade Potencial (Unidades de Instabilidade Potencial) e de Fragilidade Emergente (Unidades de Instabilidade Emergente), chamada também de Carta de Fragilidade Ambiental, são necessárias algumas etapas e produtos intermediários apresentados a seguir.

A metodologia de Ross (1994) define que em escalas de maior detalhe, como 1:25.000, 1:10.000, 1:5.000 e 1:2.000, como a em que esta pesquisa se insere, as informações geomorfológicas necessárias devem ser obtidas a partir das Classes de Declividade, sendo tais intervalos baseados em consagrados estudos de Capacidade de Uso e Aptidão Agrícola, que indicam o vigor dos processos erosivos, dos riscos de escorregamentos e deslizamentos e inundações.

Tais classes originalmente são "< 3%", "3 a 6%", "6 a 12%", "12 a 20%", "20 a 30%", "30 a 50%" e "> 50%", sendo ordenadas hierarquicamente para a Metodologia Ecodinâmica conforme a Tabela 1.



**Tabela 1 - Categorias Hierárquicas de Classes de Declividade.**

Classe de fragilidade	Intervalo de declividade	Índice de fragilidade
Muito Fraca	até 6%	1
Fraca	de 6 a 12%	2
Média	de 12 a 20%	3
Forte	de 20 a 30%	4
Muito Forte	acima de 30%	5

Fonte: Ross (1994)  
Organização do autor

Para a variável solos, Ross (1994) baseia-se em estudos como de Bertoni e Lombardi Neto (1990), em sua experiência em expedições de campo, sua participação no Projeto RadamBrasil e como pesquisador/professor da FFLCH-USP, definindo, assim, as classes de fragilidade ou de erodibilidade dos solos, considerando o escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais (Tabela 2):

**Tabela 2 - Classes de fragilidade de solo.**

Fragilidade	Tipos de solos	Índice de fragilidade
Muito Baixa	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho Amarelo Textura Argilosa	1
Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa	2
Média	Latossolo Vermelho Amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-amarelo textura média/argilosa	3
Forte	Podzólico Vermelho-amarelo textura média/arenosa, Cambissolos	4
Muito Forte	Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas	5

Fonte: Ross (1994)  
Organização do autor

Já no tocante à proteção dos solos pela cobertura vegetal, a primeira fase necessária é a construção da Carta de Uso da Terra e da Cobertura Vegetal, distinguindo diversos temas, como matas naturais, culturas de ciclo curto e ciclo longo, padrões de impermeabilização, pastos naturais, pastos cultivados, entre outros.

As áreas recobertas por mata oferecem proteção muito alta ao impacto das chuvas, enquanto as áreas recobertas por Reflorestamento conferem um grau pouco menor (grau alto) de proteção aos solos.

Estes dois tipos de cobertura vegetal protegem os solos da ação erosiva das chuvas, mantendo-os em situação estável. Sendo assim, estas áreas são classificadas como de Fragilidade Potencial, ou seja, apresentam potenciais à ocorrência de processos morfodinâmicos agressivos, já que sempre existe a possibilidade das intervenções humanas.

As áreas destinadas às pastagens oferecem proteção média aos solos e às culturas de ciclo curto, cana-de-açúcar e café, proteção baixa aos solos. Desta forma, as áreas com estes tipos de uso são classificadas como de Fragilidade Emergente, ou seja, estas características de uso da terra geram situações de desestabilização alterando o equilíbrio dinâmico (SPÖRL, 2001).

A partir de diversos trabalhos, Ross (1994) propõe a classificação apresentada a seguir para os Graus de Proteção, segundo os tipos de Cobertura Vegetal (Tabela 3).

**Tabela 3 - Graus de Proteção a partir do tipo de cobertura vegetal.**

<b>Graus de proteção</b>	<b>Tipos de cobertura vegetal</b>	<b>Índice de fragilidade</b>
Muito Alta	Florestas, matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade.	1
Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagens cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivos de ciclo longo como o cacau.	2
Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível, terraceamento com café, laranja com forrageiras entre as ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas.	3
Baixa	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja), com solo exposto entre ruas, culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/terraceamento.	4
Muito Baixa a nula	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto por caminhos, estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas.	5

Fonte: Ross (1994)  
Organização do autor

Considerando a importância do clima na proposição das Unidades, Ross em um trabalho não publicado e citado por Spörl (2001), mas utilizado em Cereda Junior (2006), define os Níveis Hierárquicos dos Comportamentos Pluviométricos (Tabela 4).

**Tabela 4 - Níveis Hierárquicos dos comportamentos pluviométricos.**

<b>Níveis hierárquicos</b>	<b>Características pluviométricas</b>	<b>Índice de fragilidade</b>
Muito Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 1000 mm/ano.	1
Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano.	2
Média	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março.	3
Forte	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas.	4
Muito Forte	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900mm/ano (semi-árido).	5

Fonte: Spörl (2001)  
Organização do autor

Tendo tais temas básicos criados, parte-se para os procedimentos operacionais, gerando o produto cartográfico síntese.

Segundo a metodologia de Ross (1994), o produto síntese-diagnóstico apresenta as Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial, classificadas em fraca, média, forte e muito forte, quando a interferência antrópica é restrita e prevalece a cobertura vegetal florestal.

As *manchas* de Instabilidade Emergente também são classificadas em fraca, média, forte e muito forte, quando as atividades antrópicas alteram o ambiente natural com qualquer uma dessas práticas: agrícola, pecuária, industrial, urbana e viária.

Tal proposição é acompanhada de uma alternativa metodológica mais adequada à utilização nos Sistemas de Informações Geográficas, a partir da associação de dígitos arábicos, representando cada número um determinado peso.

O trabalho original de Ross (1994) não contemplou a variável pluviosidade, propondo, assim, o primeiro dígito referente às classes de declividade, o segundo associado aos solos, e o terceiro relativo ao uso da terra/cobertura vegetal.

Spörl (2001), a partir de seus estudos, além de propor a introdução dos níveis hierárquicos pluviométricos, modifica os procedimentos técnico-operacionais para a

geração da Carta de Fragilidade Ambiental, sendo esta a correlação das variáveis classes de declividade, solos, tipo de cobertura vegetal e pluviosidade.

Desta forma, o primeiro dígito da correlação entre as variáveis é a declividade, que sempre define o grau de fragilidade para a área.

A variável cobertura vegetal identifica, por seus coeficientes, as áreas onde o equilíbrio dinâmico foi rompido, provocando situações de riscos, e as áreas nas quais a estabilidade permanece inalterada, classificando tais áreas como de Instabilidade Potencial ou de Instabilidade Emergente, apontando os níveis crescentes de instabilidade.

As demais variáveis definem uma hierarquização por meio de seus índices de fragilidade. Pode-se dizer que quanto maior a associação numérica (declividade/ solos/ vegetação/ pluviosidade) maior o grau de fragilidade potencial na relação relevo-solo face aos processos erosivos, de um lado, e a perda de qualidade das águas de superfície, de outro (SPÖRL, 2001).

São geradas, assim, as Cartas de Fragilidade Potencial (por meio da combinação das características da declividade, solos e pluviometria) e de Fragilidade Emergente (Ambiental) que combinaram o resultado cartográfico anterior com os graus proteção aos solos, a partir da cobertura vegetal e uso da terra.

Entretanto, Morato *et al.* (2003) propõem uma nova organização e regras para integração destes dados, a partir de uma tabela bidimensional, ou de dupla entrada. Nesta tabela, as linhas são atribuídas às classes de solo e as colunas, às classes de declividade. Cada célula da tabela é então preenchida com a classe resultante da combinação das classes de solo e de declividade, gerando a Carta de Fragilidade Potencial.

Para a Carta de Fragilidade Ambiental é, então, gerada uma nova tabela bidimensional, sendo as combinações realizadas a partir das Cartas de Fragilidade Potencial e dos Graus Proteção aos Solos pela cobertura vegetal e uso da terra. Cabe salientar que a proposta técnico-operacional de Morato *et al.* (2003) não inclui a variável pluviometria.

Cereda Junior (2006) apresentou tais cartas síntese para o objeto de estudo da presente tese, nas quais demonstra que para parte da Bacia do Ribeirão do

Monjolinho (São Carlos – SP), ao se comparar a Carta de Fragilidade Ambiental, gerada pelas duas técnicas booleanas (Tabela de Dupla Entrada e Associação de Dígitos Arábicos), têm-se, na primeira, 66%, aproximadamente, na classe denominada Fragilidade Muito Forte e 1,5%, aproximadamente, na mesma classe, no segundo caso.

Analisando os resultados do mapeamento de síntese, embasado na ecodinâmica, o autor afirma que o tratamento dos dados pode mascarar as reais características ambientais da área, como a grande ênfase nas operacionalizações propostas por Ross (1990 e 1994) e demonstradas na área de estudo da variável declividade. Contudo, não se pode afirmar que em toda e qualquer situação a maior declividade determina por si só maior fragilidade, assim como o inverso, pois diversas variáveis atuam e interagem de forma integrada.

Neste momento, o gestor poderia optar por outra linha teórico-metodológica, que apresente somente um resultado e não crie dúvidas sobre qual carta utilizar como subsídio ao, por exemplo, zoneamento urbano-ambiental.

Entende-se que, embora com o mesmo embasamento teórico, bem como com os mesmos princípios metodológicos, uma operacionalização diferente pode levar a resultados distintos. É necessário, assim, o entendimento da integração dos dados, bem como a proposição de modelos baseados em experiência, como os presentes no paradigma *fuzzy*, possibilitando a intervenção e tomada de decisão.

## **2.2 Os Sistemas de Informações Geográficas**

Na Geografia, as discussões teórico-filosóficas sempre foram de fundamental importância para a constituição de seu corpo como ciência, assim como a capacidade de seus cientistas de analisar o espaço de maneira abrangente, e até a década de 1950, descritiva.

Nesta mesma época, começa a se difundir e se desenvolver uma nova escola na ciência geográfica, a chamada Geografia Quantitativa. A Escola Quantitativa surge como um braço da chamada Geografia Pragmática, que busca atualizar,

tornar contemporâneas as metodologias utilizadas, buscando, para isto, novas técnicas e uma nova linguagem.

Sendo assim, a finalidade explícita era criar uma tecnologia geográfica, uma geografia aplicada, pois seus idealizadores diziam que a Geografia como ciência era saudosista, fazendo grandes retrospectivas, mas não fazendo um planejamento à frente do seu tempo.

A metodologia utilizada pela chamada Nova Geografia deu importância a um maior rigor no enunciado e na verificação de hipóteses e também na formulação das explicações para os fenômenos geográficos. Como salienta Christofolletti (1982):

no discurso explicativo há preferência pelas normas relacionadas com o procedimento dedutivo-nomológico. E, por essa razão, considerando-se certas hipóteses e determinadas condições, o resultado do trabalho geográfico deve ser capaz de prever o estado futuro dos sistemas de organização espacial e contribuir de modo efetivo para alcançar o estado mais condizente e apto para as necessidades humanas.

Neste contexto (acentuado nos anos 1970 e início dos anos 1980 pelas grandes transformações no pensamento da sociedade, agora com maiores preocupações pela conservação e preservação dos recursos naturais e o seu papel no meio em que vive), os projetos de planejamento começam a ter como premissa básica a questão ambiental.

Tais projetos buscam estudos ambientais regionais integrados, com a necessidade de sistemas computacionais para atender a demanda pela integração de diversas variáveis num mesmo estudo.

Hendrix *et al.* (1988) ressalta que o uso dos sistemas computacionais capazes de governar bancos de dados georreferenciados passa a ser imprescindível para o planejamento. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) vêm se desenvolvendo cada vez mais, permitindo a formulação de diagnósticos, prognósticos, avaliação de opções de ações e manejos ambientais, reduzindo, substancialmente, o tempo e o custo de elaboração de um plano que envolve mapeamentos, conforme pode ser verificado no Quadro 2.

**Quadro 2 - Procedimentos em planejamento ambiental com SIGs**

<b>Procedimentos em planejamentos</b>	<b>Exemplos de funções atribuídas ao SIG</b>
<i>Avaliar os elementos que compõem o meio</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• apresentar dados temáticos de forma espacial</li> <li>• representar e gerar classificações de florestas</li> <li>• expressar, espacialmente, processos físicos, biológicos e populacionais</li> <li>• definir estabilidade de encostas</li> </ul>
<i>Analisar fatos dentro de uma abrangência temporal</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• representar a história da dinâmica do uso da terra</li> <li>• avaliar a dinâmica histórica regional</li> <li>• avaliar causas e conseqüências históricas de desmatamentos</li> <li>• representar a evolução ou expansão agrícola</li> <li>• Mapear as perdas territoriais de tipos de produção</li> <li>• Mapear vocações territoriais e impactos ambientais temporais</li> </ul>
<i>Relacionar os fatos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• cruzar informações poli-temáticas, com produção de mapas-síntese</li> <li>• avaliar a dinâmica do uso da terra em relação a declividade e altitude</li> <li>• interpretar áreas de plantio em relação ao clima, solo e declividade</li> </ul>
<i>Elaborar prognósticos</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• determinar possíveis causas de impacto e prever futuras conseqüências ambientais</li> <li>• medir e inferir sobre a qualidade dos recursos naturais</li> <li>• definir cenários futuros</li> </ul>
<i>Definir zonas ou territórios</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zonear territórios de acordo com regras pré-estabelecidas</li> <li>• identificar áreas de proteção, de refúgios ou habitat exclusivos</li> <li>• definir-se áreas de visão aprazível para lazer</li> <li>• planejar rotas ou percursos adequados dentro de uma região</li> <li>• selecionar áreas de pastagem</li> </ul>
<i>Elaborar alternativas de ação</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• apresentar alternativas mitigadoras ou de resolução de conflitos</li> <li>• elaborar planos de reflorestamento</li> <li>• obter alternativas para manejo de recursos, como o manejo de vegetação considerando-se atributos estruturais das florestas relacionados a outros mapas</li> <li>• monitorar o ambiente, como controle do fogo ou propagação de desertificação</li> </ul>

Fonte: Santos *et al.* (1997)

O Sistema de Informações Geográficas é uma tecnologia baseada em hardware e software, utilizada para descrição e análise do espaço geográfico, consistindo na aquisição, armazenamento, estruturação, manipulação, análise e exibição gráfica de dados, integrando, portanto, operações de banco de dados, análise estatística e mapeamento digital espacialmente referenciado (coordenadas geográficas).

Souza (1994) define genericamente os Sistemas de Informações Geográficas como “uma tecnologia computacional graficamente orientada, integrando sistemas substanciais”, com utilização em diversas áreas do conhecimento, como agricultura, botânica, ecologia, engenharia, matemática, geografia e geologia, bastando, para isto, como salienta Martins (1994), ter interesse por entes de expressão espacial, sua localização, ou distribuição espacial de seus atributos.

Por sua vez, Alves (1990) define os Sistemas de Informações Geográficas como

sistemas destinados ao tratamento de dados referenciados espacialmente. Estes sistemas manipulam dados de diversas fontes como mapas, imagens de satélites, cadastros e outras, permitindo recuperar informações e efetuar os mais diversos tipos de análise sobre os dados.

Os SIGs são, talvez, os mais importantes instrumentos entre as diversas tecnologias de Geoprocessamento, sendo inclusive muitas vezes confundidos com estas (MORATO *et al.*, 2003). Câmara e Davis (2001) conceituam o Geoprocessamento como a “disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica”.

Como salientam Medeiros e Câmara (2001), o principal desafio é capturar, no Sistema de Informações Geográficas, com o menor grau de reducionismo possível, a natureza dos padrões e processos do espaço.

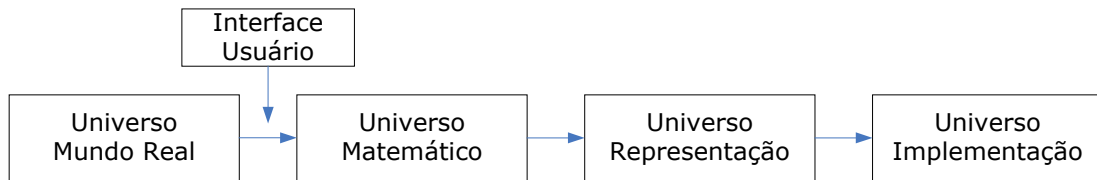
Estes mesmos autores afirmam que, por tal dificuldade de transposição, grande parte das aplicações em Geoprocessamento representa o espaço somente como um inventário, delimitando uma área de estudo e apresentando-a, sem o entendimento global.

Pautado na visão sistêmica, o Sistema de Informações Geográficas podem superar tal modelo inventarial, por meio de métodos baseados na definição de áreas homogêneas, como Medeiros e Câmara (2001) dissertam sobre a visão de Hartstorne, propositor do conceito de área-unidade (*unit-area*) como

uma partição ideal do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, apresentando características individuais próprias. Estas áreas-unidades seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço e a partir da sua decomposição, o pesquisador relacionaria, para cada uma das partições, as correspondentes características físico-bióticas que a individualizaria em relação às demais componentes do espaço.

Para possibilitar o entendimento e transposição do universo real para o universo computacional, Gomes e Velho (1995) propõem o *paradigma dos quatro universos*, que é assim definido, conforme Figura 1:





**Figura 1 - Paradigma dos Quatro Universos**  
**Fonte: Gomes e Velho (1995)**

A partir das definições de Gomes e Velho (1995) e de Câmara e Monteiro (2001), o Universo do Mundo Real inclui as entidades da realidade a serem modeladas no sistema (solo, clima, vegetação, lotes etc); já o Universo Matemático (ou Conceitual) inclui as definições matemáticas formais das entidades a serem representadas, com classes formais de dados geográficos (dados contínuos e objetos individualizáveis) e especialização destas nos tipos de dados geográficos utilizados comumente (dados temáticos e cadastrais, modelos numéricos de terreno, dados de Sensoriamento Remoto).

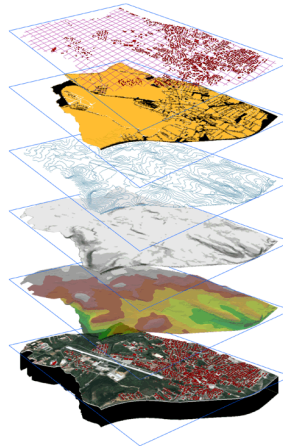
No Universo de Representação, as diversas entidades formais são mapeadas para representações geométricas e alfanuméricas no computador, que podem variar conforme a escala e a projeção cartográfica escolhida e a época de aquisição do dado, distinguindo-se, aqui, as representações matricial e vetorial, que serão explanadas posteriormente.

Por fim, o Universo de Implementação é onde as estruturas de dados e algoritmos são escolhidos, acontecendo, neste nível, a codificação em linguagem de computador.

No âmbito do planejamento, e mais especificamente o ambiental, os SIGs se destacam pela capacidade de apresentar os dados em diferentes níveis de detalhe, holisticamente ou um resultado analítico, com a utilização de diversos dados ambientais, que são processados entre as etapas de diagnóstico e seleção de opções, ou seja, aquelas que utilizam métodos que envolvem análise espacial, sistemas de listagens, matrizes e modelos. (SANTOS *et al.*, 1997).

Para desenvolver análises, os dados (ou modelo de informação) devem ser organizados em níveis (ou *layers*) de apresentação e de maneira que não necessariamente se passe de um nível a outro numa sequência obrigatória, possibilitando a obtenção de uma infinidade de combinações de dados e

comparações entre diferentes ações (SANTOS *et al.*, 1997), conforme representação na Figura 2.



**Figura 2 - Representação da Realidade em Layers.**  
**Fonte: Centro de Cartografia da Universidade Técnica de Lisboa**

Algumas metodologias e conceitos se utilizam do Modelo de Elevação Digital do Terreno (DEM) para a representação e cálculos matemáticos necessários. Tal Modelo é definido por Burrough (1986) como uma representação digital da variação contínua do relevo no espaço.

Entretanto, deve-se salientar a diferenciação que alguns autores empregam entre o termo Modelo Digital do Terreno e DEM, sendo o MDT uma parte de tal, já que o DEM inclui em seus componentes não só o atributo altitude, mas outras feições tais como as produzidas pelo homem (casas, prédios etc.) ou não (vegetação, árvores etc.).

Assim, pode-se dizer que um Modelo Digital do Terreno nada mais é que uma representação matemática da realidade geográfica, onde se tem como conhecido um conjunto finito de pontos de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , a partir das quais se interpolam todas as informações relativas à superfície das quais tais pontos fazem parte.

O Modelo Digital do Terreno faz parte de uma problemática maior, que é a busca de modelos matemáticos ou computacionais para representar a realidade da superfície terrestre, tendo como resultado prático, segundo Burrough (1986), o armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos, as análises de corte aterra para projeto de estradas e barragens, a elaboração de mapas de

declividade e exposição para apoio à análise de geomorfologia e erodibilidade, a análise de variáveis geofísicas e geoquímicas e a apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Assim, pode-se afirmar que o MDT é o método que melhor satisfaz as necessidades à visualização de determinada área, permitindo diversas opções como: salientar o relevo, selecionar áreas com determinada cota, observar a imagem a três dimensões, criar perfis etc.

Também há a necessidade de se diferenciar uma representação vetorial de uma representação matricial (ou *raster*). Segundo Câmara (1994), a representação vetorial é a mais conveniente quando se necessita armazenar coordenadas com precisão, definidas por coordenadas cartesianas  $x$  e  $y$ . A representação matricial, por sua vez, consiste numa malha que define uma relação regular, mas arbitrária, entre polígonos para preservar os dados geográficos, sendo neste caso o mundo real simbolizado por uma matriz de células endereçadas pelas intersecções de linhas e colunas, associadas a um valor referente ao seu atributo.

Morato *et al.* (2003) afirmam que a aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas são de fundamental importância para o desenvolvimento de estudos de fragilidade ambiental, uma vez que é realizada a análise de grande quantidade de dados, com relações complexas entre eles. Concluem, assim, em seu trabalho, que as ferramentas de geoprocessamento se mostraram eficientes em tais tipos de estudo. Entretanto, a orientação de Zuquete *et al.* (1997) é extremamente válida e muitas vezes esquecida pelos utilizadores de geotecnologia, que os Sistemas de Informações Geográficas possuem limitações e é preciso reconhecê-las para evitar futuros erros.

## 2.3 Paradigmas de Mapeamento

Para a classificação e geração em Sistemas de Informações Geográficas das Unidades propostas por Ross (1990; 1994), contribuição à proposta de Tricart (1977), o princípio metodológico adotado na grande maioria dos trabalhos advém de Hartshorne (“Os Princípios e a Natureza da Geografia”) e seu conceito de unicidade.

A representação computacional correspondente aos conceitos de unidade de área hartshorniana é o polígono, delimitador das unidades ecodinâmicas, gerados a partir na Álgebra Booleana. Esta é utilizada em análises espaciais qualitativas, gerando mapas temáticos a partir de regras que especificam o conjunto de condições a serem satisfeitas aplicadas em outros mapas temáticos básicos.

A utilização do Modelo Booleano para a geração das classes ecodinâmicas, como as pautadas na metodologia proposta por Tricart (1977) e modificadas posteriormente por Ross (1990; 1994), é apresentada como solução na maioria dos trabalhos publicados, alguns com grande fundamentação teórica para tal, outros somente pela facilidade na utilização destes.

A implementação computacional do Modelo Booleano está inserida no conceito de unidade-área (*unit-area*) de Hartshorne, sendo esta a decomposição do espaço geográfico em unidades de paisagem com características próprias e individuais, classificadas a partir de critérios definidos pelo pesquisador, em função do objeto de estudo, escala e atributos físicos e bióticos. Tal abordagem é chamada de Geografia Idiográfica.

O entendimento das relações entre estas unidades leva ao zoneamento e à definição de unidades do espaço pelos pesquisadores e gestores, a partir da recuperação dos dados e sobreposição deles, tendo uma regra para tal. Em termos práticos, e sem a utilização da computação, equivaleria à sobreposição de mapas base sobre uma mesa de luz, gerando um novo mapa síntese a partir da regra de cruzamento escolhida pelo pesquisador ou metodologia adotada.

Moreira (2001) define o Modelo Booleano como a combinação lógica de conjuntos de mapas binários por meio de operadores condicionais, sendo cada mapa representado por um *layer* (plano de informação), combinados segundo uma sequência lógica para dar suporte a uma hipótese ou proposição definida. Diferentes

operações são testadas, para determinar se as evidências satisfazem ou não às regras definidas pela hipótese ou teoria, como a Ecodinâmica.

Cereda Junior e Röhm (2005a) afirmam que o entendimento das relações entre estas unidades-área leva ao zoneamento e à definição de unidades do espaço pelos pesquisadores e gestores, a partir da recuperação dos dados e sobreposição deles, havendo uma regra para tal.

A expressão computacional da abordagem Hartshorniana em um Sistema de Informações Geográficas, se dá por procedimentos típicos, entre eles, análises do tipo “SE...ENTÃO”, para produzir um mapa de interseções dos diversos conjuntos de interesse, a partir de dados cartográficos básicos para a geração da Carta de Fragilidade Ambiental. Estas interseções delimitam as unidades-área, nesta tese, Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente e Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial.

Segundo Câmara e Monteiro (2001) as operações booleanas são utilizadas em análise espacial qualitativa e quantitativa, sendo o seu grande apelo a simplicidade e fácil aplicação, com a combinação lógica de mapas em um Sistema de Informações Geográficas, diretamente análoga ao método tradicional de sobreposição.

Entretanto, Bonham-Carter (1994) salienta que na prática pode não ser apropriado atribuir igual importância para cada um dos critérios combinados, dado que as evidências precisam ser pesadas dependendo da sua relativa importância.

Burrough e McDonnell (1998) afirmam, ainda, que na natureza os fenômenos não são representados por limites estáticos ou rígidos, como os gerados por operações Booleanas, onde, segundo Burrough (1986)

os limites desenhados em mapas temáticos (como solo, vegetação, ou geologia) raramente são precisos e desenhá-los como linhas finas muitas vezes não representa adequadamente seu caráter. Assim, talvez não devêssemos nos preocupar tanto com localizações exatas e representações gráficas elegantes. Se for possível aceitar que limites precisos entre padrões de vegetação e solo raramente ocorrem, os erros topológicos associados como superposição e interseção de mapas poderiam ser eliminados

Para a Geografia Quantitativa, modelos e teorias que enfatizam fenômenos mensuráveis e estudos das distribuições espaciais (eventos, amostras e áreas) são construídos para o entendimento dos sistemas geográficos, e como Chorley e Hagget (1975) afirmam, devem ser verificados e validados com dados de campo a partir de técnicas estatísticas.

Neste sentido, Câmara e Monteiro (2001) afirmam que a expressão computacional da Geografia Quantitativa se concretiza na Inteligência Artificial, em áreas como redes neurais, autômatos celulares e lógica *fuzzy*, e esta, por exemplo, com análises multicritério.

Uma dos métodos que pode ser utilizado para estudos de zoneamento ambiental da paisagem é a lógica *fuzzy*. Zadeh (1965) introduziu os conjuntos *fuzzy* para lidar com conceitos inexatos, a partir da constatação de que a qualidade da informação fornecida por modelos matemáticos tradicionais diminui ao ocorrer o aumento da complexidade no sistema.

A lógica *fuzzy* tem por objetivo superar o modelo binário booleano (0 ou 1, risco ou não risco), trazendo ao modelo computacional a complexidade das decisões humanas, uma vez que estas são tomadas a partir de uma série de fatores e influências, não somente situações extremas. Também permite que os modelos computacionais possam se aproximar da linguagem humana, seja baseada em variáveis do senso comum ou aquelas fundamentadas em teorias, permitindo que, para variáveis geográficas, os modelos espaciais considerem todas as nuances do ambiente, sem ignorar transições e/ou particularidades. (OPENSHAW e OPENSHAW, 1997)

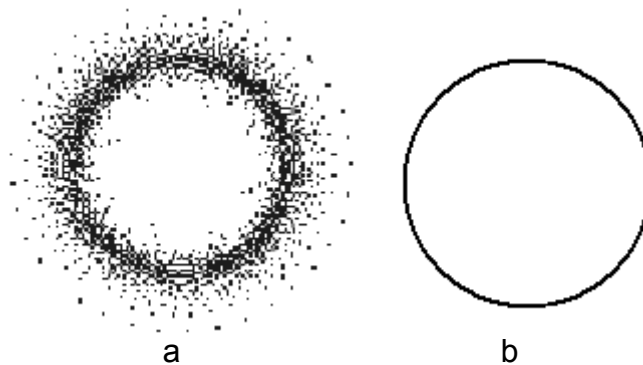
Ferreira *et al.* (2004) definem os conjuntos (ou classes) *fuzzy* como representações sem fronteiras (transições) abruptas, isto é, a transição entre a pertença (pertinência) e a não pertença (não pertinência) de uma localização num conjunto é gradual. Um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma possibilidade que varia entre 0.0 e 1.0 (ou 0 e 255), indicando um incremento contínuo da não pertença até à pertença completa.

Complementarmente, Moreira (2001) define tais conjuntos como uma forma de caracterização de classes temáticas, que por várias razões não têm ou não podem definir limites rígidos (contatos) entre si. Assim como no Modelo Booleano, o

Modelo *fuzzy* possui operadores para a síntese da informação geográfica. Caso a abordagem fosse booleana, seria feita a utilização de operadores lógicos como OR (união) e AND (interseção).

No Modelo *fuzzy*, ela pode ocorrer pela combinação segundo análises multicritérios, definidas a partir de uma sequência lógica realizada pelos operadores *fuzzy*, que podem ser mínimo, máximo, média, ponderado e gama.

A partir de estudos comparando os Modelos Booleanos e *fuzzy*, Burrough e Mcdonnell (1998) consideram que o primeiro está muito mais sujeito à propagação de erros, sendo que o segundo tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiaries entre as classes, conforme a representação da Figura 3.



**Figura 3 - Diagrama de Venn**  
 (Representando as fronteiras de um conjunto *fuzzy* (a) e Booleano (b))  
 Fonte: Burrough e McDonnell (1998)

Para fins de criação das classes das Cartas de Fragilidade Ambiental, ao se entender a complexidade teórica de tal proposta, fica claro que esta se insere no chamado Espaço Teorético da Geografia Quantitativa, que veio se contrapor às teorias da Geografia Idiográfica. Tais Unidades de análise (Unidades Ecodinâmicas) a serem definidas para a geração das Cartas de Fragilidade Ambiental estão inseridas na definição de Burrough e Mcdonnell (1998), na qual a lógica *fuzzy* é um dos métodos indicados para estudos que apresentam ambiguidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos.

Conforme afirmam Cereda Junior e Röhm (2005a), para a operacionalização de tal metodologia, o Modelo Booleano é, hoje, o mais utilizado, seja pela implementação de tais ferramentas nos softwares, seja pela facilidade de uso e acesso às informações. Entretanto, a utilização de tal Modelo ocasiona a atribuição

dos pesos de cada variável sob a ótica e experiência do pesquisador, tendo por resultado cartográfico regiões delimitadas com limites estáticos ou rígidos.

Em contraponto, na Análise Multicritério com Modelo *fuzzy*, a atribuição de pesos é decorrente de resultados de técnicas de Suporte à Decisão. Desta forma, conforme já exposto anteriormente, as limitações inerentes aos limites rígidos do Modelo Booleano são contornadas, se adaptando às transições gradativas entre as ocorrências representadas nos mapas temáticos (CEREDA JUNIOR e RÖHM, 2005).

O mapa síntese, produto cartográfico da metodologia de Bertrand (1972), Sotchava (1977) e Tricart (1977), chamado por alguns autores de Mapa Morfodinâmico, Mapa Geoambiental ou Mapa de Sistemas de Paisagem – dependendo de sua linha de pesquisa - apresenta a compartimentação da paisagem natural segundo suas características físico-bióticas, caracterizadas por uma série de atributos que alimentam o banco de dados.

Cox (1994) e Fang (1997) afirmam que um benefício significativo dos modelamentos baseados em lógica *fuzzy* é a habilidade de codificação de conhecimentos inexatos, numa forma que se aproxima muito aos processos de decisão. Os sistemas de inferências baseados em lógica *fuzzy* possibilitam, assim, a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo” utilizado na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados.

Burrough (1986) demonstra como as incertezas nos valores dos atributos dos mapas causam erros nos resultados das inferências espaciais efetuadas segundo modelamentos booleanos e *fuzzy*. Os resultados obtidos por esse autor sugere que os métodos booleanos estão muito mais sujeitos à propagação de erros do que os equivalentes *fuzzy*, e que a utilização desta técnica pode reduzir drasticamente a propagação de erros por meio de modelos lógicos, fornecendo informações mais confiáveis.



### 2.3.1 Análise Multicritério

Ao se adotar a Análise Multicritério, observa-se que há duas abordagens quanto à classificação de variáveis para análise ambiental e como integrá-las em um ambiente computacional.

Na primeira abordagem usada para classificação multicritério, as classes temáticas e pesos são definidos com base na experiência de pesquisadores, questionários de avaliação ou entrevistas, formas estas que ainda possuem forte carga de subjetividade. Observa-se que esta opção tem sido a mais adotada em trabalhos que procuram uma alternativa metodológica ao modelo booleano.

A segunda abordagem é baseada na definição de classes temáticas não pautadas somente na experiência ou em dados empíricos, mas com auxílio de operadores matemáticos, que possibilitam que as variáveis por si só se classifiquem em função de suas próprias características e relacionadas à localização geográfica. Alguns autores também pontuam que a definição de pesos dentro das classes podem ter, também, seus valores relativos calculados, como o grau de importância de uma determinada ocorrência, no caso da metodologia ecodinâmica, dos índices de fragilidade.

A utilização da análise multicritério, segundo Eastman (2006) é considerada um avanço significativo em relação ao procedimento convencional de cruzamento de planos de informação para a definição de áreas de interesse, sendo uma das técnicas empregadas para a tomada de decisão e a sua integração com os Sistemas de Informações Geográficas.

Conforme afirma Vilas Boas (2005) as abordagens multicritérios se constituem em formas de modelar os processos de decisão, nos quais entram em jogo: uma decisão a ser tomada; os eventos desconhecidos que podem afetar os resultados; os possíveis cursos de ação e os próprios resultados. Estes modelos refletem, de maneira suficientemente estável, o juízo de valores dos decisores. Seu objetivo, portanto, é ajudar ao gestor analisar os dados que são intensamente complexos no campo ambiental e buscar a melhor estratégia de gestão do meio ambiente.

Autores como De Pablo e Pineda (1985) discutem a análise multicritério afirmando que esta busca uma visão global ou de conjunto, o que evita a análise individualizada de temas ou aspectos físicos e sem suposições a priori sobre as variáveis que desempenharão papel importante na definição das zonas de atuação, detectando-se tendências de variação e grupos de variáveis espacialmente relacionadas.

Tais autores ainda afirmam que a automatização da análise cria a possibilidade de efetuar rapidamente aproximações para a descrição integrada do território e que a análise de diferentes variáveis temáticas se faz de forma integrada, podendo conhecer sua interdependência espacial em relação às unidades territoriais obtidas.

Para a integração dos fatores com base na abordagem multicriterial, vários métodos vêm sendo utilizados, como a Combinação Linear Ponderada (Weighted Linear Combination – WLC) e a Média Ponderada Ordenada (Ordered Weighted Averaging – OWA).

Voogd (1983) define a Combinação Linear Ponderada como sendo o método no qual os fatores são padronizados de acordo com uma escala numérica comum, recebem pesos e são combinados por meio de média ponderada. O resultado é um mapa de prioridades que pode ser compartimentado em classes temáticas *fuzzy* (EASTMAN, 2006).

Este método, conforme salienta Torezan (2005), permite não apenas reter toda a variabilidade dos dados contínuos, mas oferece também a possibilidade dos parâmetros ambientais compensarem-se uns com os outros. Desta forma, um baixo valor de um determinado índice em uma variável para uma área qualquer pode ser compensado por um alto valor para outra variável.

A Média Ponderada Ordenada, segundo Yager (1988), diferencia-se da Combinação Linear Ponderada principalmente pela presença de um segundo grupo de pesos, denominados de pesos de ordenação (EASTMAN, 2006). Os pesos de fatores (Combinação Linear Ponderada), nesse método, são chamados de pesos de compensação (MALCZEWSKI, 1999).

Malczewski (2004) cita que, com o método da Média Ponderada Ordenada, tem-se a flexibilidade de assumir soluções que variam desde totalmente aversas a

risco (operador de intersecção AND – um local deve atender a todos os critérios para ser incluído no conjunto de decisão) a totalmente arriscadas (operador de união OR – um local será incluído no conjunto de decisões se pelo menos um critério for atendido).

O método da Combinação Linear Ponderada é, por sua vez, formalizado por médias e, dessa maneira, suas soluções não serão nem arriscadas e nem aversas a risco, porque sempre estarão no meio dos extremos AND e OR (MALCZEWSKI, 2000).

A utilização de modelos de análise ambiental baseados em análise multicritério permitem menor subjetividade na geração de mapas, uma vez que procura nos modelos matemáticos apoio na escolha de pesos de importância entre as variáveis consideradas. Assim, é encontrada uma menor influência da formação e de modelos pré-concebidos pelo pesquisador ou equipe envolvidos, lembrando, contudo, que tal experiência em hipótese alguma deve ser desconsiderada.

Para a utilização da lógica *fuzzy*, deve-se ter em mente que este é um modelo, e assim sendo, é uma forma de se representar a realidade, tentando-se imitar ou reproduzir as ocorrências do mundo real. Assim, pode-se trabalhar a informação existente, fazer simulações e extrair novas informações que servirão na tomada de decisão. Como modelo de análise, é necessária a escolha de metodologia adequada para cada situação, onde técnicas distintas geram mapas finais distintos.

Neste modelo, chamado de “baseado em conhecimento” (*knowledge-driven*, na tradução literal: orientado pelo conhecimento), às variáveis condicionantes do meio físico são atribuídas valores, onde o valor de  $x$  é associado a um valor  $\mu(x)$ , fornecido por meio da função de pertinência e o par ordenado  $(x, \mu(x))$  é conhecido como conjunto *fuzzy*. A forma da função de pertinência não é necessariamente linear, ela pode assumir qualquer formato analítico ou arbitrário apropriado ao problema modelado.

As funções de pertinência podem também ser expressas como listas ou tabelas de valores. Neste caso, as classes dos mapas podem ser associadas a valores de funções de pertinência *fuzzy* por uma tabela de atributo. O valor medido da variável mapeada pode ser categórico, ordinal ou de intervalo.

Conforme Meirelles (1997) salienta, a ideia da lógica *fuzzy* é a de evitar grandes dicotomias, que podem ocorrer quando a pertinência é expressa apenas como sendo completamente verdadeiro ou totalmente falso.

Como já salientado anteriormente, a metodologia ecodinâmica tem como diretriz principal o enfoque sistêmico, que permite uma concepção globalizante do meio e possibilita expressar a organização funcional do espaço, com o estudo das inter-relações de causa e efeito, condicionadas pelas influências naturais e antrópicas (ALMEIDA, 2000).

Assim, adota-se a análise multicritério e suas duas abordagens quanto à classificação das variáveis integrantes do Mapeamento de Fragilidade Ambiental conforme Ross (1990; 1994), aproximando-se da discussão teórico-metodológica em Cartografia de Síntese: a reintegração de variáveis que se concretizam territorialmente de maneira una e não isolada.

Para isto, podem ser utilizadas funções matemáticas onde as variáveis a serem consideradas no modelo (Categorias Hierárquicas de Classes de Declividade, Classes de Fragilidade de Solo, Graus de Proteção a partir do tipo de cobertura vegetal, Níveis Hierárquicos dos Comportamentos Pluviométricos) são convertidas em imagens padronizadas em escala de fragilidade, variando de 0, mínimo grau de fragilidade, a 1, com grau máximo de fragilidade.

Tal escolha, em detrimento da escala de 0-255 muito utilizada em trabalhos desta natureza, se dá pelo entendimento muito mais claro na etapa da preparação dos dados, bem como na análise das informações criadas. Cabe aqui uma explicação provável de tal escala: os softwares até o início 2000 trabalhavam com imagens 8 bits, ou seja, 256 níveis de cinza. Tal escolha, desta forma, se fundamenta em uma questão muito mais técnica do que metodológica.

Após tais conversões, para geração da Carta Síntese, é utilizada a função contida em Sistemas de Informações Geográficas, chamada de *Multi Criteria Evaluation* (MCE), utilizando o Método da Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination* – WLC).

Também pode ser utilizado o Método da Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Averaging* – OWA), que apresenta como diferencial um segundo grupo de pesos, denominados de pesos de ordenação.

### 2.3.2 Método da Combinação Linear Ponderada (CLP)

Segundo Bilich e Dasilva (2006), a análise multicritério tem por objetivo analisar várias possíveis ações levando em conta vários critérios simultaneamente e, para sua operacionalização nos SIGs, deve-se buscar métodos de análise.

O Método da Combinação Linear Ponderada permite a análise da variabilidade dos dados, atribuindo pesos a cada fator, onde no decorrer da análise os fatores se compensam. Em outras palavras, os fatores são padronizados para uma escala numérica comum, recebem pesos e são combinados por meio de uma média ponderada (VOOGD, 1983). O resultado é um mapa de prioridades que pode ser limitado espacialmente por uma ou mais restrições booleanas (EASTMAN, 2006).

Segundo Valente e Vettorazzi (2005), para a definição de áreas sensíveis, prioritárias ou de risco, o método da Combinação Linear Ponderada vem sendo empregado em diversas aplicações. Na área ambiental existem estudos com o emprego dessa técnica no campo da conservação e preservação florestal, para a conservação de ecossistemas importantes, para mapear áreas de risco de incêndios florestais e ainda trabalhos como a conservação dos recursos hídricos por meio da recuperação e da conservação da cobertura florestal.

Visando a criação da comparação entre as variáveis, bem como o mapa de análise, Périco e Cemin (2006) afirmam ser necessária a construção de uma regra de decisão, sendo que estas incluem procedimentos para normalizar e combinar diferentes critérios de fatores, resultando um índice composto e uma regra que rege a comparação entre alternativas utilizando este índice.

O chamado processo de normalização é, essencialmente, o introduzido pela lógica *fuzzy*, Zadeh (1965), onde um conjunto de valores expressos em uma dada escala é convertido em outro comparável, expresso em uma escala normalizada.

Como já explanado anteriormente, existem várias funções que são utilizadas para a normalização das variáveis, como as de pertinência ao conjunto *fuzzy*, como Sigmoidal, J-Shaped e Linear conforme Zadeh (1965) e Eastman (2006). Também existe a opção onde as variáveis estão em escala nominal, devendo assim ser atribuídos valores arbitrariamente, em uma escala normalizada, de 0-1, como

também apresentado, como Corseuil e Campos (2007) explicam, primeiro deve-se transformar os valores literais em números e padronizá-los (os dados serão postos numa escala) aplicando um comando *fuzzy*.

O controle executado pela lógica *fuzzy* imita um comportamento baseado em regras ao invés de um controle explicitamente restrito a modelos matemáticos como equações diferenciais, desta forma, seu objetivo é gerar uma saída lógica a partir de um conjunto de entradas não precisas, com ruídos ou até mesmo faltantes. No caso de um mapa, a lógica *fuzzy* é fundamental também no aspecto de corrigir as imprecisões e corrigir os dados nas zonas de transição, colocando esses valores mais próximos da realidade (JUNGES, 2006)

Conforme Eastman (2006), para a combinação dos mapas de fatores por meio da Combinação Linear Ponderada é necessário definir previamente os pesos de compensação dos fatores, que expressam sua ordem de importância no processo de decisão.

Saaty (1991) propõe<sup>2</sup> como técnica para esta atribuição de pesos o chamado AHP – Processo Analítico Hierárquico, que a partir de diferentes pesos para cada variável (estas numéricas), expressa a potencialidade a uma determinada variável estudada. Gomes *et al.* (2004) explica que após a divisão do problema em níveis hierárquicos, o AHP permite determinar de forma clara e pela síntese dos valores dos agentes de decisão uma medida global para cada uma das alternativas, priorizando-as ou classificando-as ao finalizar sua aplicação.

De acordo com Cunha *et al.* (2001), o primeiro passo para a aplicação dessa técnica é a elaboração de uma relação de importância relativa entre as evidências, relação esta utilizada como dado de entrada em uma matriz de comparação pareada, onde são calculados os autovalores e autovetores<sup>3</sup> da matriz.

Para a construção das comparações, Saaty (1991), amparado em autores da área responsável pelo entendimento de estímulos e respostas dos seres humanos, observou que apesar das diferenças entre os estímulos apresentarem uma escala geométrica, a percepção do indivíduo é de uma escala linear, onde o chamado limite

---

<sup>2</sup> Saaty propõe em 1980, o ano de 1991 é referenciado pela obra traduzida em português.

<sup>3</sup> Os autovetores são vetores que, sob a ação de um operador linear, resultam num vetor de mesma direção. Estes estão sempre ligados ao operador linear, ou seja, cada operador linear admite um conjunto específico de autovetores. (BOLDRINI, 1986).

psicológico humano julga corretamente, no máximo,  $7 \pm 2$  pontos. Assim, o autor propõe a Escala Fundamental de Saaty, conforme o Quadro 3.

**Quadro 3 – Escala Fundamental de Saaty**

1	igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra
5	importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação à outra
7	importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra. Pode ser demonstrada na prática
9	importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança
2, 4, 6, 8	valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Saaty (1991)

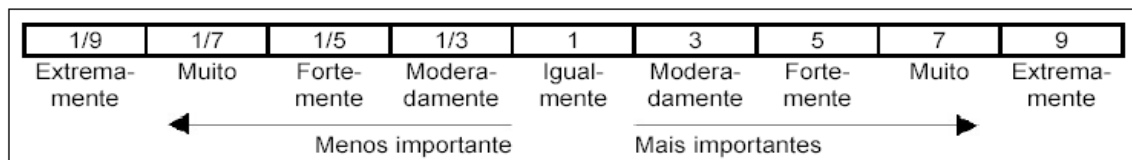
Costa (2003) explica que cada fator é combinado com os demais por meio de uma matriz quadrada  $n \times n$  (exemplo na Tabela 5), onde estão dispostos na mesma ordem ao longo das linhas e das colunas. Deste modo o valor  $A_{ij}$  representa a importância relativa do critério da linha  $i$  face ao critério da coluna  $j$ . Portanto essa matriz é uma matriz recíproca. Assim se é atribuído os pesos por meio de uma avaliação da importância relativa entre os fatores.

**Tabela 5 - Exemplo de Matriz**

	<b>Critério 1</b>	<b>Critério 2</b>	<b>Critério 3</b>	<b>Critério 4</b>	<b>Critério 5</b>	<b>Critério 6</b>
<b>Critério 1</b>	1	1/2	2	2	3	1
<b>Critério 2</b>	2	1	4	4	6	2
<b>Critério 3</b>	1/2	1/4	1	1	2	1/2
<b>Critério 4</b>	1/2	1/4	1	1	2	1/2
<b>Critério 5</b>	1/3	1/6	1/2	1/2	1	1/3
<b>Critério 6</b>	1	1/2	2	2	3	1

Fonte: Costa (2003)

Pode-se utilizar como referência uma escala numérica e classificar partindo do 1 para aqueles dados com igual importância e variando para extremamente menos importante e extremamente mais importante. Após isso, classificam-se os fatores aos pares por essa comparação de importância, com uma escala como a apresentada na Figura 4.



**Figura 4 - Escala de Importância**  
Fonte: Eastman (2006)

Uma das grandes dificuldades encontradas em um processo de decisão que envolve múltiplos critérios é, no entanto, a forma como se deve quantificar a importância relativa de cada um deles, uma vez que os mesmos podem possuir importâncias variáveis para cada decisor (COSTA, 2003).

Corseuil e Campos (2007) definem que se deve atribuir pesos de importância de par em par na forma de matriz aos fatores analisados, comparando assim um fator com outro, dois a dois, e estabelecer a importância de um sobre o outro, usando para isso conhecimento de técnicos especializados, trabalhos realizados sobre o assunto, de modo que o decisor esteja preparado e para que essas comparações sejam as mais corretas possíveis.

Como exemplo, apresenta-se Cereda Junior *et al.* (2010), para estudos sobre o grau de risco a erosão acelerada, no município de Descalvado (SP). Foram levantados os condicionantes dos escorregamentos translacionais, em função de sua importância como fator predisponente para a eclosão do processo: Declividade, Escoamento Superficial, Geologia e Material Inconsolidado.

Os mapas temáticos gerados foram submetidos ao Processo Analítico Hierárquico (AHP), citado anteriormente, no qual são atribuídos pesos aos mapas, que representam os condicionantes do processo, e também às classes dos mapas, constituindo-se numa soma ponderada, para gerar as cartas correspondentes.



Para geração de mapas, utilizando-se do Processo Analítico Hierárquico, os vários condicionantes, representados nas classes temáticas, foram analisados por especialistas quanto à sua importância relativa na deflagração do processo e, segundo essa importância, foram calculados os pesos numéricos de cada um deles no processo sob análise.

Segundo Silva (2005), obtido um valor de Razão de Consistência indicativo de um processo de julgamento adequado, o módulo AHP permite o cálculo do peso que cada informação tem em relação ao aspecto de potencialidade ou restrição analisado.

Saaty (1991) define que valores para a Razão de Consistência menores que 0,1 existe a confirmação que os valores foram gerados aleatoriamente, não havendo necessidade de reorganização da matriz.

A Tabela 6 é a representação da aplicação da matriz de comparação pareada adotada no processo para o caso de Descalvado. Esse procedimento é realizado para a obtenção dos pesos das variáveis de estudo.

Com a comparação pareada concluída, obteve-se Razão de Consistência de valor 0,008 e os pesos resultantes dessa comparação, sendo atribuídos os seguintes valores: 0,169 para a Declividade, 0,046 para o Escoamento Superficial, 0,413 para o Geológico de Superfície e 0,371 para o Material Inconsolidado.

**Tabela 6 - Aplicação de matriz de comparação pareada**

Variável	Importância	Variável
Declividade	Entre "Moderada" e "Essencial" (4)	Escoamento
Geologia	"Moderada" (3)	Declividade
Geologia	Entre "Demonstrada" e "Extrema" (8)	Escoamento
Geologia	"Igual" (1)	Material Inconsolidado
Material Inconsolidado	Entre "Igual" e "Moderada" (2)	Declividade
Material Inconsolidado	Entre "Demonstrada" e "Extrema" (8)	Escoamento

Fonte: Cereda Junior *et al.* 2010

Após essa etapa é necessário atribuir pesos às classes temáticas pertencentes às variáveis que foram anteriormente comparadas, atribuindo ao relacionamento um critério de importância, conforme escala pré-definida. A atribuição destes pesos e os critérios de decisão foram definidos a partir do conhecimento dos pesquisadores, portanto, essa relação depende exclusivamente do conhecimento destes, que indicaram o grau de importância relativo entre os critérios comparados. Qualquer alteração nos pesos requer que o processo da AHP deve ser executado novamente, para que o mapa final seja atualizado a cada nova modificação.

Na presente tese, a metodologia AHP será utilizada como suporte à decisão de atributos ligados à fragilidade do ambiente, proporcionando uma análise da dinâmica dos Geossistemas quando incorpora, junto aos componentes do sistema natural, o fator antrópico.

Segundo Weber e Hasenack (2001), a AHP é apenas uma das possíveis formas de determinar pesos de variáveis para o processo de agregação das mesmas. Uma ponderação não necessita obrigatoriamente de seu uso, pois os pesos podem ser determinados de várias outras formas, inclusive por atribuição direta com base em conhecimento empírico sobre o assunto.

Costa (2003) explana que para o cálculo da matriz de comparação par-a-par ( $A_w$ ), deve-se resolver a equação  $A_w = \lambda_{m\acute{a}x} W$  onde  $W$  é o vetor de pesos pretendidos e  $\lambda_{m\acute{a}x}$  é o maior autovalor da matriz  $A$ . O valor de  $W_i$  é calculado conforme a Equação 1.

**Equação 1 - Cálculo do valor de  $W_i$**

$$W_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{k=1}^n \left[ \left( \prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{1/n} \right]$$

Portanto, somam-se os valores de cada coluna da matriz comparação par-a-par e dividem-se cada elemento da matriz pelo somatório da coluna que a pertence, obtendo como matriz resultante a Matriz de Comparação par-a-par normalizada. O  $W_i$  é obtido dividindo-se a soma dos *scores* normalizados de cada linha da matriz

pelos números de critérios avaliados, o que fornece uma estimativa dos pesos relativos dos critérios que estão sendo comparados. (COSTA, 2003)

A Equação 2 apresenta o cálculo para o valor de  $\lambda_{m\acute{a}x}$ , onde  $w'$  é obtido por  $w' = A \times w$ , sendo  $w$  aquele encontrado anteriormente e  $A$  é a matriz comparação par a par. (EASTMAN *et al.*, 1998)

**Equação 2 - Cálculo para o valor de  $\lambda_{m\acute{a}x}$**

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \left( \frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_3}{w_3} \right)$$

A Razão de Consistência é calculada a partir da Equação 3, onde  $CR$  = Razão de Consistência,  $CI$  = índice de consistência e  $RI$  = índice de aleatoriedade, onde  $n$  é o número de critérios comparados.

**Equação 3 - Cálculo da Razão de Consistência**

$$CR = \frac{CI}{RI} \text{ sendo que } CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

Já o valor de  $RI$  é obtido pelo cálculo dos valores médios de  $CI$  obtido para matrizes recíprocas geradas aleatoriamente, ou seja, é a aplicação da equação abaixo, onde o peso de cada fator é multiplicado pelo seu valor normalizado gerando um *score*, que será usado para obter o mapa final, conforme a Equação 4.

**Equação 4 - Cálculo do *score***

$$S = \sum_i^n w_i x_i$$

Segundo Ramos e Mendes (2001), a mais importante característica do procedimento CLP é de permitir a compensação entre critérios (*trade-off*), o que significa que uma qualidade (*score* a respeito de um critério) muito fraca numa dada

alternativa pode ser compensada por um conjunto de boas qualidades (*scores* mais altos a respeito de outros critérios).

### **2.3.3 Método da Média Ponderada Ordenada (MPO)**

Valente e Vettorazzi (2005) destacam que o método da Média Ponderada Ordenada tem uma diferença significativa em comparação ao método da Combinação Linear Ponderada, pois conta com a presença de um segundo grupo de pesos, denominados de pesos de ordenação. Os pesos de fatores nesse método são chamados de pesos de compensação e se comportam da mesma forma que no método anterior.

Este método, além de utilizar os pesos de critérios utilizados no procedimento CLP, considera a aplicação de um novo conjunto de pesos denominados *order weights*. Estes pesos não estão associados aos critérios, mas sim à ordem que lhes é atribuída depois da aplicação da técnica CLP. Com esta agregação de critérios é possível analisar as diferentes situações de risco que podem envolver um empreendimento (YAGER, 1988).

Malczewski (2004) cita que, com o método da Média Ponderada Ordenada, tem-se a flexibilidade de assumir soluções que variam desde totalmente aversas a risco (operador de intersecção AND – um local deve atender a todos os critérios para ser incluído no conjunto de decisão) a totalmente arriscadas (operador de união OR – um local será incluído no conjunto de decisões se pelo menos um critério for atendido).

Figueiredo *et al.* (2006) afirmam que a Média Ponderada Ordenada oferece o controle sobre o risco e a compensação por meio de um conjunto de pesos ordenados para diferentes posições, ordenadas, de fatores a cada localização. Os pesos modificam primeiro o grau em que os fatores influenciam o processo de agregação e, então governam o nível total de compensação, o que não é possível ser obtido em uma análise com a Combinação Linear Ponderada.

Valente e Vettorazzi (2005) pontuam que na área ambiental esse método vem sendo aplicado em estudos para determinação de áreas adequadas à urbanização,

na identificação de áreas para a implantação de aterros sanitários, para a priorização de áreas a serem restauradas.

Como no método da Combinação Linear Ponderada, devem-se ter os mapas base e padroniza-los por meio de uma função *fuzzy*, onde se efetuam os mesmos procedimentos do método anterior, até o momento do cálculo dos pesos de compensação.

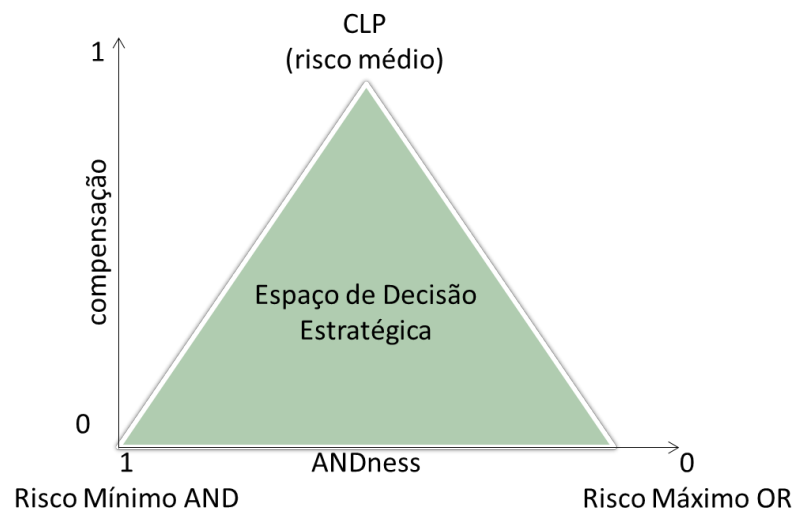
Desta forma, após a aplicação do primeiro conjunto de pesos aos fatores, como na CLP, os pesos resultantes são ordenados do valor mais baixo para o mais elevado, sendo que ao fator com o peso mais baixo (o primeiro da lista ordenada) é aplicado o primeiro *order weight*, ao fator com o segundo valor mais baixo é aplicado o segundo *order weight*, e assim sucessivamente. Em outras palavras, trata-se de pesar os fatores com base na sua ordem, do mínimo para o máximo.

Como explicam Ramos e Mendes (2001), ao variar os *order weights* o procedimento MPO permite implementar uma gama vastíssima (na verdade infinita) de opções de agregação. Isto se operacionaliza, como exemplifica EASTMAN *et al.* (1998) quando em processo de decisão que envolva três fatores, um conjunto de *order weights* [1 0 0] aplicaria todo o peso ao fator com o menor *score*, produzindo assim uma solução adversa ao risco (dita pessimista ou conservadora), equivalente ao operador lógico AND; um conjunto de *order weights* [0 0 1], pelo contrário, aplicaria todo o peso ao fator de mais alto *score*, produzindo assim uma solução de risco máximo (dita otimista), equivalente ao operador lógico OR; um conjunto de *order weights* [0.33 0.33 0.33], por sua vez, aplicaria igual peso a todos os fatores, produzindo assim uma solução de risco neutro (intermédia), equivalente ao operador CLP.

Os autores concluem esta explanação ao afirmar que nos dois primeiros casos apenas os *scores* extremos são considerados (o mínimo no primeiro e o máximo no segundo), o que significa que os fatores não podem ser compensados uns pelos outros (ausência de *trade-off*). Contudo, no terceiro caso, como foi atribuído um conjunto de *order weights* perfeitamente equilibrado, os fatores podem compensar-se mutuamente (*trade-off* total), no sentido em que maus *scores* em alguns fatores podem ser compensados por bons *scores* em outros. Neste caso, é

equivalente do CLP, o que leva a concluir que a CLP é um caso particular do procedimento mais geral MPO.

Os *order weights* não estão obviamente restritos aos três casos apresentados, pois qualquer combinação é possível desde que o seu somatório seja a unidade (EASTMAN *et al*, 1998). O resultado é um espaço de decisão estratégica, aproximadamente triangular, definido por um lado pela atitude de risco (*ANDness*) e, por outro lado, pelo nível de *trade-off* (compensação), que controlam a maneira como os fatores são agregados e o nível de compensação entre eles, conforme pode ser verificado na Figura 5 (MALCZEWSKI, 1999).



**Figura 5 – Pesos de Ordenação no Espaço de Decisão Estratégica. Adaptado de Valente e Vettorazzi (2005)**

A maneira como os fatores serão compensados é que controla o modo de como o operador agrega os fatores, no *continuum* entre os extremos (aversão a risco e risco total). Se a maior parte dos pesos de ordenação for assinalada à esquerda, à direita ou ao centro, isso determinará a posição na dimensão de risco assumido, no processo de tomada de decisão (VALENTE e VETTORAZZI, 2005). O deslocamento relativo dos *order weights* no sentido do mínimo ou do máximo controla o nível de risco (também designado por *ANDness*), onde a homogeneidade de distribuição dos *order weights* pelas posições controla o nível global de *trade-off*. (RAMOS e MENDES, 2001).

Eastman *et al.* (1998) apresenta as equações para o cálculo de *ANDness* e *ORness*, bem como para o *trade-off*, sendo  $n$  o número total de fatores,  $i$  a ordem do fator e  $W$  o peso de ordenação do fator (Equações 5, 6 e 7)

**Equação 5 - Equação para cálculo de *ANDness***

$$ANDness = \frac{1}{n-1} \sum [(n-i)W_i]$$

**Equação 6 - Equação para cálculo de *ORness***

$$ORness = 1 - ANDness$$

**Equação 7 - Equação para cálculo de *trade-off* (compensação)**

$$trade-off = 1 - \sqrt{\frac{n \sum_i (W_i - \frac{1}{n})^2}{n-1}}$$

Determinados esses pesos, devemos calcular também os pesos de compensação e aplicá-los para que se possa corrigir os valores que foram modificados atrapalhando a soma final de modo que se obtenha um mapa padronizado no final com o valor correto na escala planejada (Valente e Vettorazzi, 2005). Esses pesos de ordenação são multiplicados pelos pesos de compensação devidos e depois por cada valor correspondente e depois normalizados. No caso de uma aplicação de Fragilidade Ambiental, por meio de um SIG, será gerado um novo mapa que terá valores de 0 a 1 e variará de Fragilidade Muito Alta até Muito Baixa.

Conforme Eastman *et al.* (1988), a escolha do risco – por exemplo, o mais otimista, o mais pessimista e alguns níveis intermediários entre eles – é aquele que se adequa melhor às expectativas, calculado para o devido risco os pesos de compensação e multiplicado pelos devidos fatores, afim de que se gere um mapa padronizado com os valores normalizados na mesma escala de entrada dos dados iniciais.

Valente e Vettorazzi (2005) afirmam que desse modo além dos pesos de compensação, temos esses pesos de ordenação corrigindo possíveis riscos da tomada de decisão, o que pode mudar o resultado final se comparada com a

Combinação Linear Ponderada; desta forma, a Média Ponderada Ordenada, utilizando todos os fatores com risco médio, comporta-se como a Combinação Linear Ponderada.



## CAPÍTULO 3

### PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

*A natureza nunca nos engana; somos sempre nós que nos enganamos.* Jean Jacques Rousseau

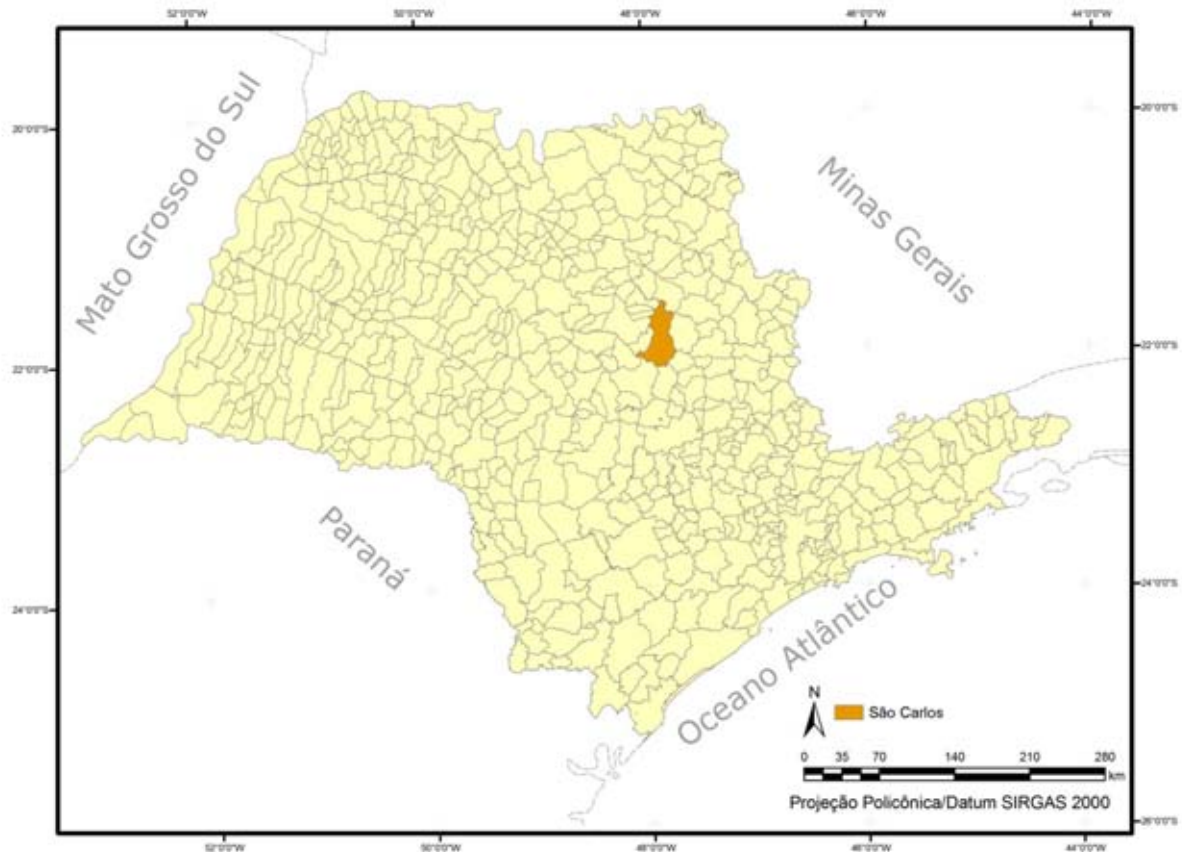
#### 3.1 Objeto de Estudo

Visando a comparação de resultados e crítica não somente das técnicas envolvidas, mas das informações ambientais geradas, o objeto de estudo é parte da Bacia do Ribeirão do Monjolinho, conforme delimitada por Liporaci (2003) e também trabalhado por Cereda Junior (2006), que dá continuidade ao conjunto de análises e críticas às metodologias de ordenamento urbano-ambiental desenvolvidas no âmbito do Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana da UFSCar.

Justifica-se a adoção deste objeto de estudo pela comparabilidade dos dados já obtidos por outros autores, bem como a importância da continuidade de trabalhos na área, provendo ao município onde o programa de pós-graduação se insere subsídios para seu entendimento a partir de óticas diversas, seja no âmbito conceitual e metodológico, bem como operacional, com a disponibilização de dados.

O Município de São Carlos está localizado na região central do Estado de São Paulo, Brasil, a 230 km da capital, conforme o Mapa 1. É circundado pelos municípios de Brotas, Ribeirão Bonito, Ibaté, Santa Lúcia, Itirapina, Luis Antônio, Analândia, Descalvado, Araraquara, Américo Brasiliense e Rincão. A área ocupada pelo município é, de acordo com o IBGE (2010), de 1137 km<sup>2</sup> e a área urbanizada, de aproximadamente 69,7 km<sup>2</sup>.

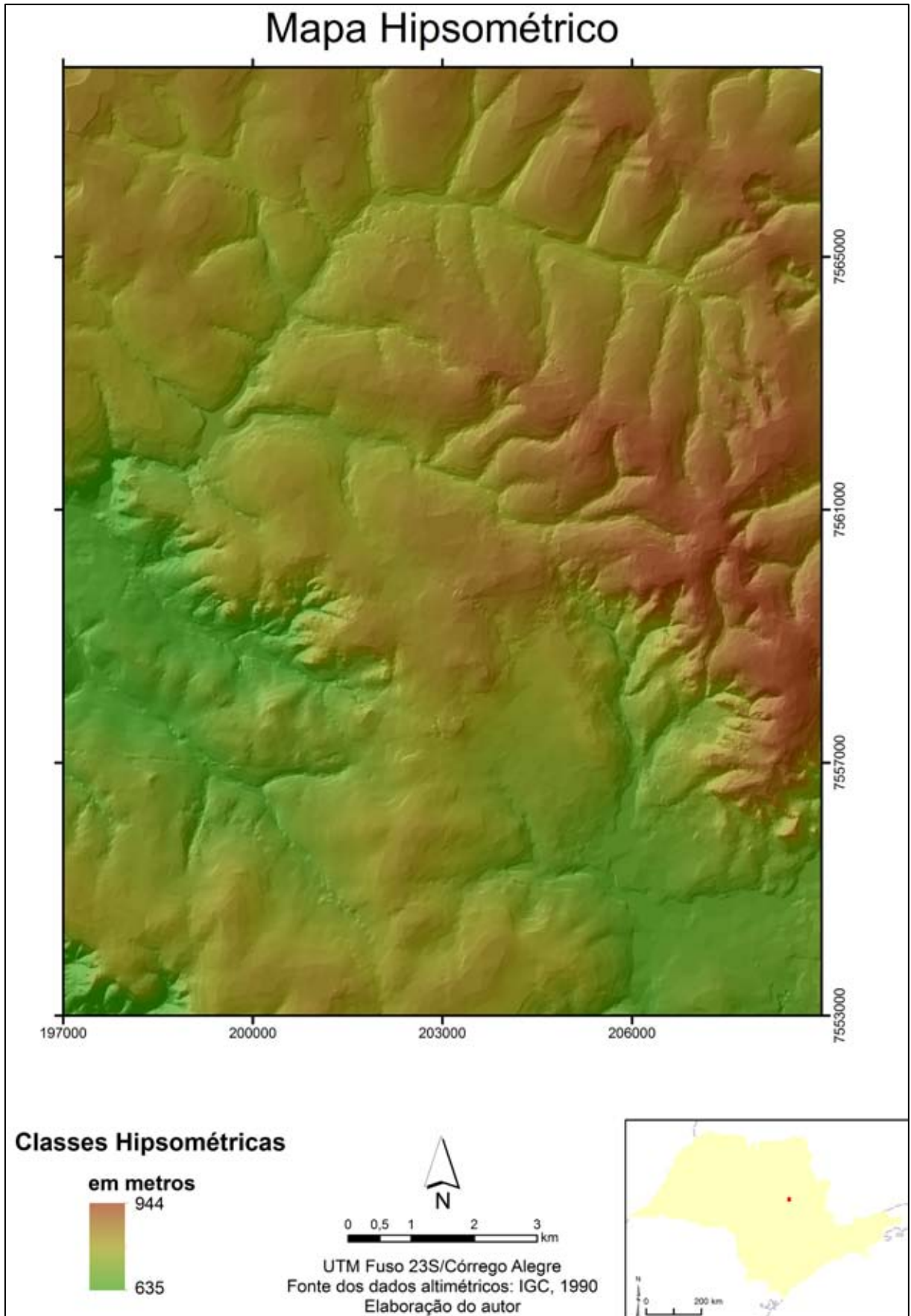
Troppmair (1983) insere São Carlos na sétima região ecológica do Estado de São Paulo, ou seja, no reverso da borda do Planalto Ocidental, acompanhando as cuestas basálticas, com altitudes entre 800-900 metros, inserindo a região de São Carlos na província geomorfológica das cuestas basálticas e de arenito, localizada entre as províncias do Planalto Ocidental e a Depressão Periférica Paulista.



**Mapa 1 - Localização do Município de São Carlos - SP**  
**Fonte: IBGE, 2007, Organizado pelo autor**

Segundo Oliveira (1996), o Córrego do Monjolinho nasce na borda da cuesta localizada no setor sudeste da cidade de São Carlos, em altitude superior a 900 metros, segue inicialmente a norte, percorrendo o reverso da cuesta e posteriormente a oeste e sul e, finalmente, atinge a Cachoeira do Monjolinho, queda d'água de 30 metros localizada no front de cuesta, no setor sudoeste da área de estudo. Assim, o vale do Monjolinho delimita topograficamente uma área onde se localiza a maior parte do núcleo urbano, no reverso da cuesta, sendo que alguns bairros mais recentes romperam estes limites topográficos.

O município possui altitude variável, encontrando seu ponto mais elevado (900 metros) na Vila Nery, no sítio urbano de São Carlos, e o mais baixo, 544 metros, nas imediações da estação Santo Inácio. Para o objeto de estudo, é apresentado o Mapa 2, representando a hipsometria.



**Mapa 2 - Mapa Hipsométrico do Objeto de Estudo**

As formações geológicas do Planalto de São Carlos, segundo Gonçalves (1987), são a Botucatu (Grupo São Bento), contendo a parte abaixo das cuestas; a Serra Geral (Grupo São Bento), na estreita região das cuestas, onde ocorre a quebra do relevo (encostas); e a Formação Itaqueri (Grupo Bauru), no reverso das cuestas, em que se localiza a maior parcela do núcleo urbano.

Gonçalves (1987) ainda classifica os solos da região em dois grandes grupos, o Latossolo Vermelho-Amarelo e Areias Quartzosas Profundas, abaixo das cuestas.

Quando à hidrografia, Oliveira (1996) assim descreve:

São Carlos está localizada sobre o divisor de águas que limita as bacias hidrográficas do Rio Mogi-Guaçu e Tietê, fato associado à sua localização elevada no Estado. Em razão disso, a maioria dos cursos d'água que drenam São Carlos e a totalidade dos que drenam a área urbanizada, têm suas nascentes localizadas no município.

Quanto ao clima, Tolentino (1967) *apud* Gonçalves (1987), classifica o Planalto de São Carlos como transição entre Cwa.i e Aw.i, isto é, clima tropical com verão úmido e inverno seco, clima quente de inverno seco (sistemática de Köpen). O valor médio anual de precipitação é de 1512 mm. e a umidade relativa de 66%. (OLIVEIRA, 1996).

Os ventos predominantes, segundo Oliveira (1996), são de nordeste, seguidos por ventos de sudeste, sendo que a direção dos ventos e a localização das indústrias tem comprometido a qualidade do ar na área urbana de São Carlos.

Já no tocante à vegetação, Gonçalves (1987) descreve como vegetação natural predominante no cerrado, sendo caracterizada por uma formação não-florestal herbáceo-lenhosa, herbáceo-arbustiva, com árvores perenifólias.

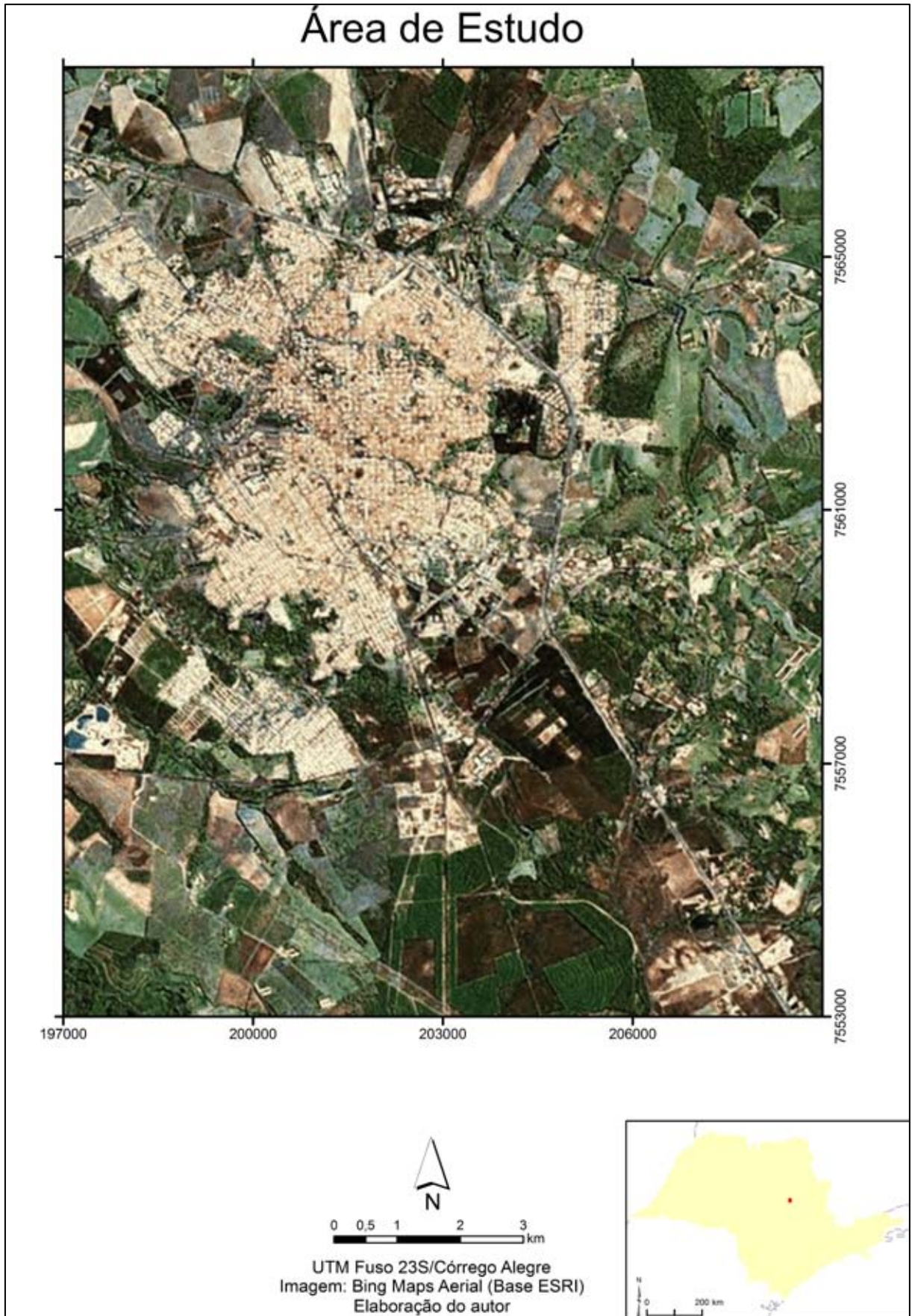
Oliveira (1996) afirma que atualmente as pastagens ocupam a maior parte das terras que circundam o núcleo urbano, exceto no lado oeste (direção de Ibaté), onde é encontrada a cultura de cana-de-açúcar. A leste do perímetro urbano existem áreas de reflorestamento (Pinus).

O autor também afirma que os fragmentos florestais remanescentes podem ser encontrados principalmente nas imediações do bairro Cidade Aracy, onde a textura arenosa do solo compromete o uso agrícola. Outro fragmento florestal de maior valor está localizado ao norte, no interior da Fazenda Canchim (EMBRAPA), sendo a vegetação mais robusta, compondo remanescente de mata.

São Carlos teve um considerável crescimento demográfico nas décadas de 1960 a 1990, com o agravamento dos problemas ambientais (CAVALHEIRO, 1991). A população mais que dobrou neste tempo, já que em 1970 a população total era de 85.425 habitantes e, de acordo com o último censo (IBGE, 2010), a população total é de 221.936 habitantes, dos quais 213.070 no meio urbano e 8.866 no meio rural.

A escala de trabalho adotada foi 1:10.000, pois esta proporciona o entendimento de uma realidade não pontual, ao mesmo tempo que não se perde nos detalhes de escalas maiores.

A área de pesquisa é de 180 km<sup>2</sup>, definida pelas coordenadas planas (UTM/Córrego Alegre) E 197000, N 7553000 e E 209000, N 7568000, UTM Fuso 23, onde se insere a malha urbana e de expansão de São Carlos – SP, em parte da Bacia do Ribeirão do Monjolinho, conforme Liporaci (2003), apresentado no Mapa 2 e Mapa 3. Como já exposto, a escolha da área de estudo se dá por uma questão de comparabilidade de dados, não só do autor (CEREDA JUNIOR, 2006), mas também resultados anteriores, como de Liporaci (2003) e Gonçalves (1987).



**Mapa 3 – Área de Estudo**

### 3.2 O Modelo de Fragilidade Ambiental

Os critérios e seus índices de fragilidade, conforme discutidos no item 2.1.1, são utilizados como referencial metodológico nesta tese, o qual se pode chamar de Modelo de Fragilidade Ambiental. O Modelo que aqui se propõe difere-se sutilmente de Ross (1994), pois se considera o mapeamento de Fragilidade Potencial (o qual não considera o critério Graus de Proteção ao Solo) uma fase intermediária não necessária à aplicação das técnicas multicritério não booleanas. Esta pesquisa entende que em áreas já ocupadas, a explicação de uma suposta Fragilidade Potencial do terreno já foi alterada, até mesmo ao se considerar o critério Declividade e suas modificações antrópicas.

Os materiais a serem utilizados no trabalho, bem como as técnicas para sua produção, são apresentados a seguir. Salienta-se que parte destes dados são de autoria de Cereda Junior (2006), possibilitando a comparação com resultados anteriores.

### 3.3 Softwares e Mapas Base

Para a operacionalização das fases necessárias à criação do modelo de Fragilidade Ambiental e seus produtos cartográficos temáticos, foram utilizados os softwares IDRISI 15 (The Andes Edition) da Clark Labs e o ARCVIEW 9.3, da ESRI, parte integrante da família ArcGIS Desktop.

O software IDRISI 15 foi escolhido por ser, entre os softwares comercial e academicamente disponíveis, o melhor fundamentado cientificamente nas técnicas da presente tese, ou seja, a implementação da teoria em algoritmos computacionais é descrita em publicações oficiais. Em se tratando do método MPO, este ainda não é encontrado nos softwares<sup>4</sup> ou necessita programação adicional, e no IDRISI Eastman (2006) lembra que a introdução é relativamente nova e experimental.

---

<sup>4</sup> até mesmo o método Combinação Linear Ponderada não é incorporado a softwares comerciais de grande utilização, como o ArcView, somente sendo possível a utilização com o uso de extensões de terceiros, ou seja, sujeita a erros sem garantia do funcionamento

Já o ArcView 9.3 foi utilizado nas fases de organização dos dados vetoriais e criação dos mapas temáticos, por permitir maior flexibilidade para o *design* dos mapas temáticos. Segundo ESRI (2010) o ArcView é um Sistema de Informação Geográfica básico para a visualização, gestão, criação e análise de dados geográficos., que permite compreender o contexto geográfico dos dados, identificando relações e padrões de novas maneiras.

Existe uma tendência de usuários dos Sistemas de Informações Geográficas a entender a escolha de um software pelo número de ferramentas e/ou funções de análise presentes nele. Contudo, a principal diferença entre o IDRISI e o ArcView está ligada à forma primária de análise e representação da informação. O ArcView é essencialmente um software para dados vetoriais, enquanto o IDRISI é pensado de maneira matricial (ou *raster*).

Os mapas base, integrantes do modelo de Fragilidade Ambiental serão apresentados quanto à sua fonte, técnica de construção e apresentação final dos resultados nos itens que se seguem.

### 3.3.1 Declividade

O Mapa de Declividades foi elaborado a partir das curvas de nível de cinco em cinco metros, na escala 1:10.000 (isolinhas altimétricas com equidistância de 5 metros), de 8 cartas topográficas<sup>5</sup>, do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) que compõem a área de estudo. Vetorizadas e apresentadas por Cereda Junior (2006), foram exportadas do software SPRING 4.2 para a correção necessária à presente tese.

Para isto, foi utilizado o formato SHP (*shape file*), desenvolvido pela ESRI no início dos anos 90 (ArcView GIS 2.0) é um formato de dados geoespacial vetorial, ou seja, armazena a geometria (pontos, linhas e polígonos), além de armazenar os dados associados a esta, em formato dBase. Diversos arquivos constituem uma representação em *shape file*, como o .shp que armazena a geometria, .dbf os

---

<sup>5</sup> a saber: São Carlos V (SF-23-V-C-IV-3-SO-F), Rio do Monjolinho (SF-23-V-C-IV-3-SE-E), São Carlos I (SF-23-Y-A-I-1-NO-B), São Carlos II (SF-23-Y-A-I-1-NE-A), São Carlos IV (SF-23-Y-A-I-1-NO-D), Fazenda Capão das Antas (SF-23-Y-A-I-1-NE-C), Córrego Santa Maria (SF-23-Y-A-I-1-NO-F), Estação Conde do Pinhal (SF-23-Y-A-I-1-NE-E)



atributos, .shx que funciona como um índice, além de outros não obrigatórios, como o .prj, que informa o sistema de referência e projeção.

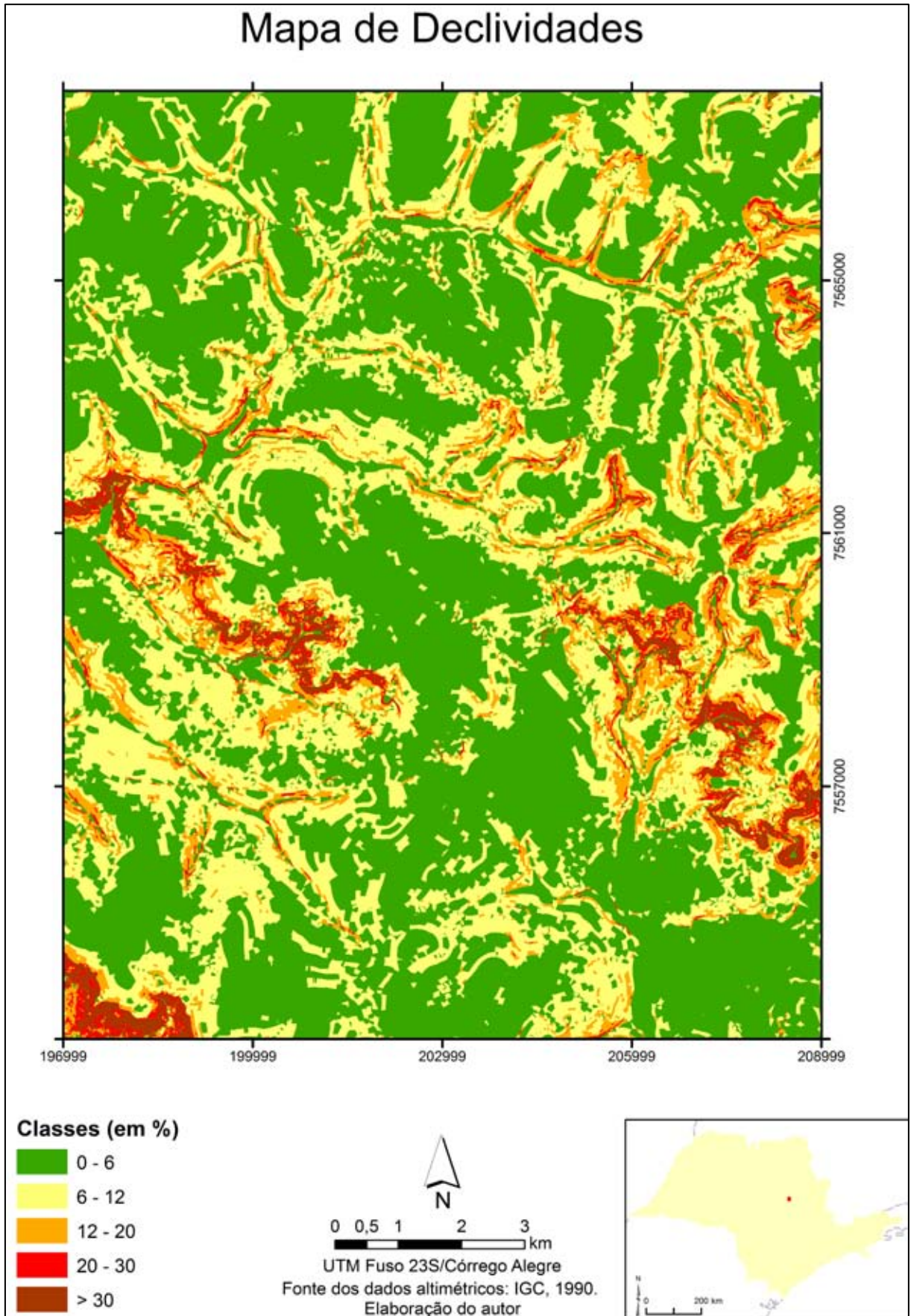
Após a importação do arquivo para o software ArcView 9.3, foi realizado o primeiro procedimento para a geração do mapa de declividade, que consiste em gerar uma grade triangular, com o uso da extensão 3D Analyst. Segundo INPE (2002), esta modelagem permite que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam consideradas durante a geração da grade triangular, possibilitando assim, modelar a superfície do terreno preservando as feições geomórficas da superfície.

Após a criação da grade triangular, é necessária a criação da grade regular, também com o uso da extensão 3D Analyst, permitindo que os cálculos necessários, que seriam matematicamente e/ou computacionalmente limitados se em formato triangular, sejam executados.

A grade regular (ou retangular) é um modelo digital que aproxima superfícies por meio de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados, caso estes tenham sido adquiridos nas mesmas localizações xy que definem a grade desejada. A geração de grade regular ou retangular deve ser efetuada quando os dados amostrados na superfície não são obtidos com espaçamento regular. Assim, a partir das informações contidas nas isolinhas, ou nos pontos amostrados, gera-se uma grade que representa de maneira mais fiel possível a superfície (INPE, 2002).

Cabe salientar que a referência padrão para o tamanho de uma célula (*grid*) de resolução para uma base cartográfica é o padrão de exatidão cartográfica, que se for A indica que o menor elemento possível tem 0,2 mm na escala da fonte. Assim, em um mapa 1:10.000 a resolução a ser designado é de 2 x 2, 1:50.000 é de 10 x 10 e assim proporcionalmente.

Após tais procedimentos, foi elaborado o mapa temático de declividades, a partir das classes definidas por Ross (1994), conforme apresentado no Mapa 4.

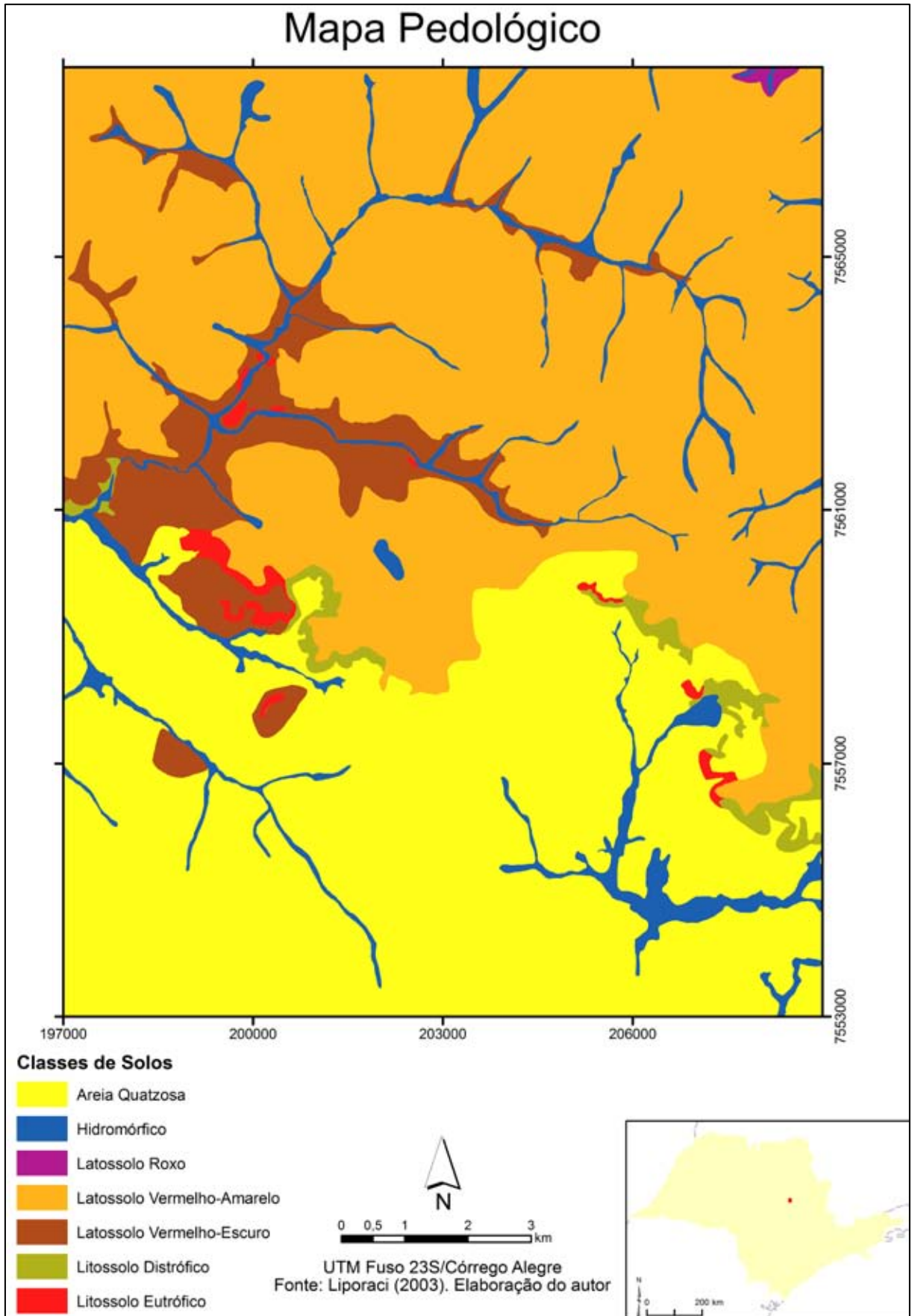


Mapa 4 - Mapa de Declividades

### 3.3.2 Pedologia

O Mapa Pedológico utilizado na presente pesquisa foi elaborado por Liporaci (2003), conforme apresentado por Cereda Junior (2006), elaborado a partir de trabalhos de campo, para checar os contatos litológicos interpretados em fotografias aéreas, para posterior locação e descrição dos perfis de intemperismo, ou os horizontes de solos associados a cada litologia, assim como a sua evolução pedogenética, por meio de uma ficha de campo, a qual continha um resumo de todos os itens que precisavam ser levantados nos pontos visitados, incluindo as características dos perfis de intemperismo, como texturas, estruturas, espessuras e evolução pedogenética.

Assim como os dados de altimetria, foi exportado do software SPRING 4.2 em formato SHP (*shape file*), elaborando-se o mapa temático no ArcView 9.3, tendo como resultado o Mapa 5. Cabe salientar que as classes pedológicas foram mantidas conforme apresentado por Liporaci (2003), já que não houve possibilidade de consulta aos níveis de saturação, por exemplo, para a reclassificação ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).



**Mapa 5 - Mapa Pedológico**

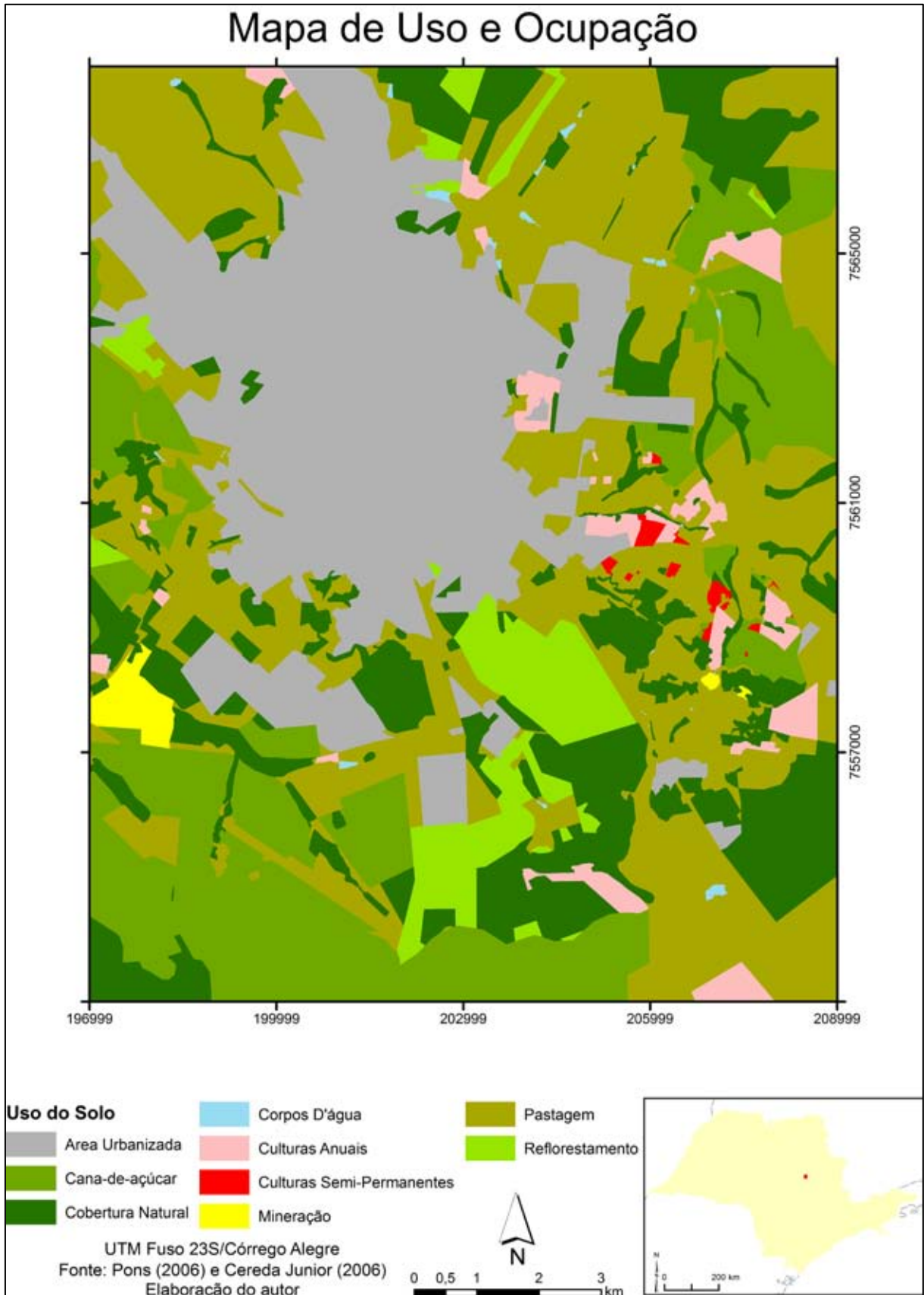
### 3.3.3 Graus de Proteção ao Solo

O Mapa de Graus de Proteção ao Solo, a ser utilizado para o mapeamento da Fragilidade Ambiental tem como origem o mapa de Uso e Ocupação de Pons (2006), refinado e complementado pelo autor, distinguindo diversos temas, como cobertura natural, reflorestamento, culturas semi-permanentes, pastagem, culturas anuais, cana-de-açúcar, área urbanizada/mineração. Para isto, a autora utilizou o produto de Sensoriamento Remoto de uma plataforma de alta resolução, uma imagem Ikonos de junho de 2004, referente à área de estudo de seu trabalho.

Utilizando a técnica de classificação supervisionada, foram definidas oito formas de uso e/ou ocupação na área de estudo, segundo Pons (2006): culturas perenes (plantação de café e citrus); culturas anuais (plantação de milho, soja, horticulturas); cana-de-açúcar; silvicultura ou reflorestamento (plantação de eucalipto e pinus); vegetação nativa (áreas com presença de mata, cerrado ou capoeira); pasto ou área não cultivada (campos de pastagem ou áreas de desmatamento); área residencial ou industrial (áreas urbanas, com construções de loteamentos e indústrias); e área de mineração (com atividades de mineração). Entretanto, a autora descreve não ter conseguido boa classificação com a técnica supervisionada e optou pela delimitação de polígonos de uso e ocupação com interpretação visual, a partir do reconhecimento físico dos objetos.

Com esta delimitação em formato digital, o autor da presente pesquisa complementou as áreas não contempladas na interpretação visual, pois a pesquisa de Pons (2006) delimitou a área urbana e de expansão como objeto de estudo. Tal produto cartográfico foi exportado do software SPRING 4.2 em formato SHP (*shape file*), elaborando-se o mapa temático no ArcView 9.3, tendo como resultado o Mapa 6.

Para fins de atualização, foram realizados trabalhos de campo no ano de 2010, verificando se houveram mudanças significativas nos usos. Mesmo com alterações (não significativas quanto ao Índice de Fragilidade a ser convertido posteriormente, segundo as classes de ROSS, 1994), foi escolhida deste trabalho a utilização do mesmo mapa apresentado por Cereda Junior (2006), para fins de comparabilidade das metodologias.



**Mapa 6 - Mapa de Uso e Ocupação**

### 3.3.4 Comportamento Pluviométrico

O Mapa de Isoietas também partiu de dados gerados por Abimael Cereda Junior para Liporaci (2003), por meio de dados do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e da Fazenda Experimental Canchim, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Os dados não foram atualizados pois além de se manter a compatibilidade com o trabalho que aplicou o Modelo Booleano (Cereda Junior, 2006), algumas destas estações citadas não operam de maneira constante atualmente.

Por este motivo, optou-se por trabalhar com apenas três anos de coletas de dados: 2000, 2001 e 2002, conforme a Tabela 7. Apesar da recomendação de sempre se trabalhar com grandes séries de dados para pluviometria, isto ficou inviabilizado para a área de estudos, visto a escassez até mesmo para uma pequena série. Mesmo assim, considera-se muito mais representativo fazer uma análise temporal pequena de postos localizados dentro da região de estudo a adotar, para uma área de 180 km<sup>2</sup>, um valor médio, como em diversas pesquisas encontradas na revisão.

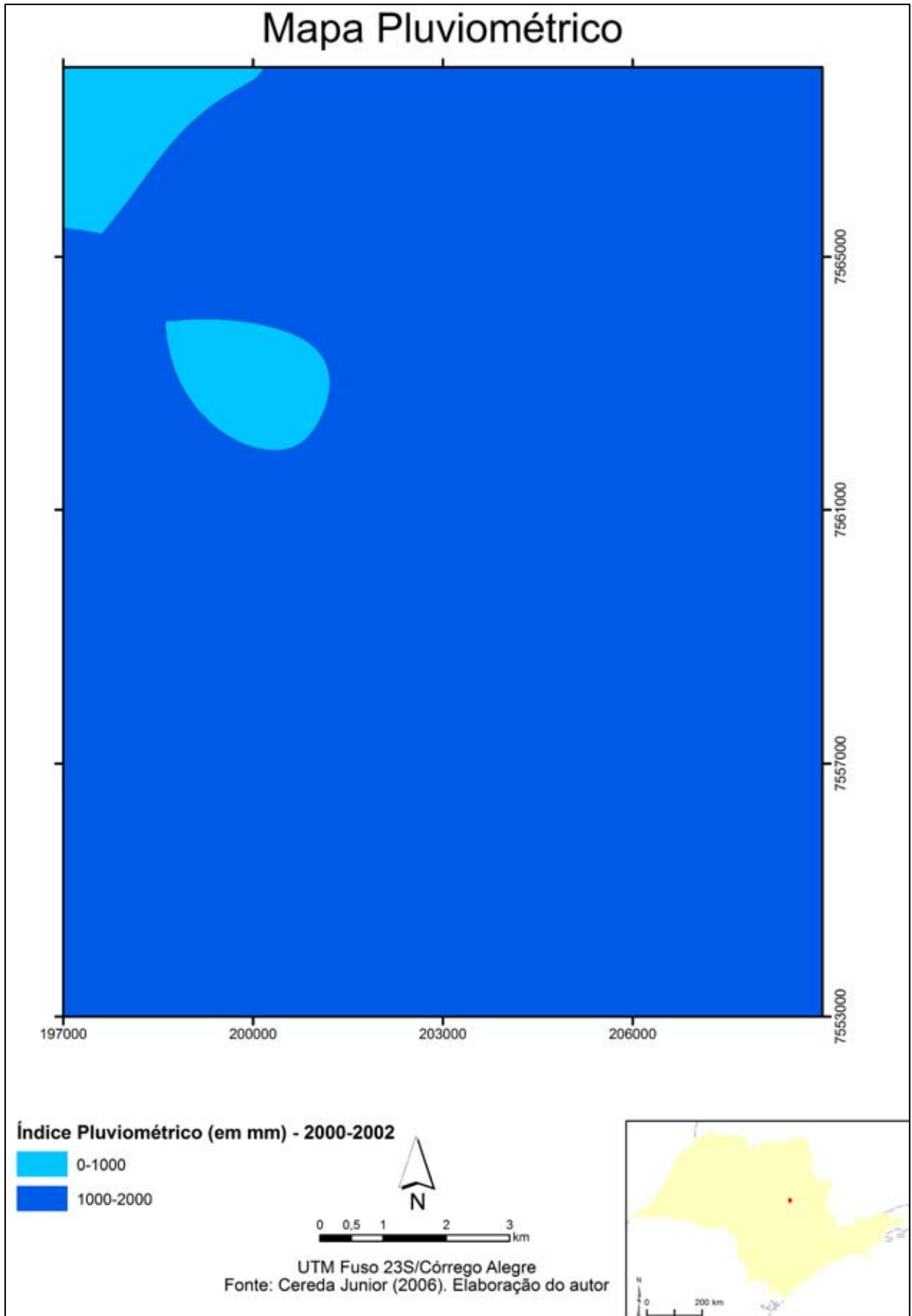
Tabela 7 - Média dos Totais Anuais de Precipitação das Estações Pluviométricas da Área de Estudo (2000-2002)

Estação	TOTAL
Espraiado	1010,25
Novo Horizonte	1081,75
São Carlos III	1018,30
Vila Alpes	1063,50
ETA	933,75
Faz. Sta. Cândida	1577,87
EMBRAPA	1338,67
CRHEA	1982,22
INMET	1473,90

Fontes: SAAE, Faz. Sta. Cândida, EMBRAPA, Posto INMET e CRHEA  
Elaboração do autor

Após o tratamento da informação pluviométrica para a área de estudos, passou-se à interpolação desta, com o objetivo de gerar o mapa de isoietas, com o método interpolação *krigagem*, com resolução de 2 x 2 metros. Feita a interpolação, para conferência e geração do Mapa de Isoietas, passou-se a representação cartográfica propriamente dita destes, elaborando-se o mapa temático no ArcView 9.3, tendo como resultado o Mapa 7.





## CAPÍTULO 4

### PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

*Todo o nosso progresso tecnológico, que tanto se louva, o próprio cerne da nossa civilização, é como um machado na mão de um criminoso. Albert Einstein*

A fim de se fundamentar o trabalho, conforme já exposto, a proposta Ecodinâmica de Tricart (1977), ampliada por Ross (1990 e 1994), amparadas na Teoria Geral dos Sistemas será adotada, uma vez que permite a análise da paisagem pelo seu comportamento dinâmico, de importante contribuição para os estudos ambientais e de ordenamento territorial, conforme discussão teórica.

Ross (1990) define que “o tratamento metodológico em uma pesquisa é subproduto direto da teoria” e que “a metodologia norteia a pesquisa, enquanto a instrumentalização e as técnicas operacionais funcionam como apoio”.

Posto isto, o presente trabalho se apoiará na metodologia de Libault (1971), que propõe Quatro Níveis de Pesquisa, fundamentada no tratamento quantitativo da informação e tem ampla aplicação em dados numéricos, passíveis de representação tabular, gráfica e cartográfica. Estes são os níveis compilatório, correlativo, semântico e normativo.

No nível compilatório se dá o levantamento dos dados, seja qual for sua natureza, bem como a compilação destes; o nível correlativo é o momento de aprimoramento da interpretação, quando serão melhor selecionadas as informações, bem como geradas, se necessárias, novas variáveis que serão utilizadas; o nível semântico leva o pesquisador à interpretação dos resultados obtidos no nível anterior; e o nível normativo é a fase final do trabalho, quando o produto da pesquisa se transforma em modelo, por meio de cartogramas sínteses ou outras formas de representação acessíveis a quem tais resultados foram pensados, sendo tais níveis apresentados na Figura 6, conforme Cereda Junior (2006).

A Figura 7 apresenta os referenciais metodológicos e operacionais, bem como as variáveis do modelo de Fragilidade Ambiental.

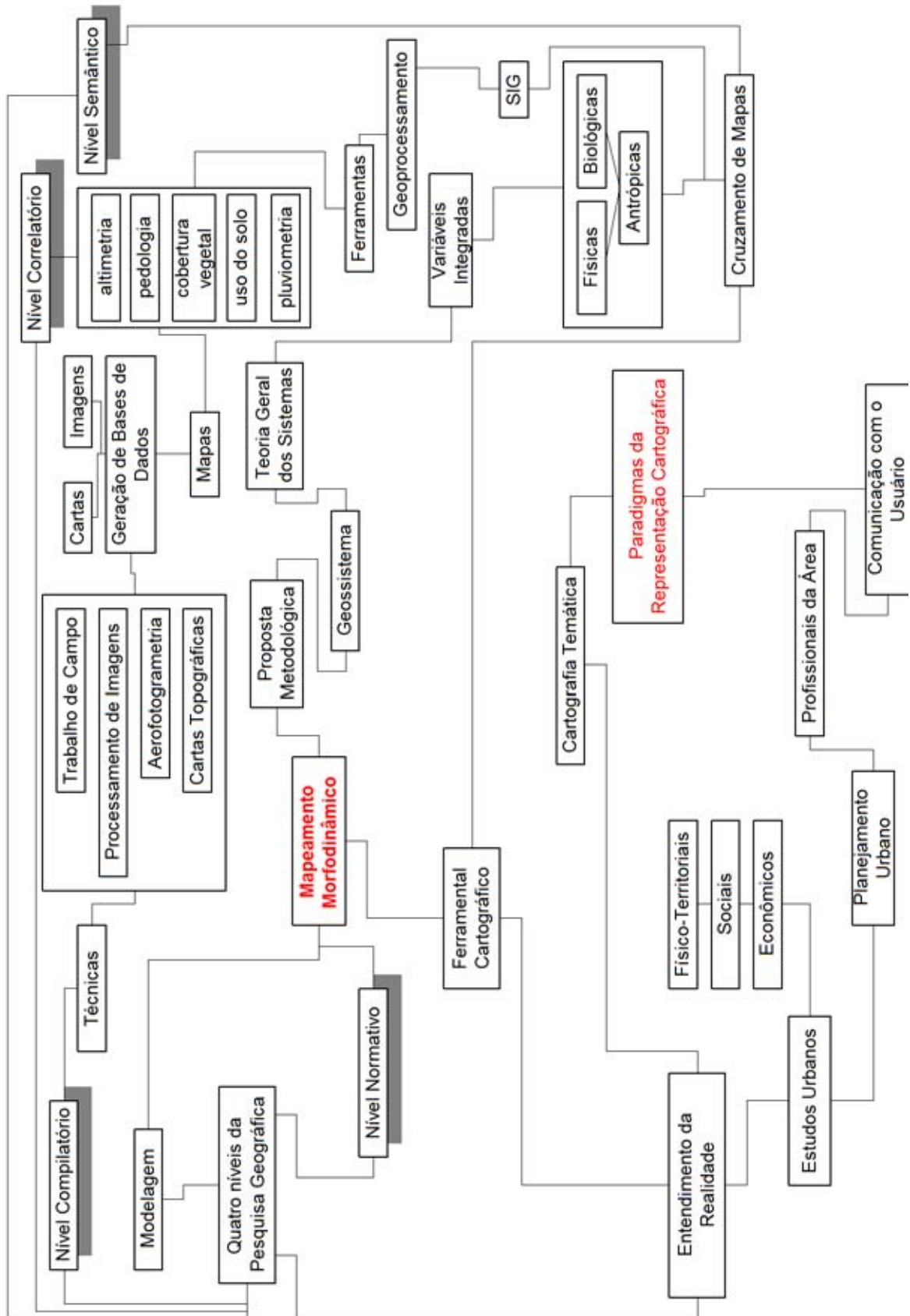


Figura 6 – Níveis Compilatórios da presente pesquisa, a partir de Libault (1971)

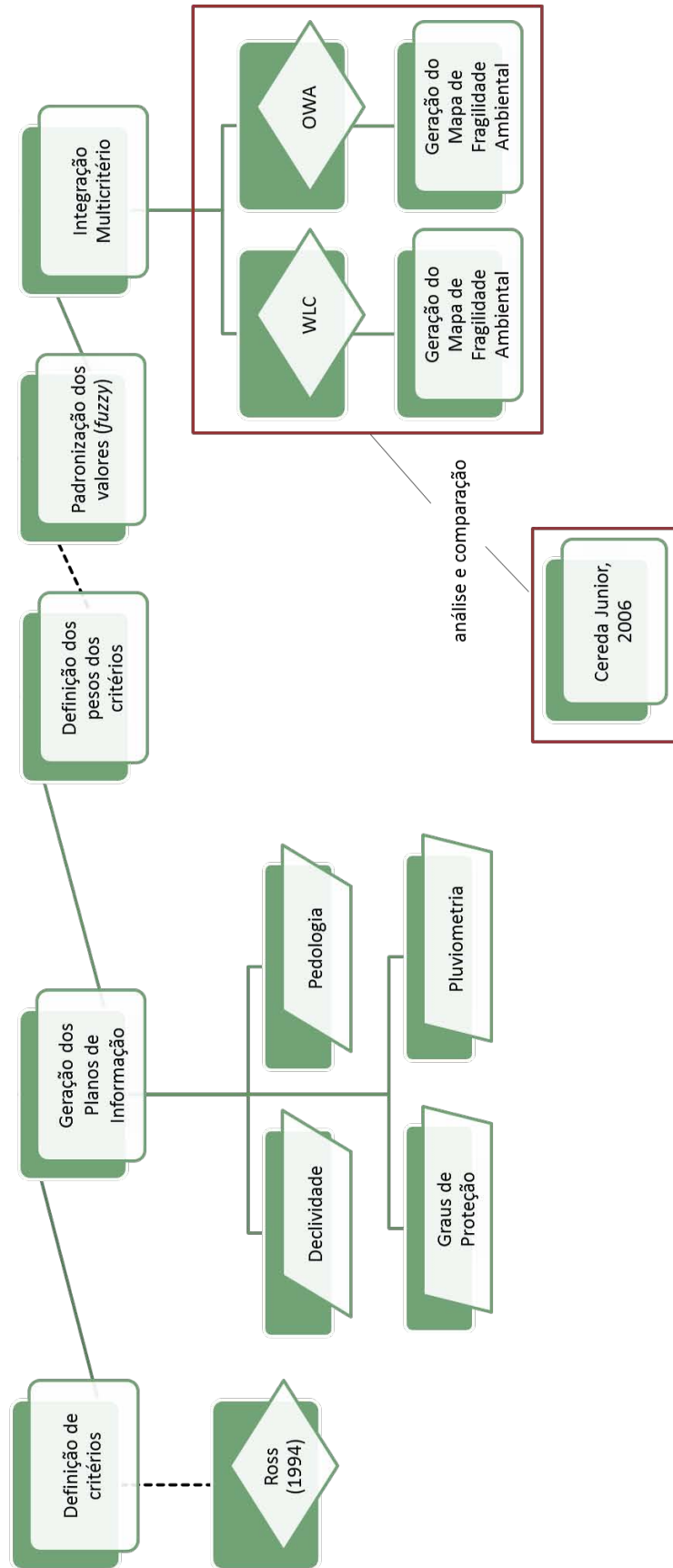


Figura 7 – Modelo de Fragilidade Ambiental, proposto pelo autor

## 4.1 Padronização dos critérios

As informações (ou variáveis) coletadas para a análise integrada do meio ambiente possuem naturezas distintas. Enquanto a declividade, por exemplo, é expressa *a priori* de maneira quantitativa, as informações de cobertura vegetal possuem expressão qualitativa. Assim, para obter não só comparabilidade, mas também ajustar os dados a uma escala comum de trabalho (necessária à análise multicritério CLP e MPO) se requer a padronização dos critérios.

Para isto o software IDRISI possui o módulo FUZZY, que possibilita a padronização, seja em escala de números reais (0-1) ou mesmo a chamada pelo IDRISI escala em *byte* (0-255), com o uso de funções sigma. A padronização (ou reescalonamento) das variáveis adotadas pela metodologia de Mapeamento de Fragilidade Ambiental está fundamentada nos Graus de Fragilidade propostos por Ross (1994) e Spörl (2001), conforme o capítulo 2.1.1, sendo escolhida a escala em números reais para este trabalho.

Por se tratar de um trabalho com viés metodológico de Cartografia de Síntese com fins de Planejamento Ambiental - e não uma proposta de critérios geomorfológicos - deve-se atentar que alguns Índices de Fragilidade são passíveis de críticas e discussão. Contudo, se tais valores fossem modificados, não haveria possibilidade de comparação com a metodologia original, bem como com outros trabalhos na área que os adotam.

Assim, no processo de padronização dos dados, as Classes de Fragilidade (que possuem cinco expressões qualitativas, de Muito Fraca até Muito Forte), optou-se pelos valores propostos, causando menor influência no modelo original de Ross (1994). Assim, a escala linear de Índice de Fragilidade (1-5), foi reescalonada de 0-1, com passo entre as classes de 0.25 unidades, permitindo a crítica ao modelo inicialmente proposto, e tendo como escolha a experiência do pesquisador para a definição destes pesos, como apresentado no item 2.1.1

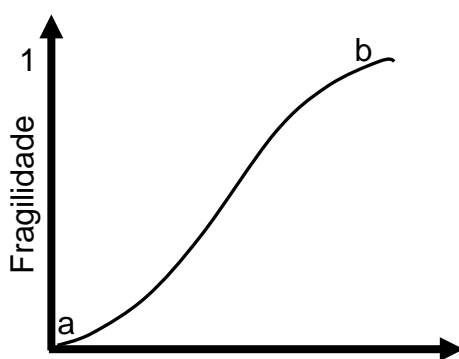
Importante salientar que a partir deste momento os dados são convertidos e processados no modelo matricial (ou *raster*), por meio da ferramenta RASTERVECTOR do software IDRISI. Neste modelo a porção do espaço a ser representada é dividida em um arranjo de células (geralmente regulares) e atribuídos

valores a estas, segundo Longley *et al.* (2010). Assim, na representação matricial, todas as variações do fenômeno ao longo do espaço são apresentadas nestas células, compondo uma superfície que tem como unidade mínima de análise o *pixel* (*picture element*). Câmara (2001) pontua que o modelo matricial permite melhor modelagem de fenômenos variantes no espaço, com processamento mais rápido e é melhor adequado para simulação, natureza dos dados aqui utilizados.

#### 4.1.1 Critério Declividade

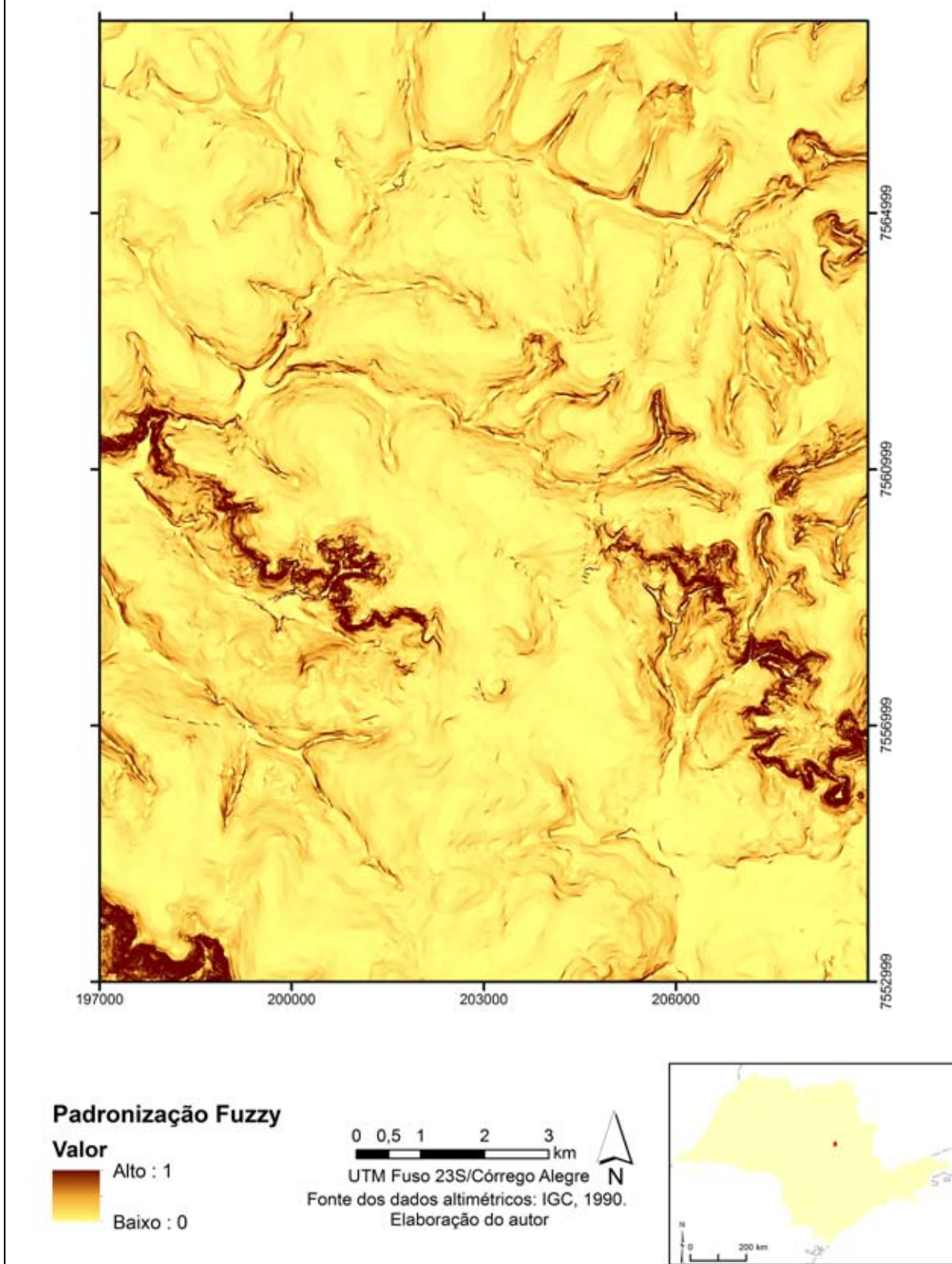
A partir dos pressupostos do item 4.1, foi realizada a padronização *fuzzy* para o critério declividade, utilizando uma função sigmoideal monótona crescente, tendo como ponto de controle **a** 0% e ponto de controle **b** 30%, obtendo o Mapa 8.

Segundo Eastman (2006), o primeiro ponto (**a**) indica onde a função de pertinência começa a subir acima de 0, e o segundo ponto (**b**) indica onde ele alcança o patamar 1, em uma escala padronizada de números reais (0-1). A função no gráfico pode ser verificada na Figura 8.



**Figura 8 - Padronização *fuzzy* para as Categorias Hierárquicas de Classes de Declividade**  
Organização e proposição dos valores *fuzzy* pelo autor

## Categorias Hierárquicas de Classes de Declividade



Mapa 8 - Padronização *fuzzy* para Declividade

#### 4.1.2 Critérios Pedologia, Proteção ao Solo e Comportamento Pluviométrico

O critério Pedologia, assim como os critérios Graus de Proteção ao Solo e Comportamento Pluviométrico, possuem natureza qualitativa, sendo que atribuição do Índice de Fragilidade é encontrada em Ross (1994). Desta forma, foi utilizada uma função *fuzzy* melhor adequada para tais tipos de dados, que considera a experiência do pesquisador, conforme Openshaw e Openshaw (1997), sendo apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 a qual membro *fuzzy* cada classe está associada, bem como os produtos cartográficos nos Mapas 9, 10 e 11.

**Tabela 8 - Padronização *fuzzy* para as Categorias Hierárquicas de Classes de Solo**

<b>Fragilidade</b>	<b>Tipos de solos</b>	<b><i>fuzzy</i></b>
Muito Baixa	Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho escuro e Vermelho Amarelo Textura Argilosa	0
Baixa	Latossolo Amarelo e Vermelho amarelo textura média/argilosa	0.25
Média	Latossolo Vermelho Amarelo, Terra Roxa, Terra Bruna, Podzólico Vermelho-amarelo textura média/argilosa	0.5
Forte	Podzólico Vermelho-amarelo textura média/arenosa, Cambissolos	0.75
Muito Forte	Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas	1

Fonte: Ross (1994)  
Organização e proposição dos valores *fuzzy* pelo autor



**Tabela 9 - Padronização *fuzzy* para as Categorias Hierárquicas de Graus de Proteção a partir do tipo de Cobertura Vegetal**

<b>Graus de proteção</b>	<b>Tipos de cobertura vegetal</b>	<b><i>fuzzy</i></b>
Muito Alta	Florestas, matas naturais, florestas cultivadas com biodiversidade.	0
Alta	Formações arbustivas naturais com estrato herbáceo denso. Formações arbustivas densas (mata secundária, cerrado denso, capoeira densa). Mata homogênea de Pinus densa. Pastagens cultivadas sem pisoteio de gado. Cultivos de ciclo longo como o cacau.	0.25
Média	Cultivo de ciclo longo em curvas de nível, terraceamento com café, laranja com forrageiras entre as ruas. Pastagem com baixo pisoteio. Silvicultura de eucaliptos com sub-bosque de nativas.	0.5
Baixa	Culturas de ciclo longo de baixa densidade (café, pimenta-do-reino, laranja), com solo exposto entre ruas, culturas de ciclo curto (arroz, trigo, feijão, soja, milho, algodão) com cultivo em curvas de nível/ terraceamento.	0.75
Muito Baixa a nula	Áreas desmatadas e queimadas recentemente, solo exposto por arado/gradeação, solo exposto por caminhos, estradas, terraplanagens, culturas de ciclo curto sem práticas conservacionistas. <sup>6</sup>	1

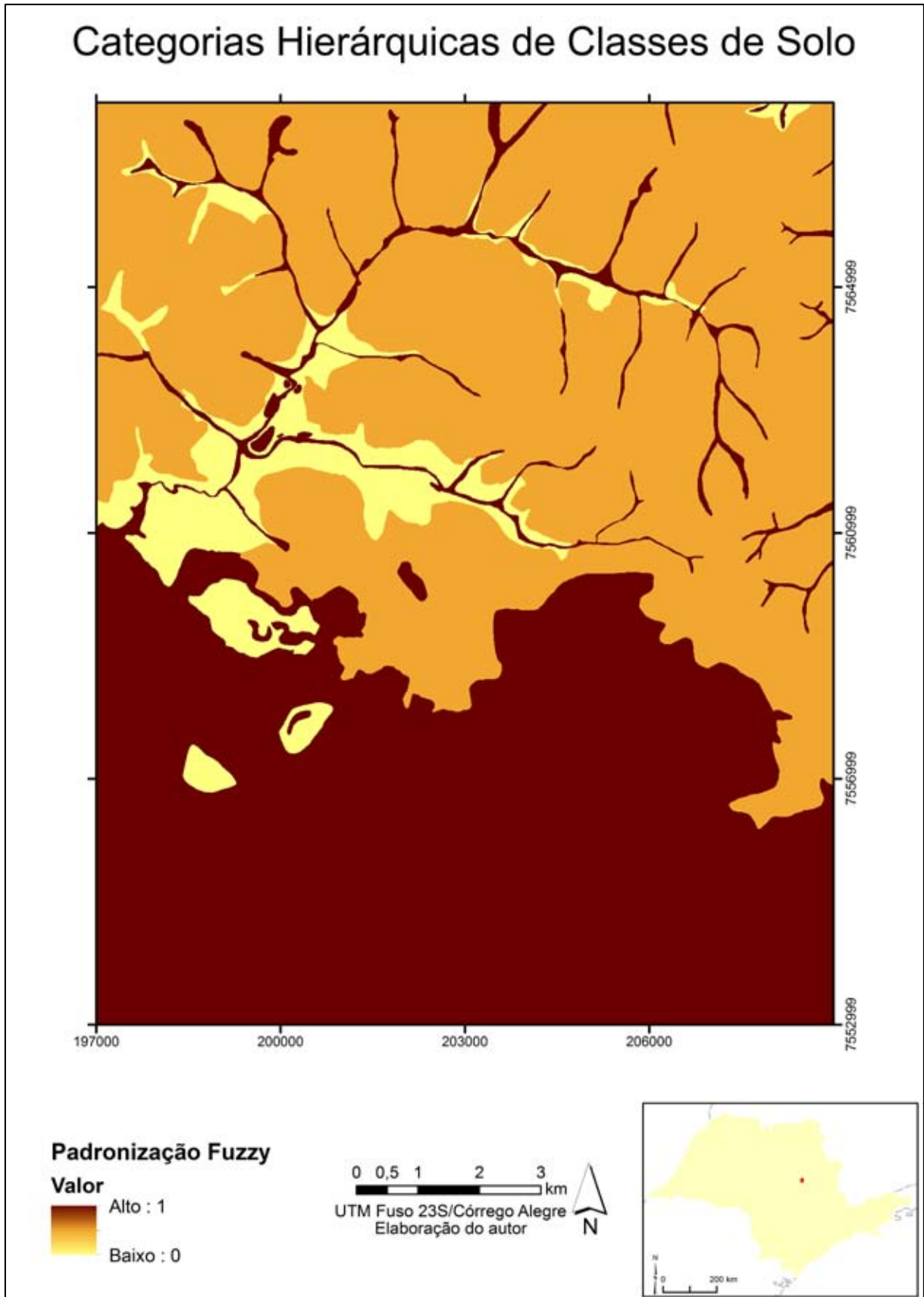
Fonte: Ross (1994)  
Organização e proposição dos valores *fuzzy* pelo autor

**Tabela 10 - Padronização *fuzzy* para as Categorias Hierárquicas dos comportamentos pluviométricos**

<b>Níveis hierárquicos</b>	<b>Características pluviométricas</b>	<b><i>fuzzy</i></b>
Muito Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 1000 mm/ano.	0
Baixa	Situação pluviométrica com distribuição regular ao longo do ano, com volumes anuais não muito superiores a 2000 mm/ano.	0.25
Média	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com períodos secos entre 2 e 3 meses no inverno, e no verão com maiores intensidades de dezembro a março.	0.5
Forte	Situação pluviométrica com distribuição anual desigual, com período seco entre 3 e 6 meses, e alta concentração das chuvas no verão entre novembro e abril quando ocorrem de 70 a 80% do total das chuvas.	0.75
Muito Forte	Situação pluviométrica com distribuição regular, ou não, ao longo do ano, com grandes volumes anuais ultrapassando 2500 mm/ano; ou ainda, comportamentos pluviométricos irregulares ao longo do ano, com episódios de chuvas de alta intensidade e volumes anuais baixos, geralmente abaixo de 900mm/ano (semiárido).	1

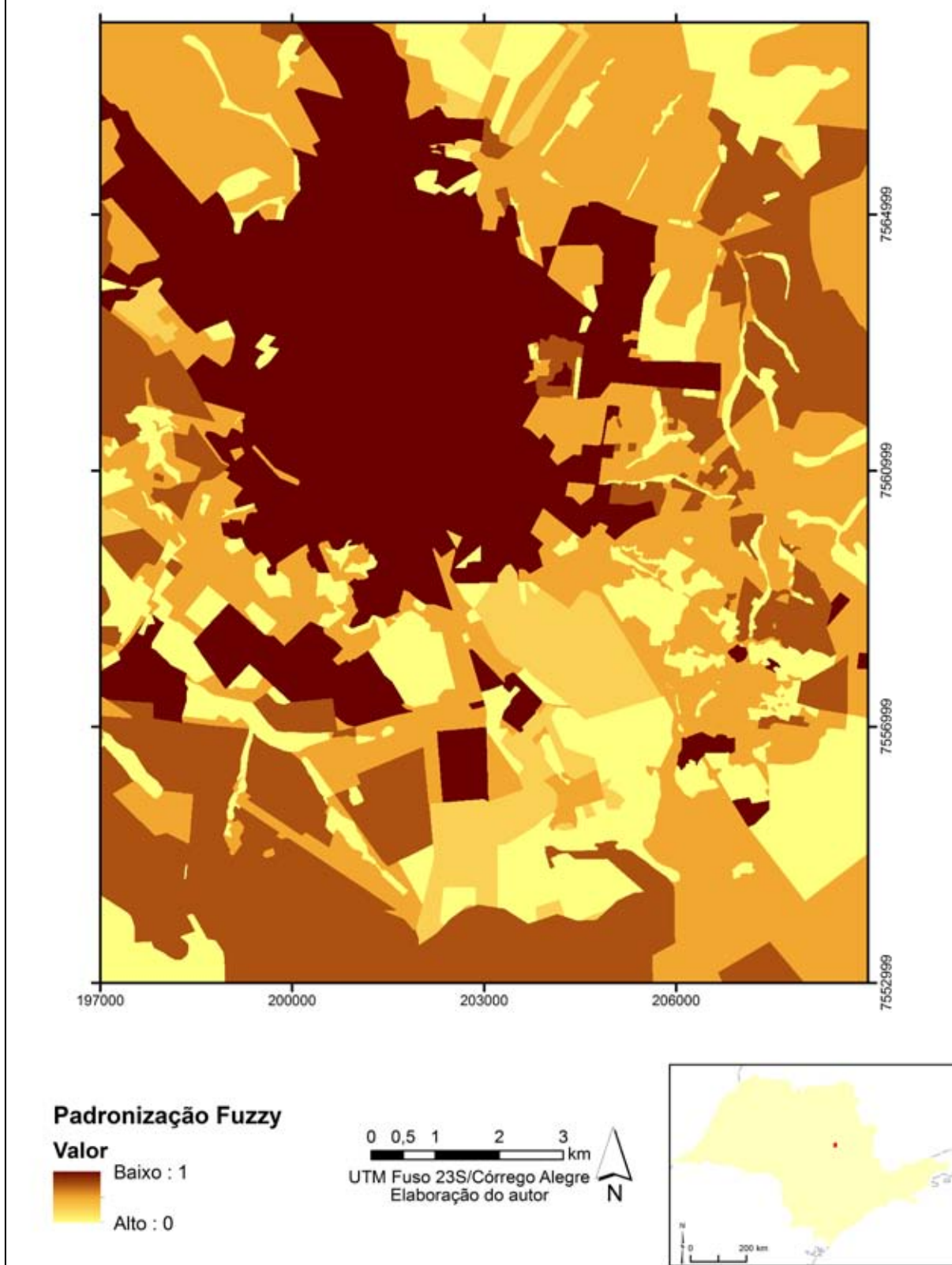
Fonte: Spörl (2001)  
Organização e proposição dos valores *fuzzy* pelo autor

<sup>6</sup> Cabe ressaltar que as áreas urbanizadas se incluem nesta classe pois não apresentam graus de proteção por vegetação. Tal associação pode levar a análises extremas, conforme será discutido posteriormente.

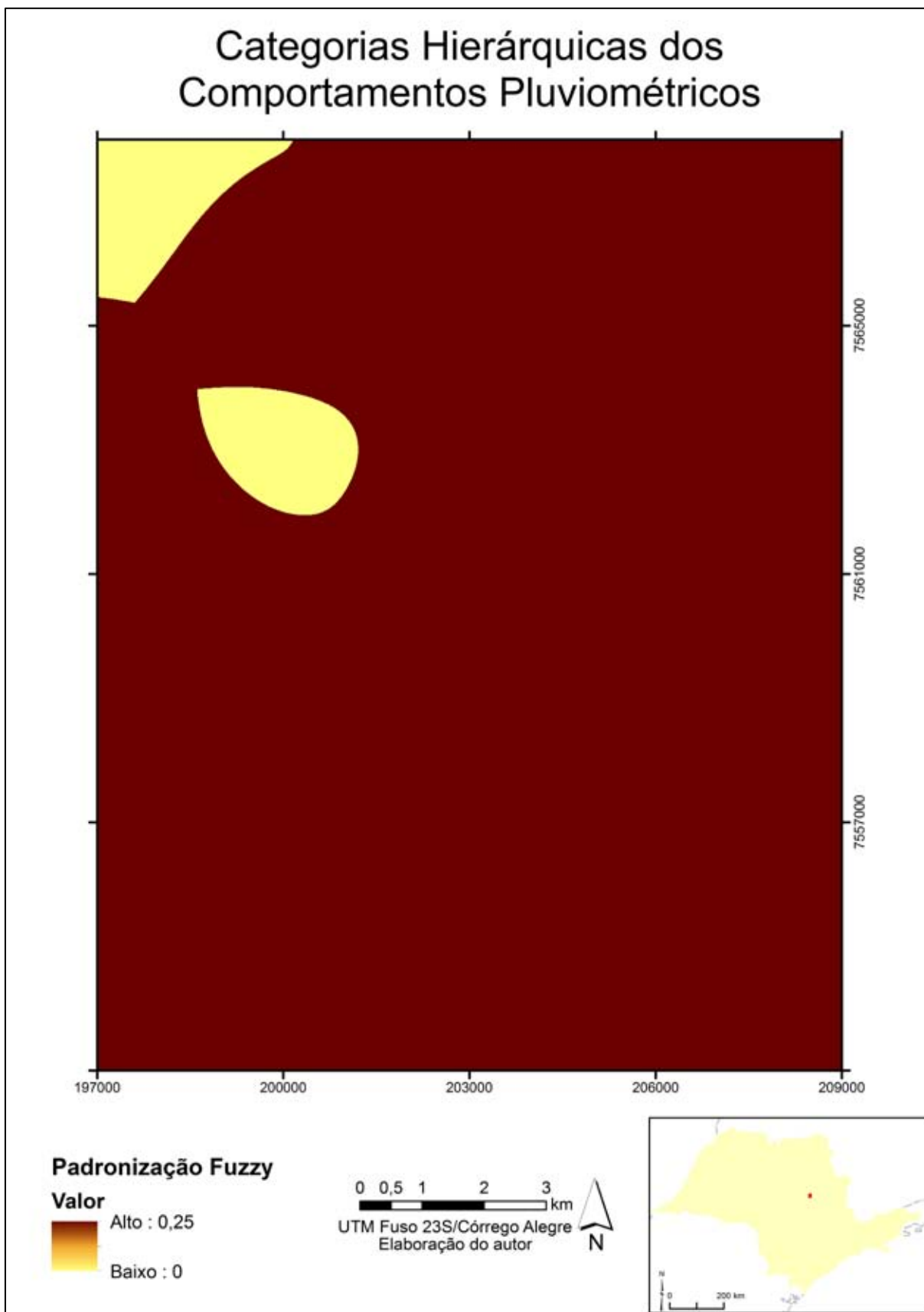


Mapa 9 - Padronização *fuzzy* para Pedologia

## Categorias Hierárquicas de Graus de Proteção



Mapa 10 - Padronização *fuzzy* para Graus de Proteção



Mapa 11 - Padronização *fuzzy* para Comportamentos Pluviométricos

## 4.2 Ponderação dos critérios

Após a padronização *fuzzy* em uma escala de 0 a 1 das variáveis do Modelo de Fragilidade Ambiental (mapas 8 a 11), é necessário definir a importância relativa de cada uma destas variáveis para a aplicação dos Métodos de Combinação Linear Ponderada e do Método da Média Ponderada Ordenada.

Isto é feito no Módulo WEIGHT do software IDRISI, utilizando o método de comparação AHP, método de inferência que, como já explanado, leva em consideração diferentes pesos para as variáveis, e, a partir da comparação pareada, gera dados numéricos da importância relativa destas. Os pesos de cada membro *fuzzy* são equivalentes, então, aos autovetores da matriz de comparação pareada.

Assim, conforme uma escala predeterminada, que vai de 1 a 9, na qual o valor 1 equivale à importância igual entre os fatores, foi realizada a comparação, por meio dos níveis de compensação. O Nível de Compensação, segundo Eastman (2006) é o grau em que um fator pode compensar outro, processo controlado por um conjunto de fatores ponderados, onde após a atribuição de pesos a soma de todos deve ser igual a 1.

Para o presente estudo, a fim de evitar a influência de um fator ou outro, como na proposta original de Ross (1994), propõe-se que para as nuances ambientais já julgadas na padronização dos dados a importância relativa de cada um dos temas seja 1, ou seja, importância entre os fatores, as duas atividades contribuem igualmente para os objetivos (SAATY, 1991) Declividade, Pedologia, Proteção ao Solo e Pluviometria, variáveis da metodologia da Fragilidade Ambiental, conforme a Tabela 11.

**Tabela 11 - Ponderação de Critérios AHP**

	Declividade	Pedologia	Proteção	Pluviometria
Declividade	1			
Pedologia	1	1		
Proteção	1	1	1	
Pluviometria	1	1	1	1

Organização e proposição do autor

Com a comparação pareada concluída, obteve-se razão de consistência de valor 0,0. Segundo Carvalho & Riedel (2005) a soma dos pesos calculados deve ser igual a 1, sendo aconselhável que este valor sempre seja sempre menor que 0,1 (onde quanto mais próximo de 0, mais coerente será o modelo). Os autores também pontuam que esta razão mede a coerência e a consistência das relações de importância consideradas na análise, quando ao obter valor superior a 0,1 o julgamento dos condicionantes deve ser refeito, por apresentar incoerências.

Também, conforme descreve Câmara *et al.* (2002), de cada matriz de comparação pareada foram extraídos seus autovetores, que correspondem ao grau de importância relativa para cada fator considerado. Os autovetores resultantes da matriz de comparação dos atributos do segundo nível da hierarquia, no caso os PIs, são denominados Notas e os resultantes da matriz de cada conjunto de atributos do terceiro nível, ou seja, as feições mapeadas em cada Plano de Informação, são chamados de Pesos. Com os pesos calculados, procede-se a aplicação da Combinação Linear Ponderada (CLP) e a Média Ponderada Ordenada (MPO).

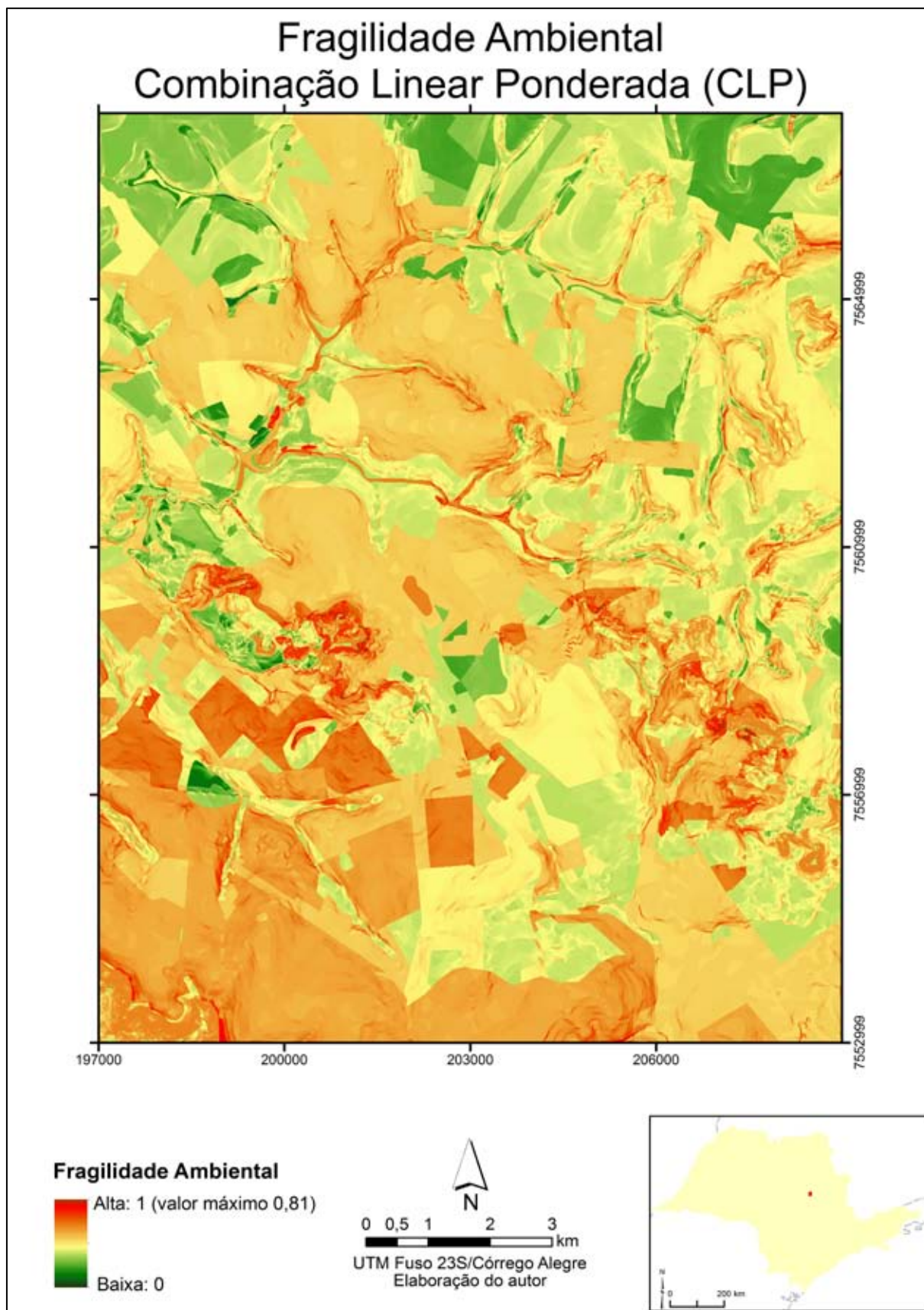
### **4.3 Fragilidade Ambiental - Combinação Linear Ponderada (CLP)**

Como apresentado na discussão teórico-metodológica, a Combinação Linear Ponderada irá, a partir dos mapas de cada fator, multiplicar cada célula (*pixel*, com resolução de dois metros no presente trabalho), pelo seu peso e então somar os resultados. Vettorazzi (2006) explica que devido os pesos terem de somar 1, o produto final terá uma variação de valores como aqueles dos mapas padronizados; assim, após os fatores terem sido incorporados, o mapa final é multiplicado por cada uma das restrições.

Tais pesos, como já apresentado na discussão teórica, indicam a importância de cada critério em relação aos demais e controlam como os fatores irão compensar-se – para o caso da Fragilidade Ambiental, fatores com alta fragilidade em um determinado local compensam outros fatores na mesma localização com baixa fragilidade.

Antes da apresentação do resultado, é importante lembrar que a Combinação Linear Ponderada se caracteriza pela combinação dos critérios levando-os a um risco médio, já que está exatamente entre o processo de minimização (AND) e de maximização (OR) do risco.

Para a operacionalização, o IDRISI apresenta o módulo MCE (*multi-criteria evaluation*), que contempla funções multicriteriais para técnicas booleanas (*boolean intersection*), bem como as técnicas necessárias ao experimento nesta tese, ou seja, o uso da função *Weighted linear combination*. Como resultado, tem-se o Mapa 12.



Mapa 12 –Fragilidade Ambiental – Combinação Linear Ponderada



#### 4.4 Fragilidade Ambiental - Média Ponderada Ordenada (MPO)

Para a integração dos fatores por meio do procedimento MPO, os procedimentos são semelhantes à CLP tendo, contudo, a inserção dos pesos de ordenamento (*order weights*), sendo estes no mesmo número de fatores - na presente tese, quatro – aplicados de acordo com sua posição. A documentação do software IDRISI ressalta que não se deve pensar *order weights* como pertencentes a um fator em específico, mas sim quanto à sua posição (*rank order*).

As ferramentas no software IDRISI estão inseridas no módulo MCE (*multi-criteria evaluation*), com o uso da função *Ordered weighted average*. Como primeira aproximação do método MPO, foi definido para o *order weight 1* o máximo valor possível (1 - um) que leva a análise na direção de um valor mínimo para os fatores em cada localização, ou seja, totalmente aversas a risco que, como já apresentado, se comporta como um operador de intersecção AND, onde é atribuído como peso total o fator com o valor mínimo; já que não há ordenamento dos outros critérios, não existe compensação (*trade-off*), e o valor mínimo determina a análise final.

Como explica Dalmas (2008), se a soma de todos os pesos ordenados deve ser 1 (um) e, quando este valor é atribuído ao fator de menor influência no processo anterior de ponderação (WEIGHT, no IDRISI), há uma tendência para que a solução de análise tenha um baixo risco (AND), no qual fator é assim considerado fundamental (mas não suficiente por si próprio) no resultado final.

Também foi gerado um cenário (termo utilizado para o produto da MPO) na qual o *order weight 4* foi definido como um (1), ou seja, um alto peso de ordenação leva a análise a um valor máximo para os fatores para cada localização; uma solução totalmente arriscada, com um operador de união OR, o local será incluído no conjunto de decisões se pelo menos um critério for atendido.

Para este caso, Dalmas (2008) afirma que quando o valor total dos pesos é atribuído ao fator de maior influência no processo anterior de ponderação, há uma tendência para que a solução da análise tenha um alto risco (OR) e cada critério é suficiente por si próprio para moldar o resultado final, sem sofrer influência dos outros critérios.

A partir do entendimento do Espaço de Decisão Estratégica (Figura 5), bem como os pressupostos teóricos-metodológicos da presente tese, foram definidos os *order weights*, apresentados na Tabela 12, que representam baixo risco (análise pessimista ou conservadora) e risco extremo (análise otimista e ausência de compensação). A ponderação de critérios é a adotada para a técnica CLP, Tabela 11 (página 106). Os produtos cartográficos obtidos são apresentados no Mapa 13 e Mapa 14.

**Tabela 12 – Pesos de Ordenamento AND, OR e CLP para MPO**

Cenário	Order Weight 1	Order Weight 2	Order Weight 3	Order Weight 4	ANDness	Trade-off
C1 (AND)	1	0	0	0	1,0	0,0
C2 (OR)	0	0	0	1	0,0	0,0
CLP <sup>7</sup>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	1,0

Elaboração do autor

Desta forma, no Cenário 1 o que pode ser verificado é que as Fragilidades Ambientais atingiram, no máximo, 0,25, ou seja, toda a área se inclui na Classe de Baixa Fragilidade, com risco mínimo e sem *trade-off*. Já no Cenário 2 os valores atingem toda a gama de classes (0-1), sendo que a maior parte da área se insere em Classes de Alta Fragilidade, com risco máximo e sem *trade-off*.

Visando não só um melhor entendimento, mas também extrair do método MPO sua principal característica – o controle do nível de *ANDness* - foram gerados três cenários alternativos, conforme a Tabela 13 e, graficamente, na Figura 9. Na CLP, sempre há *trade-off* total, ou seja, as variáveis não podem ser controladas, desta forma, serão gerados cenários com *trade-off* mas com diferentes níveis de *ANDness*.

**Tabela 13 – Pesos de Ordenamento aplicado para MPO – novos cenários**

Cenário	Order Weight 1	Order Weight 2	Order Weight 3	Order Weight 4	ANDness	Trade-off
C3 <sup>8</sup>	0,55	0,25	0,15	0,05	0,77	0,57
C4 <sup>9</sup>	0,05	0,15	0,25	0,55	0,23	0,57
C5 <sup>10</sup>	0,1	0,4	0,4	0,1	0,5	0,65

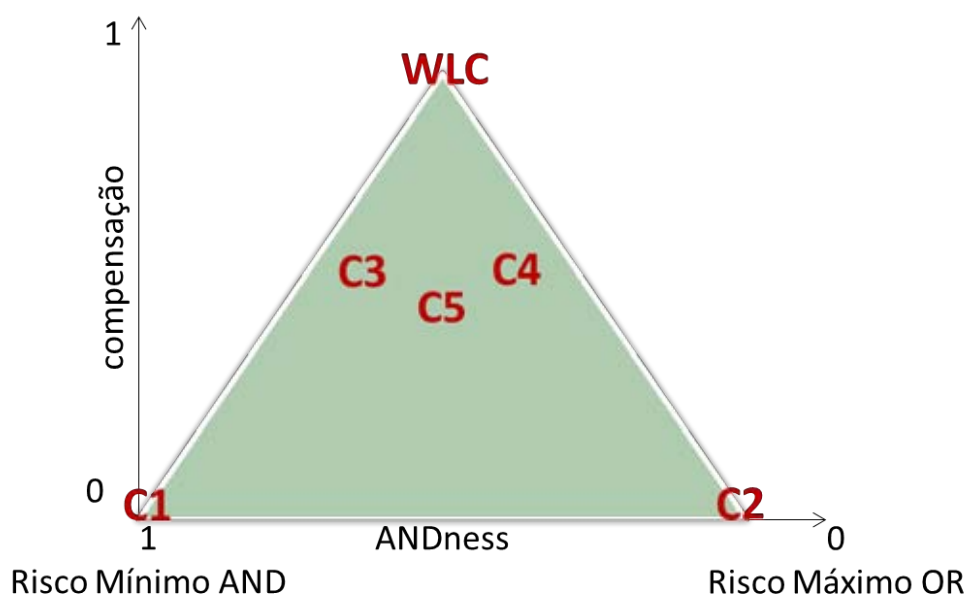
Elaboração do autor

<sup>7</sup> Tal proposição é relatada na tabela como referência, pois é a própria CLP, com risco médio e compensação total, tendo sido os resultados apresentados no item 4.2

<sup>8</sup> baixo risco, *trade-off* parcial

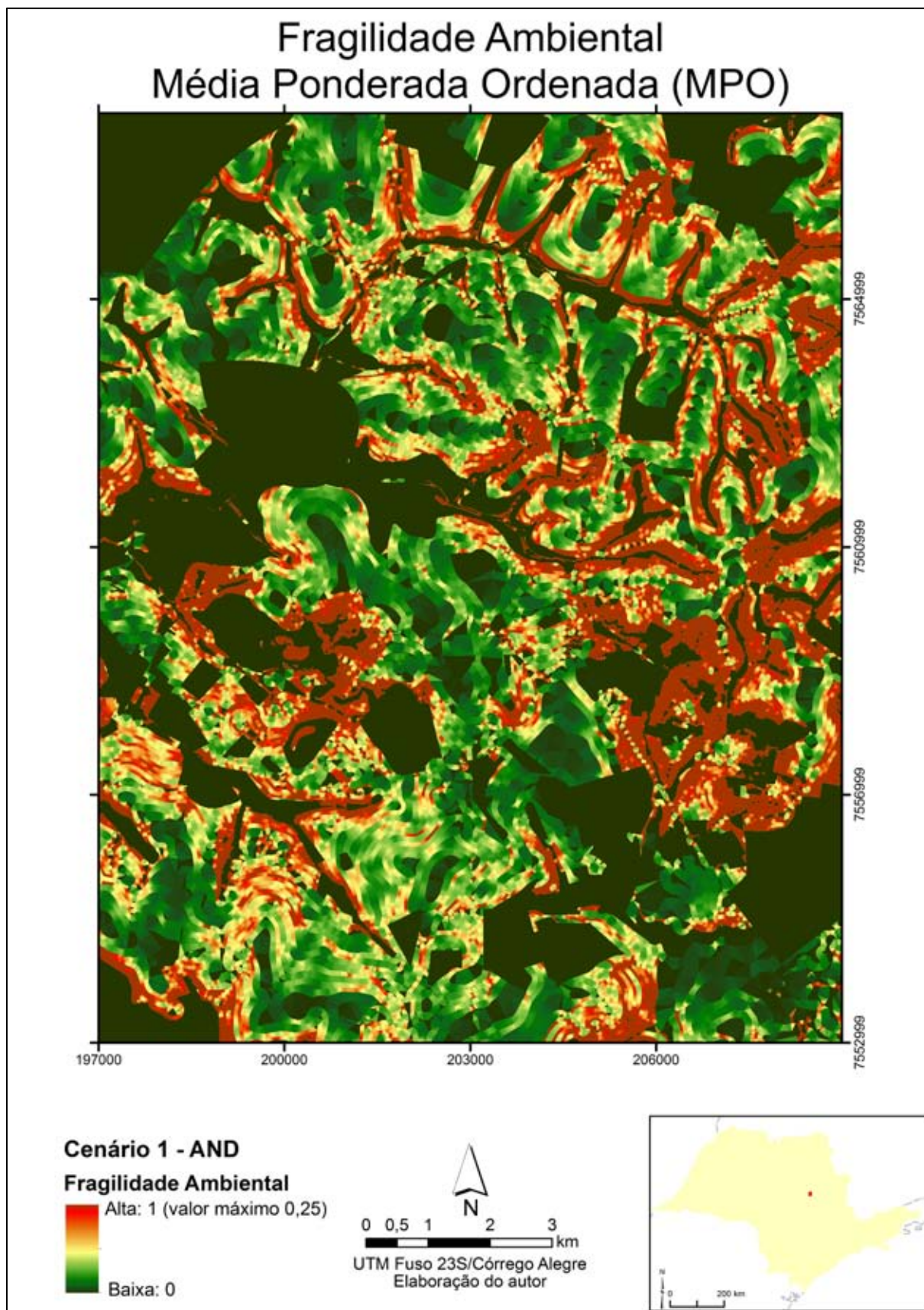
<sup>9</sup> alto risco, *trade-off* parcial

<sup>10</sup> risco neutro, *trade-off* parcial

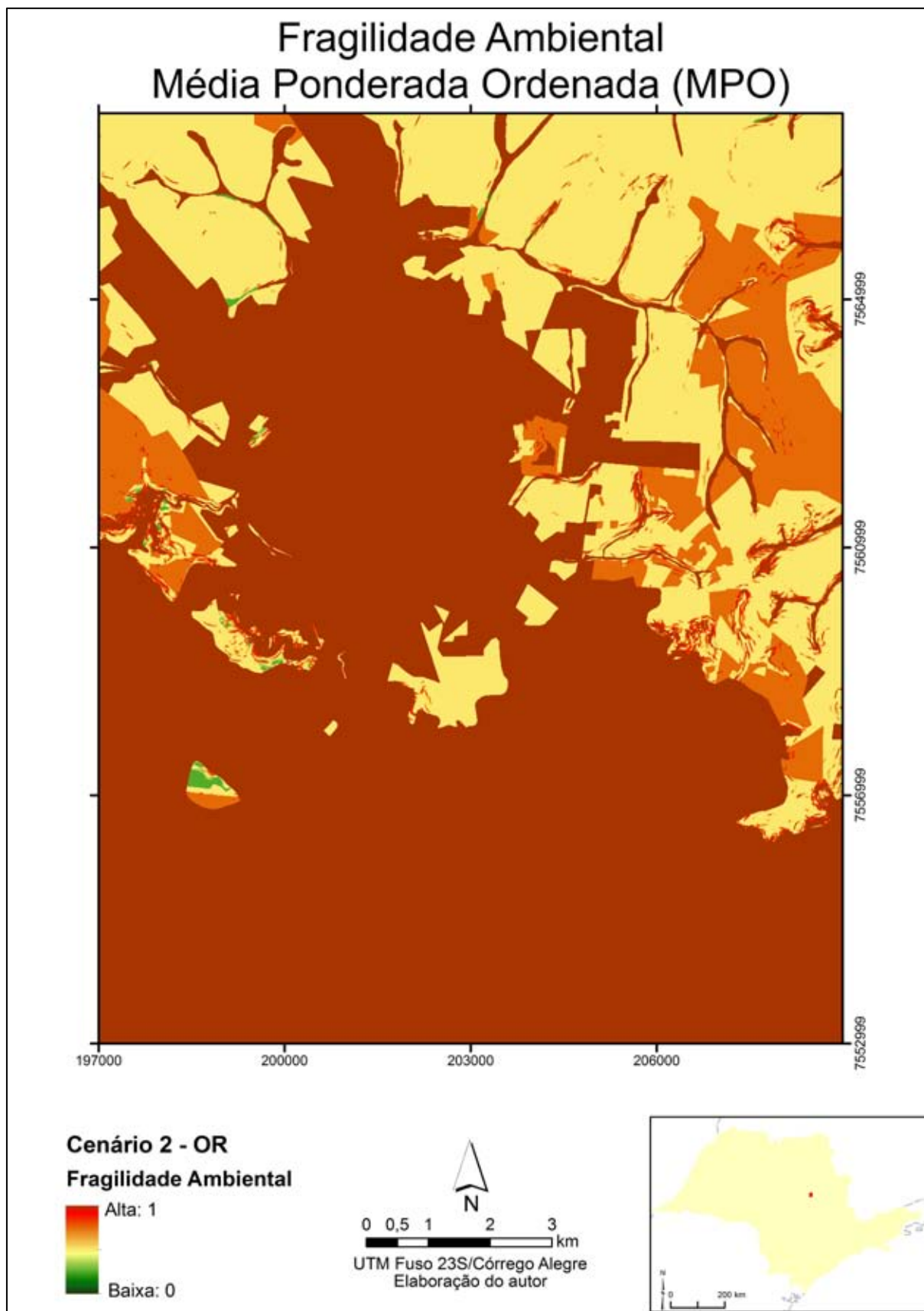


**Figura 9 – Pesos de Ordenação no Espaço de Decisão Estratégica**

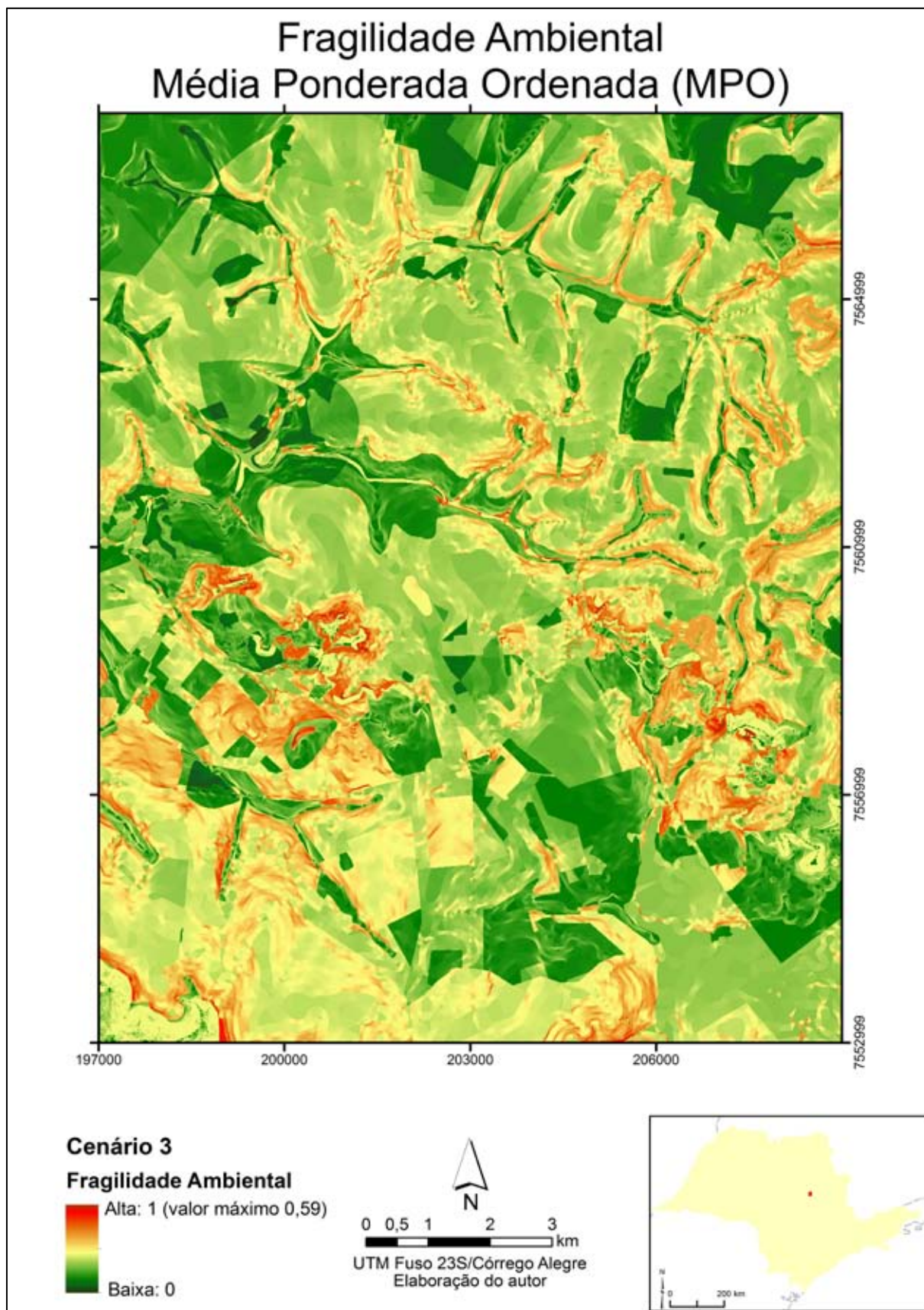
Para melhor visualização cartográfica, o Anexo 1 da presente tese apresenta uma solução cartográfica chamada de “coleção de mapas”, com escala única bem como extensão cartográfica de cada tema. Com isto, pretende-se que seja utilizado como material de apoio síntese para a leitura e análise crítica do capítulo Análise dos Resultados.



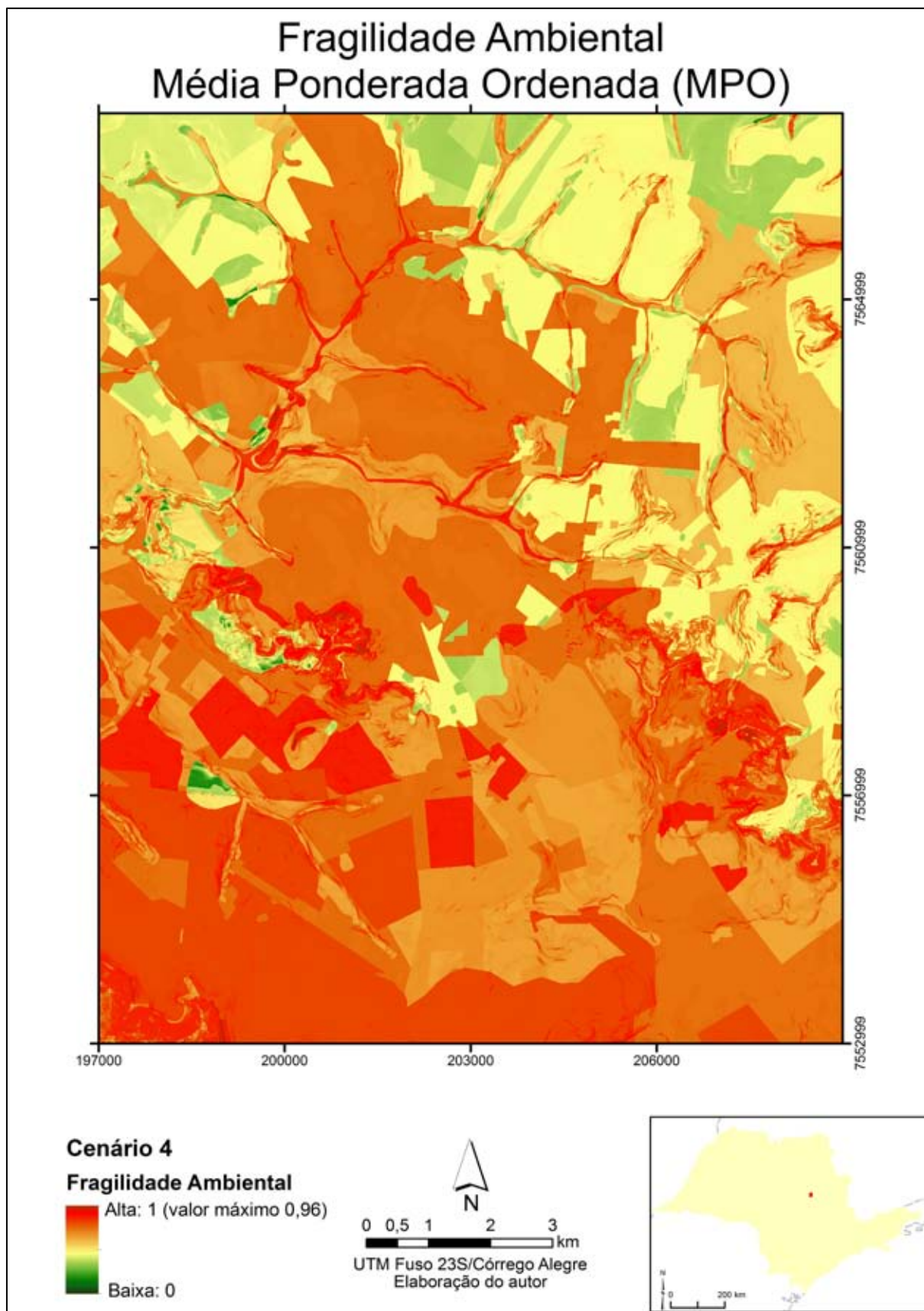
Mapa 13 – Fragilidade Ambiental – Média Ponderada Ordenada Cenário 1



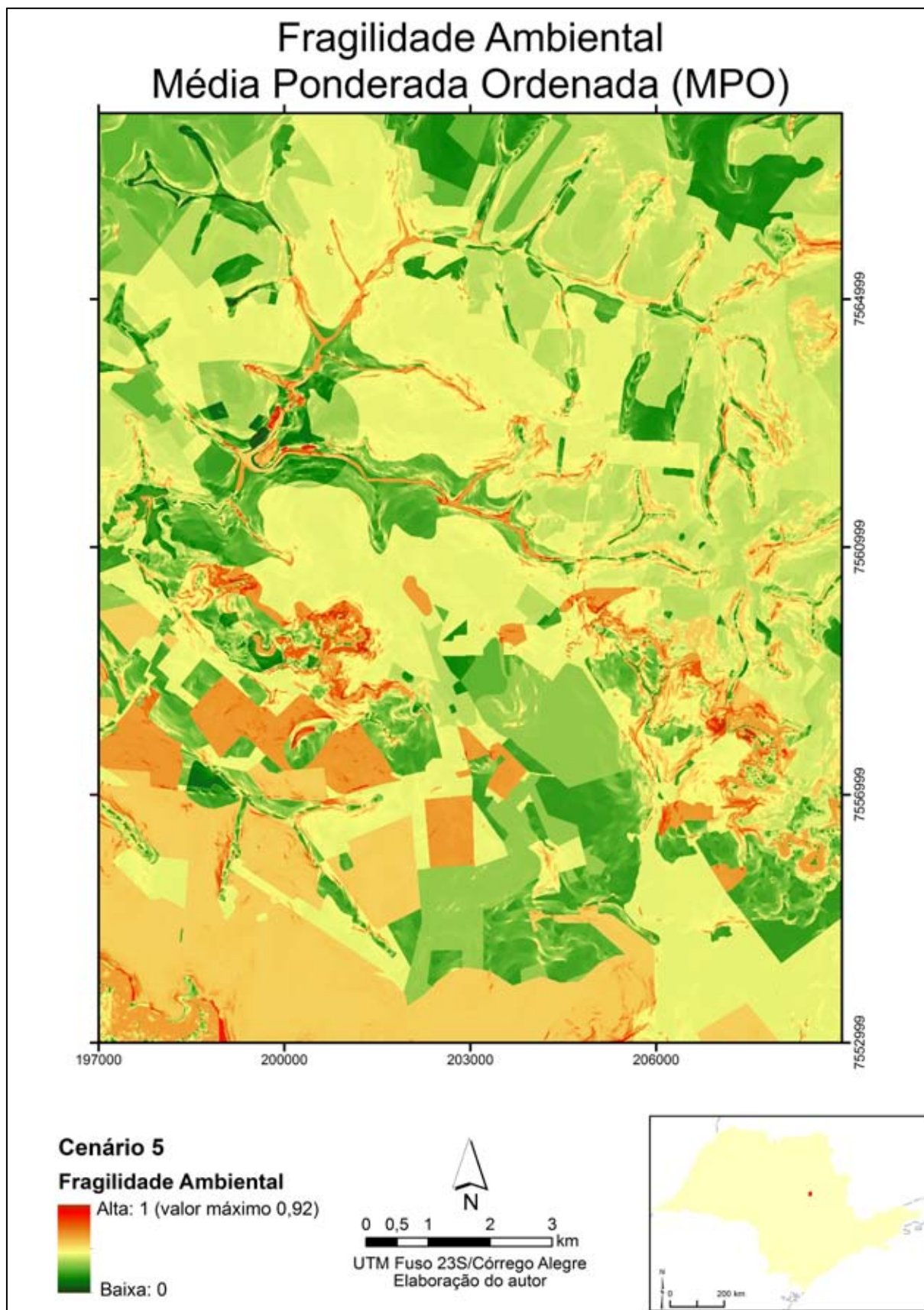
Mapa 14 –Fragilidade Ambiental – Média Ponderada Ordenada Cenário 2



Mapa 15 –Fragilidade Ambiental – Média Ponderada Ordenada Cenário 3



Mapa 16 –Fragilidade Ambiental – Média Ponderada Ordenada Cenário 4



Mapa 17 –Fragilidade Ambiental – Média Ponderada Ordenada Cenário 5



## 4.5 Discussão dos Resultados

A partir dos resultados obtidos, bem como o arcabouço teórico construído, pode-se tecer não só análise quantitativa de Índices de Fragilidade Ambiental, mas sim, a análise sob o ponto de vista da integração das variáveis a partir das técnicas aplicadas.

O produto cartográfico a partir do método CLP, apresentado no Mapa 12, aplica aos critérios de baixa fragilidade compensações, a partir daquelas com índices mais altos, permitindo que as supostas interferências do Modelo proposto por especialistas na área – como Ross (1994) – sejam, se não eliminadas, minimizadas pelo *ANDness* médio (0,5) e total compensação (1,0), ou o extremo do triângulo no Espaço de Decisão Estratégica. Contudo, neste caso, os pesos de cada critério considerados extremamente altos ou extremamente baixos tendem a aproximar de uma média completa, distorcendo variáveis que, de fato, podem ter diferenciação em sistemas complexos, como os ambientais. Como exemplo, em um determinado local com Grau de Proteção Médio e Pedologia de Baixa Fragilidade, a total compensação (*trade-off* 1) permitiria que a Declividade (com Alta Fragilidade) continue a influenciar fortemente no Modelo.

Pode-se afirmar assim que a CLP, ao atribuir um *ANDness* médio mas com *trade-off* 1, permite compensação máxima entre a alta fragilidade e baixa fragilidade, criando níveis intermediários heterogêneos por cálculo, mas homogêneos na paisagem.

Desta forma, com risco da análise (*ANDness*) baixo (maior que 0,5) há minimização das Fragilidades, já que estas devem ter altos índices para todos os fatores envolvidos. Considerando análises de alto risco (*ANDness* menor que 0,5) o índice de Fragilidade é maximizado, porque o maior valor encontrado em um dos critérios direciona os demais.

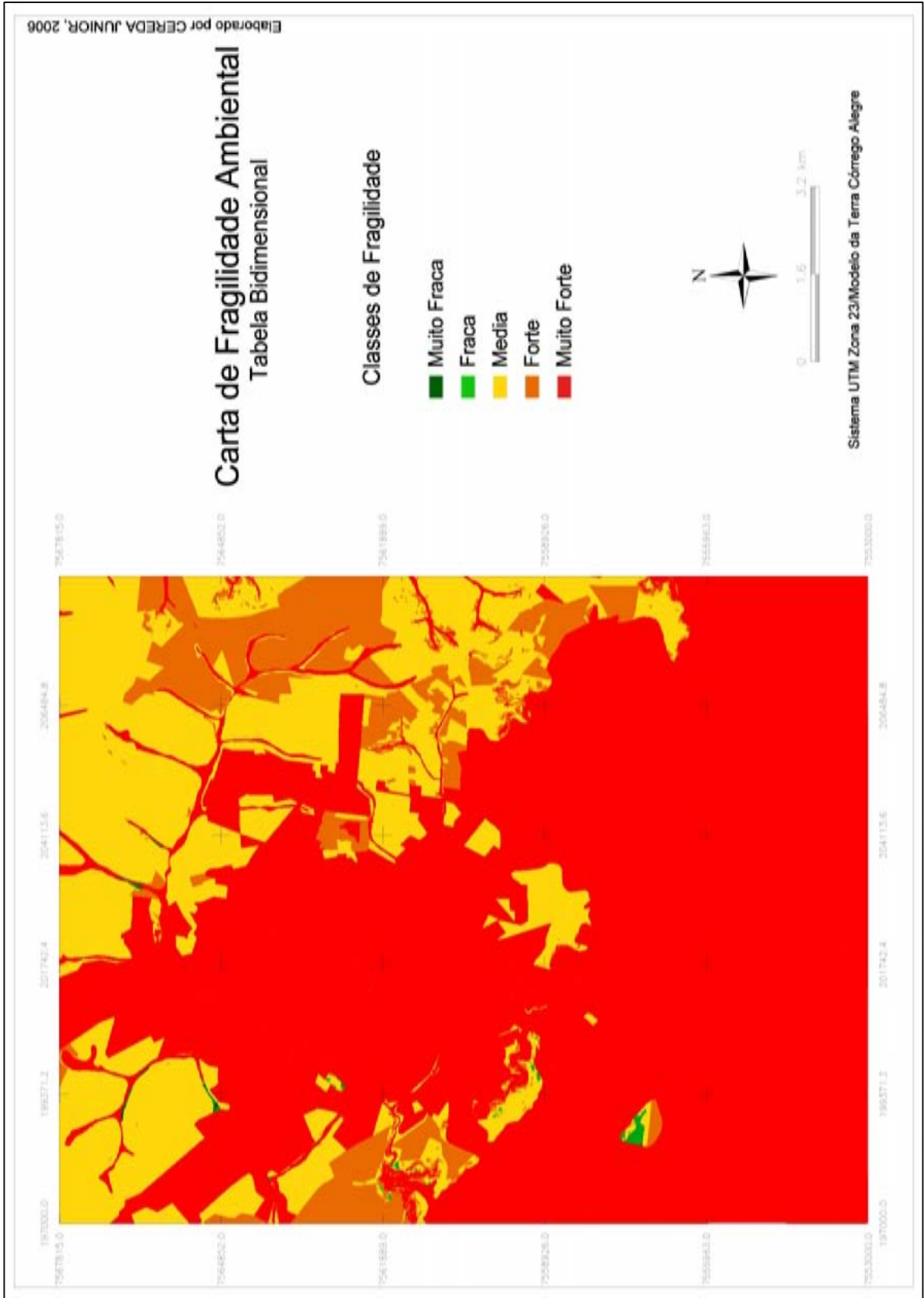
Com o controle permitido pelo método MPO, construiu-se o Cenário 1 com risco mínimo (*ANDness* 1, ou *ANDtotal*) e nenhuma compensação entre os critérios (*trade-off* 0), e que, a partir do resultado obtido, apresentado no Mapa 13, confirma a tendência para análises de sistema ambientais de que a solução AND total leva os dados à minimização quase total das suas características expressas na Paisagem.

Para o objeto de estudo, o maior índice de Fragilidade calculado para toda a área foi 0,25 (risco extremamente baixo), fato não confirmado em visitas de campo e referencial bibliográfico, bem como incoerente com os Mapas Base, principalmente Pedológico e de Declividades.

Com isto, a partir da criação do Cenário 2, de risco máximo, com *ANDness* 0 (ou *ORtotal*), o resultado apresentado confirmou a expectativa deste modelo. Conforme esperado, não havendo compensação entre as variáveis (*trade-off* 0), leva os dados à solução em que os critérios com valores críticos elevam o Índice de Fragilidade final, apresentado no Mapa 14. Tal cenário também confirma a hipótese inicial deste trabalho de que os métodos multicritérios baseados em álgebra booleana não permitem a apreensão total do complexo ambiental.

Isto pode ser verificado cartograficamente no Mapa 18, apresentado em Cereda Junior (2006), gerado por um modelo booleano, com a técnica da Tabela de Dupla Entrada. Tal solução, considerada apropriada, pois segue todos os princípios metodológicos do Modelo inicial, pode ser contestada ao se ter o controle dos pesos e pesos de ordenamento, como na MPO, pois neste momento fica evidente o deslocamento das Classes para Índices de Fragilidade próximos ou exatamente 1, concretizando-se na Paisagem como áreas críticas, com Fragilidades altíssimas para áreas que, com confirmação em campo, não possuem tais características.

Esperando-se confirmar ou refutar tais afirmações, foram gerados os Cenários 3 e 4, obtendo-se os produtos cartográficos síntese apresentados nos Mapas 15 e 16. Tais cenários foram construídos, respectivamente, a fim de se obter baixo risco, mas com um *trade-off* parcial (*ANDness* 0,77 e *trade-off* 0,57), bem como um alto risco mas com *trade-off* parcial (*ANDness* 0,23 e *trade-off* 0,57). Os resultados obtidos confirmaram as expectativas teóricas do modelo, no qual ao caminhar pelo eixo *ANDness* no Espaço de Decisão Estratégica para um risco mínimo ou um risco máximo, mas considerando uma compensação média, os resultados exibem tendências à soluções extremas, mas compensadas pelos valores mais críticos.



Mapa 18 –Fragilidade Ambiental – Booleano Tabela Bidimensional

Portanto, buscando-se uma solução em que haja compensação entre as variáveis, mas com uma tendência à solução intermediária (e não extremas) para o Modelo de Fragilidade Ambiental esta tese conclui que cenários com valores *ANDness* de 0,5 (ou próximos a ele, ou seja, risco neutro), bem como *trade-off* próximos a 0,5, se ajustam melhor não somente aos princípios técnicos mas principalmente ao embasamento teórico.

Sendo assim, o ambiente classificado não mais com limites rígidos e com critérios ambientais que buscam a reintegração do complexo ambiental, concretizado na Paisagem, sendo considerados - não somente por influência dos critérios pré-estabelecidos pelos especialistas, mas também ajustados pelo método MPO - proporciona aos envolvidos controle sobre seus componentes e permite que a expressão espacial do ambiente seja manifesta na análise.

Um valor de *trade-off* maior que 0,5 - mas menor que 0,75 - foi calculado buscando-se que os critérios com valores elevados possam ter tal característica preservada, mas sem interferir deterministicamente no Modelo, ou seja, uma leve tendência de compensação, obtendo-se 0,65 para a área de estudo. Para isto, na distribuição de *order weights*, foi definido que os valores extremos (*order weight 1* e 4) teriam valor 0,1, enquanto os valores centrais 0,4, conforme a Tabela 13.

Sem pressupostos - somente pesos e modelagens espaciais - foi possível construir uma linha lógica de tomada de decisões, culminando nas proposições da Tabela 13 (calculadas a partir das Equações 5 e 7) sem direcionamento ou mesmo cálculos automáticos a partir de critérios genéricos do software, confirmado o conceito de *orientado pelo conhecimento (knowledge-driven)* aos métodos CLP e MPO, e tendo como resultado o Cenário 5, Mapa 17.

Quanto à quantificação das classes, seja em termos absolutos (medida de área) ou relativos (em porcentagem), deve-se ter em mente que a representação *raster*, ou seja, baseada em uma superfície contínua e não em dados discretos, é adequada às proposições encontradas na literatura especializada, como já citados Burrough e McDonnell (1998), Moreira (2001), Cereda Junior (2006), entre outros, por não apresentar limites rígidos (ou contatos) entre as classes.

Contudo, como um produto adicional, mas não final para análise, propõe-se a divisão em Classes de Fragilidade Ambiental, com passo de 0,2 unidades, além da quantificação via recursos do SIG da área absoluta e relativa, conforme a Tabela 14.

**Tabela 14 – Classes Temáticas de Fragilidade Ambiental**

Índice Fragilidade	Classe de Fragilidade	Área (em km <sup>2</sup> )	Área (%)
0,0 – 0,2	Muito Fraca	7,7	4,28
0,2 – 0,4	Fraca	75,55	41,97
0,4 – 0,6	Média	84,35	46,86
0,6 – 0,8	Forte	12,00	6,67
0,8 – 1,0	Muito Forte	0,4	0,22

Elaboração do autor

Comparando-se com os resultados obtidos por Cereda Junior (2006), verifica-se que houve uma amenização na Classe Muito Forte, conforme Tabela 15. A explicação está em que a solução adotada era um ORtotal (operador booleano), pois não houve compensação entre as variáveis (*trade-off* 0), não só elevando, como já apresentado anteriormente, mas distorcendo os valores críticos extremos, principalmente do Critério Pedologia e Graus de Proteção do Solo.

**Tabela 15 – Áreas das Classes de Fragilidade**

Classe de Fragilidade	Área MPO (em km <sup>2</sup> )	Área Booleana (Tabela Dupla Entrada) (em km <sup>2</sup> )
Muito Fraca	7,7	0,1
Fraca	75,55	0,3
Média	84,35	44,4
Forte	12,00	15,2
Muito Forte	0,4	120,0

Elaboração do autor

Para levantamento dos resultados obtidos e sua expressão no mundo real, foram realizados trabalhos de campo, os iniciais com fins de reconhecimento e atualização, e os finais com registros fotográficos de diferentes valores de Fragilidade, estes apresentados no Mapa 19, os quais serão chamados de Pontos de Controle Fotográficos, no total de 80. O conjunto de fotos pode ser encontrado no Anexo 2 (disponível em <http://migre.me/4JVkL>), e um mosaico de classes nas fotos apresentados nos Quadros 4, 5, 6, 7 e 8, sendo a Classe de Fragilidade apresentada no primeiro plano.



Mapa 19 – Pontos de Controle Fotográfico

Uma das principais constatações com o campo foi o critério Proteção ao Solo ter sido considerado de maneira explícita no Modelo. Diferentemente da proposta inicial de Ross (1994) onde o Grau de Proteção é uma nuance tabular (Cereda Junior, 2006), com o uso da MPO se concretizou no Mapa Síntese.

Também se pode notar que a Declividade e Pedologia realmente possuem alto grau de controle sobre a Fragilidade Ambiental para a área de estudo, mas não deterministicamente. Diversas áreas com Fragilidade classificada como Média ou Alta precisam de atenção, pois novas ocupações vem ocorrendo, o que pode alterar seu estado.

**Quadro 4 – Mosaico de Classes de Fragilidade Muito Fraca**



**Quadro 5 – Mosaico de Classes de Fragilidade Fraca**

**Quadro 6 – Mosaico de Classes de Fragilidade Média**



**Ponto 6**



**Ponto 23**



**Ponto 35**



**Ponto 43**



**Ponto 59**



**Ponto 71**



**Ponto 4**

**Quadro 7 – Mosaico de Classes de Fragilidade Forte**



**Ponto 2**



**Ponto 22**



**Ponto 30**



**Ponto 58**



**Ponto 76**



**Ponto 80**



**Ponto 19**

**Quadro 8 – Mosaico de Classes de Fragilidade Muito Forte**



## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

*Nada, na natureza, sofre; só suporta. Desse modo, a natureza comporta-se politicamente. Será justo imitá-la de vez em quando.* Agustina Bessa-Luís

Entender o complexo sistema ambiental, suas nuances e, a partir da utilização de dados cartográficos e sistemas computacionais, ter a possibilidade não somente de espacializá-los, mas compreendê-los de maneira integral, não deve ser considerado trivial ou uma simples utilização de software especializado.

Contudo, a facilidade de uso de tal ferramental, ainda causa, às vésperas de 50 anos do início do *Canada Geographic Information System* (CGIS), discussões na Academia. Como exemplo, pode-se citar que algumas empresas de desenvolvimento de Sistemas de Informações Geográficas investem cerca de metade do seu orçamento para estudos de usabilidade, baseados nas teorias da Interação humano-computador, o que leva até mesmo profissionais de áreas afins – como Geografia, Geologia e Engenharias – a afirmações de que a Análise Espacial é um simples jogo de ferramentas.

Se tais procedimentos ainda são criticados dentro destas áreas, para outros profissionais a maior facilidade de uso e acesso, não somente aos programas, mas também aos dados, leva a adoção e utilização em escala, mas em algumas situações, com pouca crítica ou embasamento – cometendo erros básicos, como desconhecer o conceito de Sistemas de Projeção e Referência. Quanto à integração dos dados, o enraizamento das discussões metodológicas, aplicações e críticas em modelos clássicos, advindos da mesa de luz e outras técnicas, é manifesto em artigos e trabalhos acadêmicos.

A Análise Integrada do meio, contudo, deve inicialmente se preocupar com os paradigmas da representação, as variáveis ou critérios envolvidos, e qual sua fundamentação teórica. Para a presente tese, a adoção do modelo de Fragilidade Ambiental, foi o sustentáculo.

Com os resultados obtidos no trabalho de Cereda Junior (2006) e suas conclusões, fez-se necessário o avanço na utilização de técnicas não restritivas (como a álgebra booleana) para o entendimento da complexidade do meio, a partir das variáveis consideradas no modelo de Fragilidade Ambiental, conforme proposta de Ross (1994). A escolha por métodos multicritério como a Combinação Linear Ponderada (CLP) e a Média Ordenada Ponderada (MPO) se deu pela aproximação do embasamento teórico com a aplicação cartográfica, ou seja, são métodos que permitem maior transparência e controle das variáveis para a efetiva concretização dos pressupostos da Cartografia de Síntese.

Os procedimentos foram explanados em tópicos específicos, contudo, deve-se reiterar que o controle do operador MPO para integração, a partir de um conjunto de critérios e pesos, além dos *order weight*, permite a inserção no sistema da inteligência geográfica dos pesquisadores, da população e de técnicos em cada uma das áreas específicas do conhecimento. Assim, considera-se que a adoção de técnicas multicritério não booleanas propiciam ao poder público caminhar rumo à gestão democrática do território. Ao mesmo tempo em que isto permite maior riqueza na modelagem ambiental fica mais evidente a complexidade do rompimento da visão inventarial e dos mapas e técnicas correlatas de simples representações do meio para um Sistema de Tomada de Decisões Geográficas, ou nas palavras de Tomlinson (2003), os SIGs para o planejamento e políticas públicas necessitam de coordenação, colaboração e visão global do problema, sendo a chave para o sucesso o entendimento as objetivos a que se propõe.

A escolha por um método ou outro não deve ser pautada pela disponibilidade de dados ou pacote de software disponível (ou com melhor proposta de valores). A definição clara dos objetivos, paradigma, resultados a serem obtidos e, principalmente, a colaboração de um grupo de profissionais para a definição das variáveis e pesos a serem utilizados no processo de decisão são de fundamental importância.

O modelo de Fragilidade Ambiental proposto por Ross (1994), após seu entendimento, pode ser acrescido de outras variáveis que se considerem importantes. Como sugestão para futuros trabalhos, propõe-se para validação a distância aos cursos d'água; escoamento superficial; em áreas urbanas a classificação em unidades pormenorizadas, como por nível de adensamento; além

da inserção de variáveis socioeconômicas que permitam que a Fragilidade incorpore ações antrópicas de maneira mais clara.

A utilização do software IDRISI e ArcView confirma que as limitações técnicas do início da utilização dos SIGs foram superadas, principalmente no tocante à operação e geração dos resultados, além da documentação técnica bibliográfica do primeiro, que requer para o seu entendimento além do conhecimento de informática, mas da problemática em que se inserem as questões para a operacionalização.

Quanto aos resultados obtidos, principalmente ao se comparar com a aplicação direta e operacional encontrada em Ross (1994), e para a área de estudo Cereda Junior (2006), foi permitida com o uso dos operadores multicritério a diminuição da influência do tema Declividade para o Mapa Síntese final, no qual o processo via Tabela de Dupla Entrada ou Algarismos Arábicos fica evidente o determinismo de tal critério. A hipótese inicial deste trabalho, de que métodos multicritério permitiriam o encontro com a essência teórico-metodológica do mapeamento de Fragilidade Ambiental (conforme definição de Ross, 1994), além de trazer novos olhares e horizontes sobre o uso dos sistemas computacionais, fica confirmada, com resultados satisfatórios.

O método da Média Ordenada Ponderada (MPO) mostrou-se não só bastante adequado às variáveis do Modelo de Fragilidade Ambiental nesta tese utilizado, como provê aos especialistas envolvidos controle sobre o processo de decisão de maneira completa, permitindo a inclusão de novos critérios, sendo responsabilidade destes seu controle. Este é um avanço rumo à utilização de Sistemas de Informações Geográficas não só baseados em velhos paradigmas com nova apresentação visual e ainda pensados como grandes repositórios de mapas, mas sim SIGs com capacidades para prover melhores produtos para a tomada de decisão – esta sempre responsabilidade do corpo especialista. A não disseminação do uso do método MPO pode ser creditado, em parte, à inexistência deste método nos pacotes de softwares (comerciais, gratuitos ou livres), a não ser pela utilização de componentes adicionais.

Mais do que a quantificação em área ou mesmo a precisão de medidas, os produtos cartográficos que são obtidos a partir da visão de Fragilidade Ambiental, com a aplicação de métodos multicritério permitem re(leituras) sobre o objeto de

estudo, podendo integrar novo projetos, atualização e criação de Planos Diretores, entre outros fins de gestão, que visem a Análise Integrada.

Deve-se salientar que um novo componente crítico precisa ser gerido: ao mesmo tempo em que tais métodos permitem maior flexibilidade de maneira a melhorar a integração dos dados, pode trazer distorções caso haja um uso perverso da técnica, como diversos exemplos de manipulações de dados geográficos encontrados<sup>11</sup>. Também, não se trata de um método ou aplicação em detrimento de outra. O modelo booleano é válido para inúmeras aplicações, mas se considera inconsistente para a geração de cenários de tomada de decisões, principalmente em ambientes complexos, como o chamado Ambiental.

---

<sup>11</sup> Recomenda-se a leitura de MONMONIER, M. **How to lie with maps**. Chicago: University of Chicago Press, 1996.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, C.M. **Sustentabilidade: caminho ou utopia?** São Paulo: Annablume, 2006.
- ALMEIDA, J. A. P. Aplicação da Metodologia Sistêmica ao Estudo do Sítio Urbano de Feira de Santana – BA. **Sitientibus**, n. 22, p. 9-26, 2000.
- ALVES, D. S. Sistemas de Informação Geográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 1990. **Anais...** 1990. p.66-78.
- ARCURI, M.E.P. **Planejamento Ambiental através de análise de informações em bases cartográficas:** o caso de estudo da microbacia Santa Eliza, Rio Claro – SP. Dissertação (Mestrado), UNESP – Universidade Estadual Paulista, IGCE, Rio Claro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma: degradação do solo. TERMINOLOGIA. NC 10.703.** 1989.
- BAPTISTA, A. C. **Análise da Paisagem e Identificação de áreas suscetíveis a movimentos de massa na APA Petrópolis - RJ: subsídio ao Planejamento Urbano.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- BARBOSA, F. A. R.; PAULA, J. A.; MONTE-MÓR, R. L. M. A Bacia Hidrográfica como Unidade de Análise e Realidade de Integração Disciplinar. In: PAULA, J. A. (Ed.). **Biodiversidade, população e economia: uma região de mata atlântica.** Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar; ECMVC; PADCT/CIAMB, 1997. p.258-269.
- BARROW, C. J. River basin development planning and management: A critical review. **World Development**, v. 26, n. 1, p. 171-186, 1998. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VC6-3SX6Y97-D/1/f2b9a0e9f5fc60b08b547c6d42f3e730> >.
- BERTALANFFY, L. V. **Teoria geral dos sistemas.** Petrópolis: Vozes, 1977.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo: Editora Ícone, 1990.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, v. 1, n. 13, p. 11-27, 1972.
- BILICH, F.; DASILVA, R. Análise da produção de biodiesel utilizando multicritério. In: I CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BODIESEL, 2006. **Anais...** 2006.
- BITAR, O. Y. A abordagem geotecnogênica: a Geologia de Engenharia no Quinário. In: OLIVEIRA, A. M. S.;BITAR, O. Y., *et al* (Ed.). **Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente.** São Paulo: IPT/ABGE, 1995.

BOLDRINI, C. **Álgebra Linear**. 3ª ed. Editora Harbra, 1986.

BOLÓS y CAPDEVILA, M. **Manual de ciencia del paisaje: teoría, métodos y aplicaciones**. Barcelona: Masson, 1992.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Oxford: Pergamon, 1994.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. CONSTITUIÇÃO: Brasília, DF: Senado 1988.

\_\_\_\_\_. **Estatuto da Cidade**. LEI 10.257: Brasília, DF: 2001.

BURROUGH, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. New York: Oxford University Press, 1986.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998.

BUZAI, G. D.; BAXENDALE, C. A. **Análisis socioespacial con sistemas de información geográfica**, Buenos Aires: Lugar Editorial, 2006

CALIJURI, M. L. Proposta metodológica para geração da carta de fragilidade ambiental utilizando lógica fuzzy e combinação linear ponderada. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007. **Anais...** 2007.

CÂMARA, G. **Anatomia de um SIG**. Fator Gis, n. 4, p. 11-15, jan./mar., 1994.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Apresentação. In: CÂMARA, G.; DAVIES, C., *et al* (Ed.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos Básicos da Ciência da Geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIES, C., *et al* (Ed.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. **Representações Computacionais do Espaço: Um Diálogo entre a Geografia e a Ciência da Geoinformação**. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/epistemologia.pdf>>. 2002. Acesso em 12 de janeiro de 2010.

CARVALHO, C.M.; RIEDEL, P. S. Técnicas de Geoprocessamento aplicadas ao estudo da suscetibilidade a escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão - SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1-8.

CASTILLO-RODRÍGUEZ, M.; LÓPEZ-BLANCO, J.; MUÑOZ-SALINAS, E. A geomorphologic GIS-multivariate analysis approach to delineate environmental units, a case study of La Malinche volcano (central México). **Applied Geography**. Volume 30, Issue 4, Dezembro de 2010, páginas 629-638. 2010.

CEREDA JUNIOR, A. **Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Ribeirão do Monjolinho - São Carlos - SP - utilizando ferramentas de geoprocessamento.** 2006. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, UFSCar, São Carlos.

CEREDA JUNIOR, A.; LORANDI, R.; FAZZARI, C. S. Mapeamento de risco à Erosão Acelerada com uso de técnica fuzzy para diretrizes de ordenamento territorial - o caso de Descalvado - SP. **Revista Geotecnia**, v. no prelo, 2010.

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A. Carta de Fragilidade Ambiental utilizando Sistemas de Suporte à Decisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, XI, 2005a. São Paulo. **Anais...** XI: Departamento de Geografia, FFLCH-USP, 2005.

\_\_\_\_\_. A Metodologia Ecodinâmica no Planejamento Urbano. In: I CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO REGIONAL, I., SUSTENTÁVEL,, 2005b. São Carlos. **Anais...** USP, 2005a.

CEREDA JUNIOR, A.; RÖHM, S. A.; LOLLO, J. A. Mapeamento Ecodinâmico da Bacia do Rio Monjolinho - São Carlos - SP - Implicações Técnicas e de Planejamento. In: CONGRESSO LUSO BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, II., 2006. Braga. **Anais...** Braga - Portugal: Universidade do Minho, 2006.

CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. **Modelos físicos e de informação em Geografia.** Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos / EDUSP, 1975.

CHORLEY, R. J.; SCHUMM, S. A.; SUGDEN, D. E. **Geomorphology.** Cambridge: Methuen, 1984.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de sistemas em Geografia.** São Paulo: Editora Hucitec, 1979.

\_\_\_\_\_. **Geomorfologia.** São Paulo: Edgar Blücher, 1982.

\_\_\_\_\_. A aplicação da abordagem em sistemas na Geografia Física. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, p. 21-36, 1990.

\_\_\_\_\_. **Modelagem de Sistemas Ambientais.** São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1999.

CORSEUIL, C. W.; CAMPOS, S. Análise de adequação do uso das terras por meio de técnicas de geoprocessamento e de análise de multicritérios. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007. **Anais...** 2007.

COSTA, M. D. S. **Mobilidade Urbana Sustentável: um estudo comparativo e as bases de um sistema de gestão para Brasil e Portugal.** 2003. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos.

COX, E. **The fuzzy systems handbook: a practitioner's guide to building, using and maintaining fuzzy Systems.** London: Academic Press, 1994.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T.; BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico- Econômico e ao Ordenamento Territorial.** São José dos Campos: INPE, 2000.

CUNHA, E. R. S. P.; OLIVEIRA, M. V.; SILVA, F. R. M. Utilização da técnica de processo analítico hierárquico (AHP) na avaliação da "favorabilidade" para a prospecção mineral de cromo na região de Pinheiros Altos, município de Piranga, MG, Brasil. **Rev. Esc. Minas** v. 54, n. 2, 2001. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672001000200009&lng=in&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672001000200009&lng=in&nrm=iso)>.

DALMAS, F. B. **Geoprocessamento aplicado à Gestão de Resíduos Sólidos na UGRHI-11 - Ribeira do Iguape e Litoral Sul.** 2008. Dissertação (Mestrado) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.

DE PABLO, C. L.; PINEDA, F. D. Análisis multivariante del territorio para su cartografía ecológica. Ensayo preliminar en la provincia de Madrid Simpósio de Recursos Hídricos. **Anales de Geografía de la Universidad Complutense**, Madrid, n. 5, p. 236-260, 2005 1985.

DIAS, J. **As potencialidades paisagísticas de uma região cárstica: o exemplo de Bonito, MS.** 1998. Dissertação (Mestrado) Departamento de Geografia, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da Fragilidade Ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** v. 10, n. 1, p. 175-181, 2006.

EASTMAN, J. R. Decision Support: Decision Strategy Analysis. In: CLARK UNIVERSITY (Ed.). **IDRISI Andes Guide to GIS and Image Processing.** Worcester: Clark Labs, 2006.

EASTMAN, J. R.; JIANG, H.; TOLEDANO, J. Multi-criteria and Multi-Objective decision Making for Land Allocation Using GIS. In: BEINAT, E. e NIJAKAMP, P. (Ed.). **Multicriteria Analysis for Land-Use Management.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p.227-251, 1988.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ESRI. **ArcGIS 10 Desktop Help.** Disponível em <<http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html>>. 2010. Acesso em 15 de novembro de 2010.

FANG, J. H. *fuzzy logic and geology.* **Geotimes - News and Trends in Geoscience**, v. 42, p. 23-26, 1997.

FAO. Aspects of FAOs policies, programmes, budget and activities aimed at contributing to sustainable development. In: (Ed.). **Document to the ninety-fourth Session of the FAO Council**. Rome: FAO, CL94/6, 1988.

FERREIRA, J. C.; ROCHA, J.; TENEDÓRIO, J. A.; SOUZA, P. M. Ensaio de Delimitação de Corredores Verdes na Área Metropolitana de Lisboa: Integração de dados *fuzzy* através da análise multi-critério. In: ENCONTRO DE UTILIZADORES DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, VIII., 2004. Oeiras. **Anais...** Oeiras - Portugal, 2004.

FIERZ, M. de S. M. **As abordagens sistêmica e do equilíbrio dinâmico na análise da fragilidade ambiental do litoral do Estado de São Paulo**: contribuição à geomorfologia das planícies costeiras. 2008. Tese (Doutorado) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo São Paulo.

FIGUEIREDO, G. C.; BRAGA, A. L.; ELOI, F. H.; CARVALHO, A. S.; CALIJURI, P. D. M. L. Caracterização da Fragilidade Ambiental Utilizando Sistema de Informações Geográficas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 2006. UFSC Florianópolis.

FISCHER, M. M.; NIJAKAMP, P. Design and Use of Geographic Information Systems and Spatial Models. In: (Ed.). **Geographic Information Systems, Spatial Modelling and Policy Evaluation**. Springer Verlag: Eds. Berlim, 1993.

GARCIAS, C. M. As Questões Ambientais Urbanas. **Revista Acadêmica**, v. 2, n. 8, p. 3-8, 1997.

GEORGE, P. **Os Métodos da Geografia**. São Paulo: Difusão Européia do Livro, 1972.

GOMES, J. M.; VELHO, L. **Computação Visual: Imagens**. Rio de Janeiro: SBM, 1995.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. Rio de Janeiro: Thomson, 2004. p. 168.

GONCALVES, A.R.L. **Geologia Ambiental da Área de São Carlos**. Tese (Doutoramento), EESC-USP, São Carlos, 1987.

GREGORY, K. J. **A natureza da Geografia Física**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1992.

GRINOVER, L. O Planejamento Físico-Territorial e a Dimensão Ambiental. **Cadernos FUNDAP**, v. 16, n. 9, p. 25-32, 1989.

GROSTEIN, M. D.; JACOBI, P. Cidades Sustentáveis. **Revista Debates Sócio-ambientais**, n. 9, p. 26, 1998.

HENDRIX, W. G.; FABOS, J. G.; PRICE, J. E. An ecological approach to landscape planning using geographic information system technology. **Landscape and Urban Planning**, n. 15, 1988.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.

HOUGH, M. **Naturaleza y ciudad: planificación urbana y procesos ecológicos**. Barcelona: G. Gili, 1998.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 5 de dezembro de 2010.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Manual do SPRING. São José dos Campos: Departamento de Processamento de Imagens. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>> Acesso em 15 de novembro de 2010.

JUNGES, L. C. D. **Introdução à lógica fuzzy**. Apostila do autor. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Automação de Sistemas Industriais Inteligentes. 2006.

LACOSTE, Y. **A Geografia - isso serve, em primeiro lugar para fazer a guerra**. Campinas: Papirus, 1988.

LANNA, A. E. L. **Gerenciamento de bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis, 1995.

LEYTON, L. A. G. **Aplicación del Análisis Multicriterio en la Evaluación de Impactos Ambientales**. 2004. Tese (Doutorado) Programa de Doctorado de Ingeniería Ambiental, Barcelona, Espanha.

LIBAULT, A. **Os quatro níveis da pesquisa geográfica**. Métodos em Questão. (1). São Paulo: IGEO/USP, 1971.

LIPORACI, S. **Mapeamento geológico-geotécnico visando estudos sobre a erosão/assoreamento e potencial de escoamento superficial da bacia do monjolinho em São Carlos-SP**. 2003. Tese (Pós-Doutorado) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. **Geographic Information Systems and Science**. Third Edition. Chinchester: John Wiley & Sons, 2010.

MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley, 1999. 362p.

\_\_\_\_\_. On the use of Weighted Linear Combination method in GIS: common and best practice approaches. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 1, p. 5-22, 2000.

\_\_\_\_\_. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004.

MARTINELLI, M. A Cartografia de Síntese na Geografia Física. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, XI., 2005. São Paulo. **Anais...** São Paulo: Departamento de Geografia, FFLCH-USP, 2005.

MARTINELLI, M.; PEDROTTI, F. A Cartografia das Unidades de Paisagem: Questões Metodológicas. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 1, n. 14, 2001.

MARTINS, S. V. Monitoramento da arborização de ruas de Belo Horizonte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARBORIZAÇÃO URBANA, 1994. **Anais...** 1994. p.421-430.

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. GIS para Estudos Ambientais. In: CÂMARA, G.; DAVIES, C., *et al* (Ed.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

MEIRELLES, M. S. P. **Análise integrada do ambiente através de Geoprocessamento – uma proposta metodológica para elaboração de zoneamentos**. 1997. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MENDONÇA, F. D. A.; VENTURI, L. A. B. Geografia e metodologia científica. In: SIMPÓSIO DE GEOMORFOLOGIA, Revista Geosul, 1998. Florianópolis.

MONTEIRO, C. A. F. Derivações antropogênicas dos Geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas: perspectivas urbanas e agrárias do problema da elaboração de modelos de avaliação. In: SIMPÓSIO SOBRE A COMUNIDADE VEGETAL COMO UNIDADE BIOLÓGICA, T. E. E., 1978. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1978.

MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F. S.; LUCHIARI, A. O Geoprocessamento como Subsídio ao Estudo da Fragilidade Ambiental. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2003. **Anais...** 2003.

MOREIRA, F. R. S. **Uso e Avaliação de Técnicas de Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral Aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas**. 2001. Dissertação (Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

NASCIMENTO, M. D. do. **Fragilidade Ambiental e expansão urbana da Região administrativa nordeste da sede do município de Santa Maria - RS**. 2009. Dissertação (Mestrado). Pós-Graduação em Geografia e Geociências, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria - RS.

OLIVA, J. **Espaço e modernidade**: temas da geografia do Brasil. São Paulo: Atual, 1999.

OLIVEIRA, C. H. de, **Planejamento ambiental na cidade de São Carlos (SP) com ênfase nas áreas públicas e áreas verdes**: diagnóstico e propostas. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais, São Carlos, 1996.

ONU. **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1987.

\_\_\_\_\_. **Agenda 21 Global. CNUMAD - Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Rio de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente 1992.

OPENSHAW, S.; OPENSHAW, C. **Artificial Intelligence in Geography**. Chichester: John Wiley, 1997.

PÉRICO, E.; CEMIN, G. Planejamento do uso do solo em ambiente SIG: alocação de um distrito industrial no município de Lajeado, RS, Brasil. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 4, n. 1, 2006. Disponível em: <<http://cecemca.rc.unesp.br/ojs/index.php/estgeo/article/view/214>>.

POLETTE, M.; DIEHL, F. L.; DIEHL, F. P.; SCHETTINI, C. A.; SPERB, R. M.; KLEIN, A. H. F. Gerenciamento costeiro integrado e gerenciamento de recursos hídricos: como compatibilizar tal desafio. In: MUNOZ, H. R. (Ed.). **Interfaces da Gestão de Recursos Hídricos**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 2000.

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos - SP, com auxílio de geoprocessamento**. Tese (Doutorado), EESC, USP, São Carlos - SP, 2006

PROCHNOW, M. C. R. **Análise ambiental da sub-bacia do rio Piracicaba: Subsídios ao seu planejamento e manejo**. 1990. Tese (Doutorado) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

RAMOS R. A. R.; MENDES, J. F.G. Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: O caso de Valença. **Engenharia Civil**, n. 10, 2001

RIBAS, O. **A sustentabilidade das cidades: os instrumentos da gestão urbana e a construção da qualidade urbana**. 2002. Tese (Doutoramento) CDS, Universidade de Brasília, Brasília.

RODRIGUES, C. A. Teoria Geossistêmica e sua contribuição aos estudos Geográficos e Ambientais. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 14, p. 69-77, 2001.

RODRIGUES, F.; CARVALHO, O. Bacias Hidrográficas como Unidade de Planejamento e Gestão Geoambiental: Uma Proposta Metodológica. **Revista Fluminense de Geografia**, n. 2, 2005. Disponível em: <[http://www.agbniteroi.org.br/Revista2/rfg2\\_texto4.htm](http://www.agbniteroi.org.br/Revista2/rfg2_texto4.htm)>.



RODRIGUEZ, J. M. M.; VICENTE DA SILVA, E. A classificação das paisagens a partir de uma visão geossistêmica. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**, n. 01, 2002.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.

\_\_\_\_\_. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 1, n. 8, p. 3-74, 1994.

ROSS, J. L. S.; PRETTE, M. Recursos hídricos e bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. **Revista do Departamento de Geografia da FFLCH – USP**, n. 12, p. 89-121, 1998.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Rio de Janeiro: Makron Books do Brasil Editora Ltda. e Editora McGraw-Hill do Brasil, 1991.

SACHS, I. **Espaços, Tempos e Estratégias do Desenvolvimento**. São Paulo: Ed. Vértice, 1986.

SANTOS, R. F. D. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2004.

SANTOS, R. F.; CARVALHAIS, H. B.; PIRES, F. Planejamento Ambiental e Sistemas de Informações Geográficas. **Caderno de Informações Georreferenciadas**, v. 1, n. 2, 1997.

SCHIER, R. A. Trajetórias do Conceito de Paisagem na Geografia. **RA'E GA**, n. 7, p. 79-85, 2003.

SILVA, J. X.; SOUZA, M. J. L. **Análise Ambiental**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1988.

SILVA, S. F. **Zoneamento Geoambiental com Auxílio de Lógica fuzzy e proposta de um Geoindicador para Caracterização do Meio Físico da Bacia do Rio do Peixe**. 2005. Doutorado (Tese) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH: EUSP, 1993.

SOTCHAVA, V. B. O estudo de Geossistemas. **Métodos em Questão**, São Paulo, n. 16, 1977.

\_\_\_\_\_. Por uma teoria de classificação de Geossistemas de vida terrestre. **Biogeografia**, v. 14, 1978.

SOUZA, N. M. **Contribuição à cartografia geotécnica com uso de geoprocessamento: sensoriamento remoto e sistemas de informações**

**geográficas.** 1994. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, USP - Universidade de São Paulo, São Carlos.

SPÖRL, C. **Análise da Fragilidade Ambiental Relevo–Solo com Aplicação de três Modelos Alternativos nas Altas Bacias do Rio Jaguari-mirim, Ribeirão do Quartel e Ribeirão da Prata.** 2001. Dissertação (Mestrado) FFLCH - Departamento de Geografia, USP - Universidade de São Paulo, São Paulo.

STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, F. A.; PONÇANO, E. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de Erosão Laminar, Natural e Antrópica na Bacia do Peixe-Parapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, 1987.

TAUK, S. M. **Análise Ambiental: uma visão multidisciplinar.** São Paulo: Editora da UNESP, 1995.

THOMAZ, E. L. Geomorfologia Ambiental e Agricultura Familiar na Bacia do Rio Iratim - Guarapuava - PR. **RA'E GA**, n. 4, p. 37-48, 2000.

TOMLINSON, R. **Thinking About GIS: Geographic Information System Planning for Managers.** Redlands: ESRI Press, 2003.

TOMMASI, L. R. **Estudo de impacto ambiental.** São Paulo: CETESB/Terragraph Artes e Informática, 1994.

TOREZAN, F. E. **Proposta metodológica para subsidiar a determinação do grau de impacto ambiental em empreendimentos minerários na região de Descalvado e Analândia.** 2005. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

TRICART, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977.

\_\_\_\_\_. **Paisagem e Ecologia: Inter-Fácies.** São José do Rio Preto: UNESP, 1979.

\_\_\_\_\_. O campo na dialética da Geografia. In: GUSMÃO PINTO, J. M. (Ed.). **Reflexões sobre a Geografia.** São Paulo: AGB, 1980. p.97-119.

TROPPIAIR, H. Ecossistemas e Geossistemas do Estado de São Paulo. **Boletim de Geografia Teórica**, v. 13, n. 25, p. 27-36, 1983.

TROPPIAIR, H. **Biogeografia e Meio Ambiente.** Rio Claro: Graff-Set, 1987.

TUAN, Y.-F. **Topofilia: Um Estudo da Percepção, Atitudes e Valores de Meio Ambiente.** São Paulo: Difel/Difusão Editorial S/A, 1980.

VALENTE, R. D. O. A.; VETTORAZZI, C. A. Comparação entre métodos de avaliação multicriterial, em ambiente SIG, para a conservação e a preservação florestal. **Scientia Forestalis**, n. 69, 2005.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação Multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. 2006. Tese (Livre Docência) Departamento de Engenharia Rural, USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba.

VILAS BOAS, C. L. D. Análise da aplicação de métodos multicritérios de decisão na gestão de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS, XVI., 2005. João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2005.

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

WEBER, E.; HASENACK, H. **Avaliação de Áreas para Instalação de Aterro Sanitário Através de Análise em SIG com Classificação Contínua dos Dados**. Canoas – RS: Universidade Luterana do Brasil, 2001.

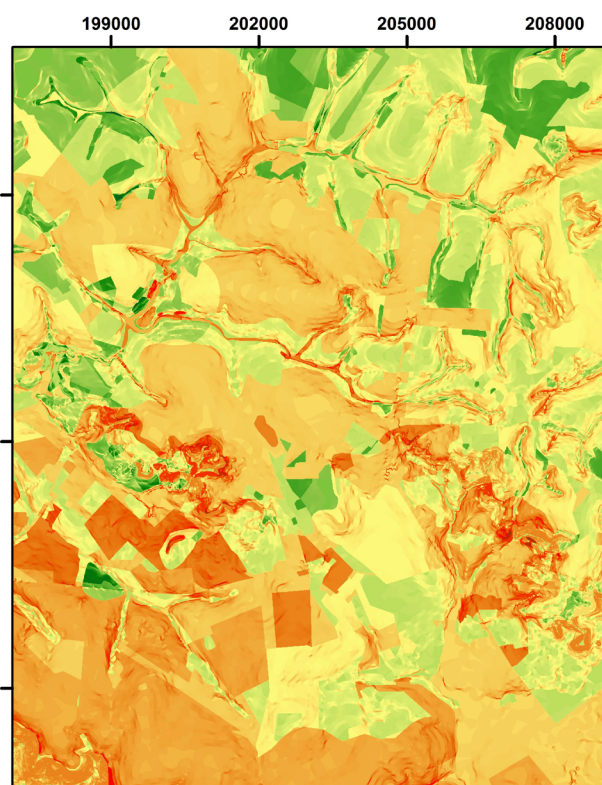
YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi-criteria decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 18, n. 1, p. 183-190, 1988.

ZADEH, L. A. *fuzzy sets*. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

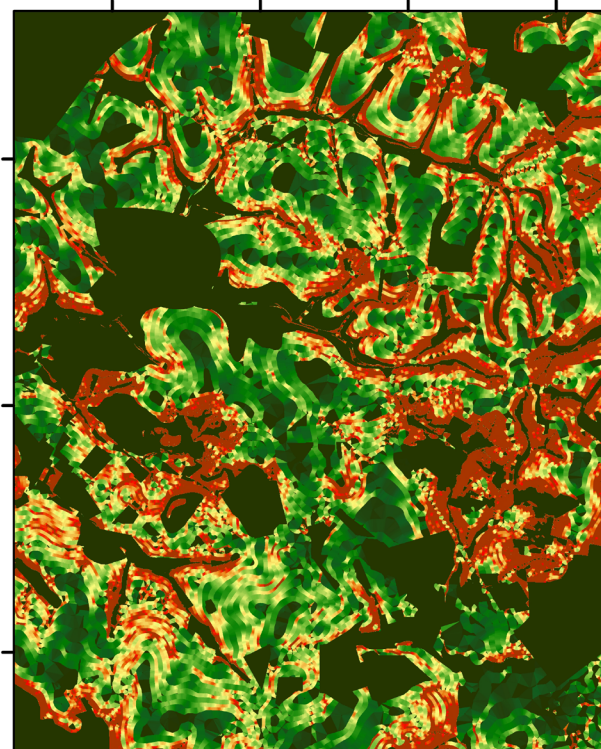
ZUQUETE, L. V.; PEJON, O. J.; GANDOLFI, N.; RODRIGUES, J. E. Mapeamento Geotécnico: Parte 1 - Atributos e Procedimentos Básicos para a Elaboração de Mapas e Cartas. **Geociências**, n. 16, p. 491-524, 1997.

**ANEXOS**

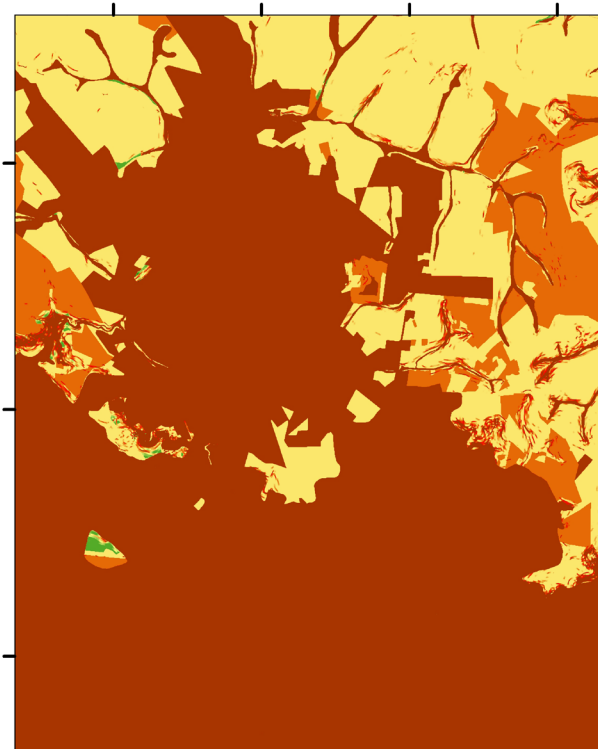
# Síntese de Cenários - CLP e MPO



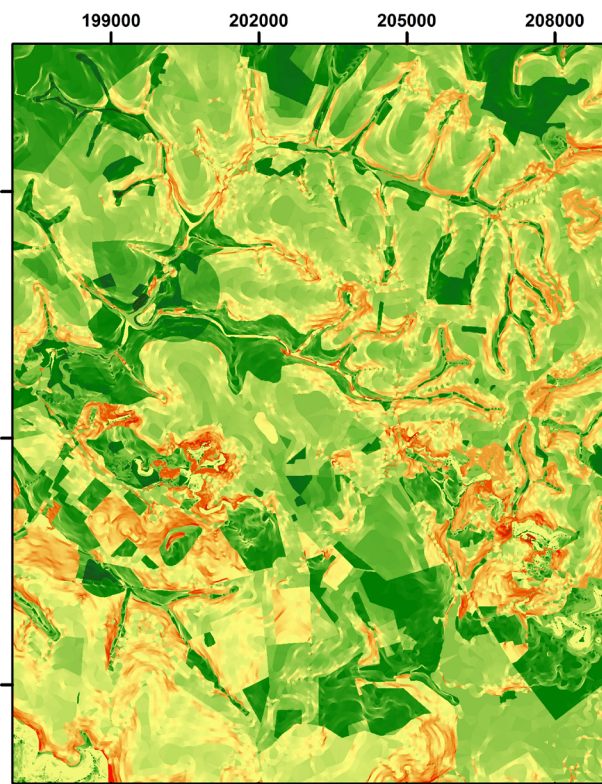
CLP (Mapa 12)



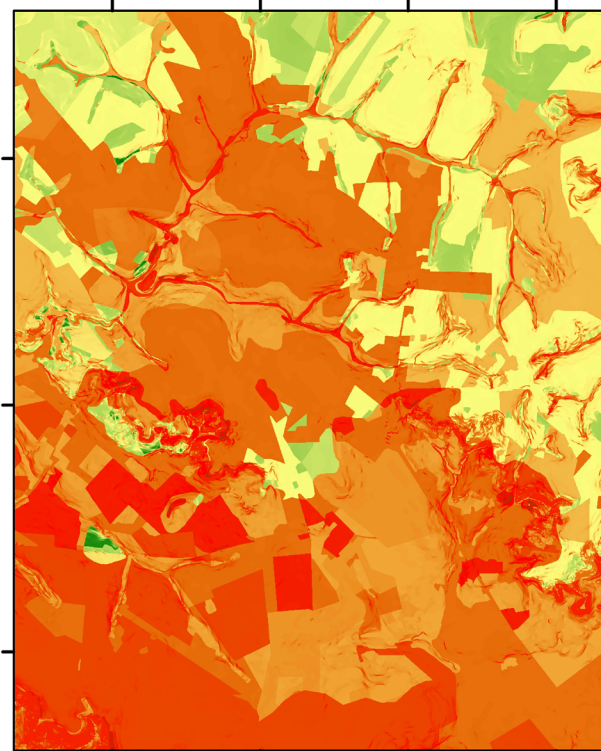
Cenário 1 - AND (Mapa 13)



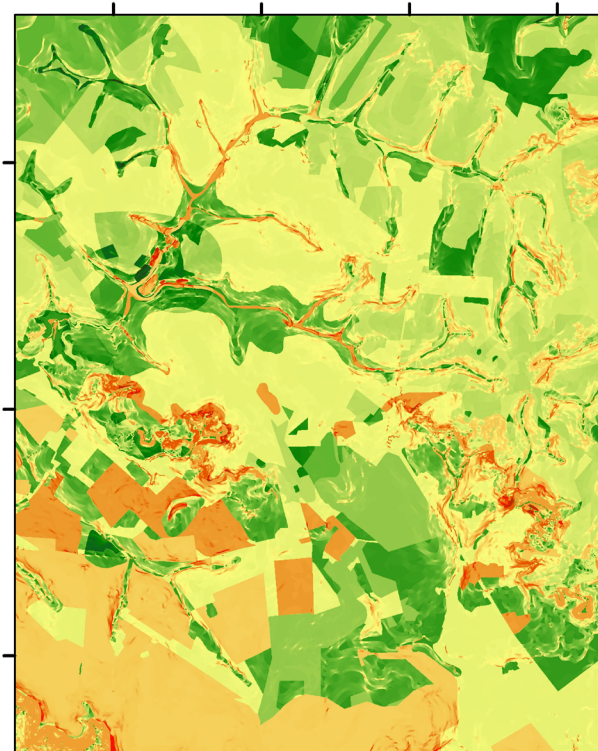
Cenário 2 - OR (Mapa 14)



Cenário 3 (Mapa 15)



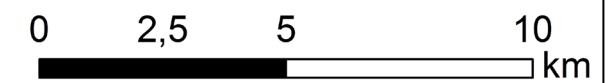
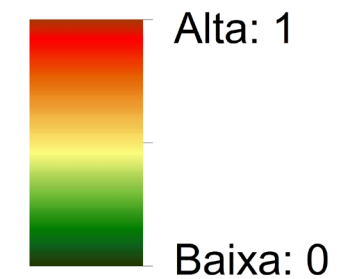
Cenário 4 (Mapa 16)



Cenário 5 (Mapa 17)



## Fragilidade Ambiental



UTM Fuso 23S/Córrego Alegre

Fontes e Referências: consultar mapas base  
Elaboração: Abimael Cereda Junior, 2010