

Ministério da Educação e Cultura  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas

## TESE DE DOUTORADO

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA A  
OTIMIZAÇÃO DE TRAÇADOS DE OBRAS DE ENGENHARIA CIVIL:  
**O caso do sistema de defesa contra inundações  
da cidade de Resistencia, Argentina**

**JORGE VÍCTOR PILAR**

**Orientador: Dr. Antonio Eduardo Leão Lanna**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre, setembro de 2003

Prometo usar as minhas faculdades críticas.  
Prometo desenvolver minha independência de pensamento.  
Prometo educar-me de modo a poder formar as minhas próprias opiniões.

Thomas Jefferson  
Cientista e democrata

A Marisa, meu presente de felicidade.  
A Josefina, meu futuro de esperança.

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	viii
Resumo .....	x
Abstract .....	xi
Lista de figuras .....	xii
Lista de Tabelas .....	xv
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Organização do trabalho .....	5
2 A ÁREA ESTUDADA .....	6
2.1. Descrição geral da área estudada .....	6
2.2. Caracterização ambiental .....	8
2.3. As enchentes ribeirinhas na AMGR .....	9
2.4. As estratégias de defesa contra as enchentes do rio Paraná .....	13
2.5. Dados disponíveis .....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
3.1. Introdução .....	16
3.2. Problemas de caminhos de mínimo custo .....	16
3.2.1. A necessidade de traçados ótimos .....	16
3.2.2. Os caminhos de mínimo custo .....	17
3.2.3. Os caminhos de mínimo custo na literatura técnica .....	19
3.2.4. Caminhos de mínimo custo em ambiente vetorial .....	21
3.2.5. Caminhos de mínimo custo em ambiente raster .....	25
3.3. O paradigma multiobjetivo .....	29

3.3.1.	O processo de tomar decisões e a otimização multiobjetivo .....	29
3.3.2.	Problemas semânticos: a necessidade de um vocabulário comum .....	31
3.3.3.	Desde a ótica da Teoria da Decisão .....	33
3.3.4.	O enfoque normativo .....	34
3.3.5.	A institucionalização do planejamento multiobjetivo dos recursos hídricos .....	36
3.3.6.	Métodos de otimização multiobjetivo/multicritério .....	36
	a) Técnicas que geram um conjunto de soluções não dominadas .....	37
	b) Técnicas que incorporam preferências a priori dos decisores .....	38
	c) Técnicas que utilizam uma articulação progressiva de preferências .....	40
	d) Técnicas baseadas em “distâncias” .....	41
3.3.7.	Reflexões sobre os métodos multiobjetivo/multicritério..	42
3.3.8.	Os métodos empregados neste trabalho .....	43
	i. O Método da Análise Hierárquica (MAH) .....	43
	ii. A Programação de Compromisso .....	46
3.4.	Conceitos básicos da teoria de conjuntos difusos .....	47
3.5.	A abordagem conjunta: caminhos de mínimo custo, otimização multiobjetivo e a teoria de conjutos difusos ...	49
3.5.1.	Limitações dos métodos de cálculo de caminhos de mínimo custo .....	49
3.5.2.	A abordagem conjunta .....	49
4	METODOLOGIA .....	51
4.1.	Considerações gerais .....	51
4.2.	Mapas de atrito .....	52
4.2.1.	Mapa de atrito econômico .....	53
4.2.2.	Mapa de atrito ambiental .....	54
4.2.3.	Mapa de atrito político .....	55
4.3.	Mapas de mínimo custo .....	56
4.3.1.	Traçados de menor custo econômico e ambiental .....	56

4.3.2.	Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo/multicritério .....	57
	i. Aplicação do Método da Análise Hierárquica (MAH)	57
	ii. Aplicação do método da Programação de Compromisso .....	62
4.3.3.	Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo-multicritério com relaxamento difuso .....	67
4.3.4.	Influência da discretização espacial da informação .....	68
5	APLICAÇÃO .....	70
5.1.	Desenvolvimento do trabalho .....	70
5.2.	Preparação dos dados e dos mapas de base .....	71
5.2.1.	Dados hidrológicos .....	71
5.2.2.	Modelo Numérico do Terreno (MNT) .....	71
5.2.3.	Mapa do uso do solo .....	72
5.3.	Mapas de atrito .....	73
5.3.1.	Os atributos ou critérios adotados .....	74
5.3.2.	Mapa de atrito econômico .....	75
5.3.3.	Mapa de atrito ambiental .....	76
5.3.4.	Mapa de atrito político .....	77
5.4.	Mapas de mínimo custo .....	79
5.4.1.	Traçados de menor custo econômico e ambiental .....	79
5.4.2.	Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo/multicritério .....	80
	i. Aplicação do Método da Análise Hierárquica .....	80
	ii. Aplicação do método da Programação de Compromisso .....	83
5.4.3.	Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo-multicritério com relaxamento difuso .....	86
5.4.4.	Verificação da influência da discretização espacial da informação .....	91
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	93
6.1.	Análise dos dados .....	93
6.2.	Comparação dos resultados .....	96
6.3.	Discussão dos resultados .....	100

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	102
7.1. Conclusões .....	102
7.2. Recomendações .....	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	108

# AGRADECIMENTOS

Desejo expressar minha imensa gratidão ao Brasil, que nos acolheu, a minha esposa e a mim, como se fôssemos verdadeiros filhos deste belo país. A Rio Grande do Sul, além de meu agradecimento, meu carinho mais sincero; hoje eu me sinto gaúcho por adoção.

À CAPES e à Universidad Nacional del Nordeste (Argentina), por terem financiado diferentes etapas desta pesquisa.

Ao IPH, por tudo o que me deu e por as portas que se me abriram e abrirão pelo simples fato de ser aluno (e em breve ex-aluno) de tão prestigiosa instituição. E desejo realizar este agradecimento nas pessoas dos professores Lanna, Tucci e Clarke, que com seus exemplos de vida, como pesquisadores e como professores me inspiraram sempre e me motivaram a ingressar ao Instituto, sem esquecer dos professores Joel, Beatriz, André, Carlos André, Paulo e Alejandro.

Aos meus condiscípulos e amigos Walter Collischonn, Marcus, Walter Vianna, João Viegas, Flávio, James, Sergio Jardim, Hansen, Adolfo e, especialmente Ruti e Daniel, que não apenas me hospedaram inúmeras vezes, senão que me fizeram sentir verdadeiramente em casa, embora geograficamente longe dela.

Aos meus amigos e colegas de trabalho do Departamento de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidad Nacional del Nordeste (Argentina), na pessoa do seu atual Diretor, o Engenheiro Néstor Romero.

Sempre lembrarei do pessoal administrativo do IPH, especialmente a Nadir - que em todo momento facilitou a minha vida- e às pessoas que trabalham na Biblioteca do IPH, especialmente às eficientíssimas Jussaras, que me orientaram e facilitaram a fase de revisão desta pesquisa.

Um agradecimento muito especial ao Professor Lanna, meu orientador, que com intervenções às vezes mínimas e breves conseguia colocar no trilho certo meu trabalho.

A meus pais, minha avó e meus irmãos, que me apoiaram e incentivaram sempre. E muito, mas muito especialmente a Marisa, minha amada companheira e a

Josefina, nossa pequena filha, que sempre estiveram ao meu lado, me motivando, acima de tudo nas horas em que as idéias não fluíam com a abundância desejada.

Para todos vocês, minha sincera, enorme e eterna gratidão.

MUITO OBRIGADO!

## RESUMO

O traçado de obras com características lineares num espaço geográfico tem, em princípio, um número muito grande de soluções. A seleção de traçados mais convenientes é hoje abordada pela Pesquisa Operacional por meio da Programação Dinâmica tradicional e das técnicas para resolver o problema conhecido como least-cost-path, (caminho de mínimo custo). Por sua vez, o planejamento de espaços geográficos é feito com o auxílio de técnicas de SIG (sistemas de informação geográfica).

O estudo algorítmico dos caminhos de mínimo custo não é novidade e até os programas comerciais para SIG mais utilizados têm incorporado comandos que, com certas limitações, resolvem esse problema.

Mas, seja qual for a abordagem, sempre é preciso conhecer a priori a função-objetivo (FO), e isto não é tarefa fácil, pois devem ser conjugados objetivos de satisfação de necessidades sociais, políticas, ambientais e econômicas, o que gera um verdadeiro problema de otimização multiobjetivo e multicritério.

Este trabalho teve como foco principal elaborar um modelo de decisão para ajudar na formulação da FO, adotando o paradigma multiobjetivo/multicritério, explorando inclusive o relaxamento difuso de pareceres dos decisores.

Foram utilizadas apenas ferramentas computacionais (software e hardware) simples, de ampla difusão entre os engenheiros e de baixo custo, como a planilha de cálculo Excel e o programa Idrisi 32, procurando explorar suas aptidões e limitações, sem recorrer à elaboração e/ou utilização de códigos computacionais próprios, sobre os quais muitas pessoas sentem receios até não serem testados suficientemente.

Foi obtido um sistema de apoio à decisão eficaz e de fácil utilização e sua possibilidade de aplicação foi testada na definição do traçado ótimo de parte da defesa norte da cidade de Resistencia (Argentina).

# ABSTRACT

Works' layout with lineal characteristics in a geographical space has a large number of solutions. The more convenient layout selection is actually approached for the Operational Research through the traditional Dynamic Programming and the techniques to solve the well-known problem as least-cost-path. At the same time, the planning of geographical spaces is carried out with the GIS (Geographical Information Systems) aid.

The algorithmic study of the minimum cost paths is not new and even the most used GIS commercial programs have incorporated commands which, with certain limitations solve the problem.

However, it is always necessary to previously know the Objective-Function (OF), and this is not easy task, because objectives of social, political, environmental and economic needs must be conjugated, which generates a real problem of multi-objective and multi-criterion optimization.

This work had as main focus the OF formulation, adopting the multiobjective/multicriterion paradigm, exploring even the fuzzy relax of the decision views.

Only simple computing tools (software and hardware) were used, which are widely known among engineers, and they are not expensive, like Excel worksheet and the Idrisi 32 program, exploring their aptitudes and limitations, without using the elaboration or/and the use of computation codes, about with many people have mistrust until they are not checked enough.

An efficient support decision aid and of easy use was the result, and the verification of its applicability was verified in the definition of the optimum layout of the north defense of Resistencia city (Argentina).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Área metropolitana do Grande Resistencia .....	6
Figura 2.2	Potencial afetação da cidade segundo a importância da enchente ...	7
Figura 2.3	Largura do vale do rio Paraná .....	10
Figura 2.4	Imagem da área estudada .....	14
Figura 3.1	Mapa simplificado das ruas de uma cidade .....	22
Figura 3.2	Detalhe dos trechos finais do percurso de A até B no mapa da cidade .....	23
Figura 3.3	Novo detalhe dos trechos finais do percurso de A até B .....	24
Figura 3.4	Caminho mais rápido para ir de A até B .....	24
Figura 3.5	Janela de 3 x 3 células sobre a qual é realizado o processo de cálculo .....	26
Figura 3.6	Esquema do processo de cálculo numa iteração .....	28
Figura 3.7	Células com o custo acumulado definido ao final da iteração “k” .....	28
Figura 3.8	Matriz das comparações paritárias entre alternativas .....	44
Figura 3.9	Interpretação da matriz de comparações paritárias .....	44
Figura 4.1	Patamares de indiferença para o aspecto econômico .....	54
Figura 4.2	Patamares de indiferença para o aspecto político .....	56
Figura 4.3	Comparações paritárias entre os aspectos considerados .....	59
Figura 4.4	Deformação do espaço de decisão .....	63
Figura 4.5	Diferença entre os conceitos “ficar perto de” e “ficar longe de” .....	65
Figura 4.6	Patamares de indiferença para o conceito “ficar perto” do ponto ideal .....	66
Figura 4.7	Patamares de indiferença para o conceito “ficar longe” do ponto anti-ideal .....	66
Figura 4.8	Caracterização difusa da relação “ $a_{ij}$ ” .....	68
Figura 5.1	Modelo Numérico do Terreno .....	72
Figura 5.2	Classificação do uso do solo .....	73
Figura 5.3	Mapa de atrito econômico .....	76
Figura 5.4	Mapa de atrito ambiental .....	77
Figura 5.5	Mapa de atrito político .....	78

Figura 5.6	Traçado de mínimo custo econômico .....	79
Figura 5.7	Traçado de mínimo custo ambiental .....	80
Figura 5.8	Comparações paritárias entre os aspectos econômico, ambiental e político .....	81
Figura 5.9	Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH .....	82
Figura 5.10	Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal .....	84
Figura 5.11	Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti-ideal ..	85
Figura 5.12	Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal .....	85
Figura 5.13	Influência na decisão dos aspectos, aplicando o relaxamento difuso	86
Figura 5.14	Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH e o limite inferior do relaxamento difuso .....	87
Figura 5.15	Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH e o limite superior do relaxamento difuso .....	87
Figura 5.16	Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal segundo o limite inferior do relaxamento difuso .....	88
Figura 5.17	Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal segundo o limite superior do relaxamento difuso .....	88
Figura 5.18	Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti-ideal segundo o limite inferior do relaxamento difuso .....	89
Figura 5.19	Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti-ideal segundo o limite superior do relaxamento difuso .....	89
Figura 5.20	Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal, para o limite difuso inferior	90
Figura 5.21	Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal, para o limite difuso superior .....	90
Figura 5.22	Traçado de mínimo custo econômico, calculado com base em pixels de 60m x 60m .....	91
Figura 5.23	Traçado de mínimo custo ambiental, calculado com base em pixels de 60m x 60m .....	92
Figura 6.1	Histograma do mapa de atrito econômico .....	94
Figura 6.2	Histograma do mapa de atrito ambiental .....	94
Figura 6.3	Histograma do mapa de atrito econômico com discretização 60m x 60m .....	95

Figura 6.4	Histograma do mapa de atrito ambiental com discretização 60m x 60m .....	95
Figura 6.5	Comparação espacial dos resultados das 16 variantes .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características hidrológicas do rio Paraná na latitude da AMGR .....	10
Tabela 2.2	Principais enchentes desde 1935 .....	11
Tabela 2.3	Frequência de elevações do rio Paraná em Porto Barranqueras .....	12
Tabela 5.1	Pontuação adotada para cada uso do solo .....	77
Tabela 6.1	Comparações entre os resultados .....	98

# 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

---

*A primeira, a mais perfeita de todas as leis é a lei da necessidade.*

*Bottach*

## 1.1. Introdução

O planejamento e gestão do espaço são temas que produzem atritos, conflitos e são geradores de pressões políticas.

A gestão é uma atividade analítica e criativa, que tem por meta a formulação de princípios, diretrizes, normas e também a estruturação de sistemas gerenciais e de tomada de decisões sobre o uso, controle e proteção daquilo para o qual esta orientada. A gestão combina política, planejamento estratégico e planejamento tático, nessa seqüência (Lanna, 1998).

Um planejamento será adequado se levar em consideração as expectativas sociais e governamentais expressadas, formal ou informalmente, na política de desenvolvimento.

A formulação de projetos e a avaliação de seus efeitos não podem ser abordadas com precisão matemática, pois é necessário conjugar condicionamentos políticos, socioeconômicos, legais, institucionais, que os limitam, restringem ou, eventualmente, inviabilizam.

Não existe (nem existirá) uma metodologia padrão na elaboração de esquemas de planejamento do uso do solo, pois os objetivos variam de região a região, de país a país.

Às vezes, um objetivo inicial é, com o tempo, incrementado com outros. Por exemplo, segundo Sahuquillo (1993) na Venezuela, um projeto que tinha por objetivo inicial o incremento de áreas sob irrigação, acabou dando satisfação a outros objetivos posteriores, como abastecimento urbano e industrial.

Pode acontecer também que um projeto executado para resolver um problema pontual acabe gerando novos problemas não considerados no

planejamento inicial. No Paquistão, na década de 1970, um projeto de irrigação destinado ao desenvolvimento da agricultura numa região provocou salinização de solos e aquíferos (Sahuquillo, 1993).

Os poucos exemplos antes apresentados permitem afirmar que o planejamento do uso dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos é, em definitiva, um problema de planejamento do uso do espaço e esta tarefa é multidimensional: não existem objetivos únicos (nem estáticos) e nem uma única percepção dos problemas, nem das soluções possíveis e plausíveis. Para tornar mais complexas as coisas, os variados objetivos podem até estar em conflito entre si, como é o caso dos interesses econômicos e os ambientais (Lanna, 1982; Braga e Gobetti, 1997). Por isso, seria pelo menos desejável (e saudável) tentar abordar esses problemas de planejamento sob o paradigma multiobjetivo.

Num problema de otimização multiobjetivo, a tradicional função-objetivo se transforma num vetor de funções-objetivo e a otimização de um vetor é, em teoria e num sentido estritamente matemático, impossível (Andreu, 1993). Mas, como escreveu a professora russa Elena Ventsel num dos seus livros sobre Pesquisa Operacional (Ventsel, 1983), “A indeterminação é evidente, porém, é indispensável adotar uma solução!”.

Mesmo que a precisão algorítmica não seja possível nesses problemas, eles deveriam ser abordados com rigor científico. As abordagens multiobjetivo, embora não constituam algoritmos, são as ferramentas mais idôneas nesses casos, se elaboradas e aplicadas corretamente, lembrando sempre que, no final das contas, são abordagens heurísticas.

O planejamento científico de obras de engenharia não é tão comum como seria desejável na região nordeste da Argentina, o que também pode ser verificado em outros países do Cone Sul de América.

Segundo estimativas das Nações Unidas, mais de 75% da população da América Latina se concentra em centros urbanos e se espera que esse processo ganhe força nos próximos anos (Bertoni e Tucci, 2003). A título de exemplo, a planta urbana da cidade de Resistencia cresce a uma taxa de 2ha por semana, mas de forma desordenada, ocupando áreas inconvenientes, tanto pela falta de serviços, como pela vulnerabilidade a desastres naturais, especialmente enchentes (Scornik, 1998).

Esta cidade é a capital da província do Chaco, Argentina, e localiza-se na margem direita do rio Paraná, algumas dezenas de quilômetros a jusante da foz do rio Paraguai. Junto com os municípios de Puerto Barranqueras, Puerto Vilelas, Fontana e Puerto Tirol constitui uma conurbação de aproximadamente 370.000 habitantes.

Ela foi implantada num dos terraços de inundação do rio Paraná e por tal motivo é muito vulnerável às enchentes periódicas deste rio, situação que se repete em várias outras capitais do nordeste argentino.

A partir da grande enchente de 1982-83, que durou 11 meses, começou a ser delineada uma estratégia de defesa para Resistencia, baseada em circundar a cidade com diques (polders). Lamentavelmente, duas décadas depois, ainda existem pessoas e grupos de pessoas que criticam essa estratégia, sendo os mesmos que, durante aquele evento, reclamavam soluções estruturais para defender suas propriedades. A falta de um planejamento norteado pelo paradigma multiobjetivo é o cenário propício para que essas situações de assembleísmo quase permanente existam e confundam a opinião dos cidadãos.

O sistema de defesa norte desta cidade desde sempre gerou expectativas do tipo imobiliárias, pela eventual incorporação de áreas ao recinto protegido, e atritos entre setores de interesse político e ambiental, principalmente.

Embora seja uma obra praticamente concluída, o seu traçado continua sendo hoje motivo de discussões e debates. Portanto, dispor de um esquema conceitual que permita comparar alternativas diferentes (tanto para essa obra como para qualquer outra), e segundo pontos de vista diferentes, é uma necessidade ainda sem satisfação, pelo menos na região onde se situa a cidade de Resistencia.

## 1.2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa foi explorar abordagens multiobjetivo para o planejamento de obras de engenharia, em especial com características lineares, procurando formular com rigor científico um modelo de apoio à decisão, de fácil entendimento e aplicação. A intenção foi fazer um aporte ao problema enunciado por

Simonovic (1992) num artigo já clássico no planejamento de recursos hídricos: a existência de uma brecha entre a teoria e a prática.

Segundo uma publicação do Programa Hidrológico Internacional, os projetos destinados a satisfazer as demandas do ano 2025 deveriam estar hoje num estágio avançado de planejamento (Evaluación, 1997). Embora o artigo aborde o problema da demanda por água doce, as reclamações poderiam ser estendidas às demais demandas das grandes conurbações, como estradas, medidas de proteção contra enchentes, etc.

Foi feita uma tentativa de capturar a percepção dos tomadores de decisões reais sobre a melhor forma de resolver problemas já estruturados, através de técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério. Nos modelos desenvolvidos nesta pesquisa explorou-se a possibilidade de entrelaçar técnicas utilizadas por disciplinas diferentes. A seleção de traçados mais convenientes é hoje abordada pela Pesquisa Operacional, tanto por meio da Programação Dinâmica tradicional, como das técnicas para resolver o problema conhecido como least-cost-path, (caminho de mínimo custo). O estudo para planejamento de espaços geográficos é feito com o auxílio de técnicas de SIG. Por sua vez, o tratamento dos múltiplos objetivos a atingir é estudado pela Pesquisa Operacional, por meio da Otimização Multiobjetivo.

A definição da função-objetivo não é trivial em um trabalho de planejamento e de sua escolha correta depende o sucesso desta tarefa. O fio condutor deste trabalho foi a exploração de técnicas e métodos quantitativos que permitam capturar a percepção dos tomadores de decisões reais.

Um objetivo secundário foi procurar que o sistema seja entendido e aceito por estes tomadores de decisões reais, mas sem abrir mão do rigor científico. Nesse sentido, o paradigma escolhido foi a utilização de apenas ferramentas computacionais (software e hardware) simples, de ampla difusão e/ou baixo custo, como a planilha de cálculo Excel e o programa Idrisi 32, reconhecendo e aceitando suas limitações, sem recorrer à elaboração e/ou utilização de códigos computacionais próprios, sobre os quais muitas pessoas sentem receios até não serem testados suficientemente.

O modelo de apoio à decisão desenvolvido deve ser entendido como uma ferramenta para resolver problemas já estruturados e poderia ser empregado em qualquer outro trabalho de planejamento do uso do espaço, especialmente em elaboração de projetos de obras de engenharia com características lineares (embora

isto não seja uma limitante). A sua aplicabilidade foi testada num problema real: escolher o melhor traçado da defesa norte da Área Metropolitana do Grande Resistencia (Argentina) contra as enchentes do rio Paraná.

O problema analisado não tem apenas uma solução, senão inúmeras, pois a percepção do mesmo não é única. Cada potencial tomador de decisão privilegiará um aspecto sobre outro. Por exemplo, os ambientalistas procurarão o traçado que minimize o impacto ambiental, os administradores de dinheiros públicos desejarão o traçado de menor custo econômico, etc. Neste cenário de potenciais conflitos, os modelos desenvolvidos têm condições para orientar as discussões.

### 1.3. Organização do trabalho

O trabalho está dividido em seis partes, a saber:

- a problemática da área estudada, onde se descreve a hidrologia da região, a sua geomorfologia, topografia, caracterização ambiental, entre outros (capítulo 2);
- uma revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados com os caminhos de mínimo custo e o paradigma multiobjetivo (capítulo 3);
- os métodos adotados e as metodologias desenvolvidas (capítulo 4);
- a aplicação dessas metodologias ao caso estudado (capítulo 5);
- uma discussão dos dados e dos resultados (capítulo 6);
- finalmente, as conclusões obtidas e recomendações para futuras pesquisas (capítulo 7).

## 2. A ÁREA ESTUDADA

---

*A vida é um espetáculo maravilhoso, mas nossos lugares não são bons e não entendemos o que estamos assistindo.*

*George Clémenceau*

### 2.1. Descrição geral da área estudada

A Área Metropolitana do Grande Resistencia (AMGR) é uma conurbação com uma população da ordem de 370.000 habitantes e que cobre aproximadamente 5.600ha. O limite físico norte de sua planta urbana é a Avenida Nicolás Avellaneda, que é parte da estrada nacional Nº 16, que comunica a Mesopotâmia argentina e o sul do Brasil com a região noroeste da Argentina e com Chile. Na Figura 2.1 é apresentado um mapa na qual é possível apreciar a localização da cidade e do rio Paraná.

Fonte: Departamento de Hidráulica-Fac. Engenharia-UNNE

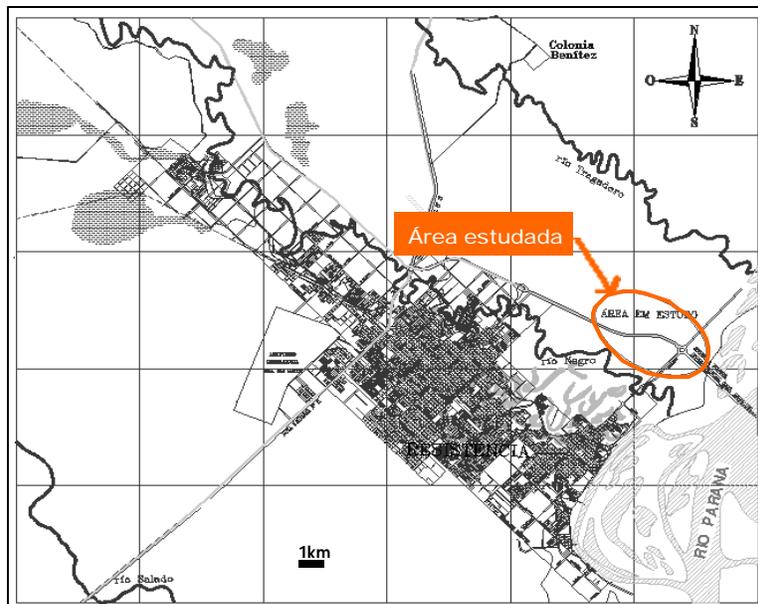


Figura 2.1 Área metropolitana do Grande Resistencia

Geograficamente, a AMGR está localizada na margem direita dos rios Negro e Paraná, no segundo e terceiro terraço de inundação deste último (planície proximal e distal, respectivamente, segundo Orfeo, 1996) e a um par de dezenas de quilômetros a jusante da foz do rio Paraguai, seu principal tributário. Seu limite norte é o vale do rio Tragadero e o sul o vale do rio Salado.

Desde uma ótica geomorfológica, a AMGR situa-se na região conhecida como Planície Chaco-Pampeana, que cobre grande parte da superfície Argentina, e que se caracteriza por uma ausência quase total de relevo. Seu limite oriental é o vale de rio Paraná, que escoam por mega-alinhamentos estruturais.

Esta planície está implantada numa bacia de sedimentos continentais quaternários, com declividade suave para o SE. Nela escoam os rios Tragadero (limite norte da AMGR), o Negro (que atravessa a cidade) e o Salado (limite sul), que têm lineamentos NO-SE, existindo ainda importantes áreas de banhados e lagoas.

Fonte: APA

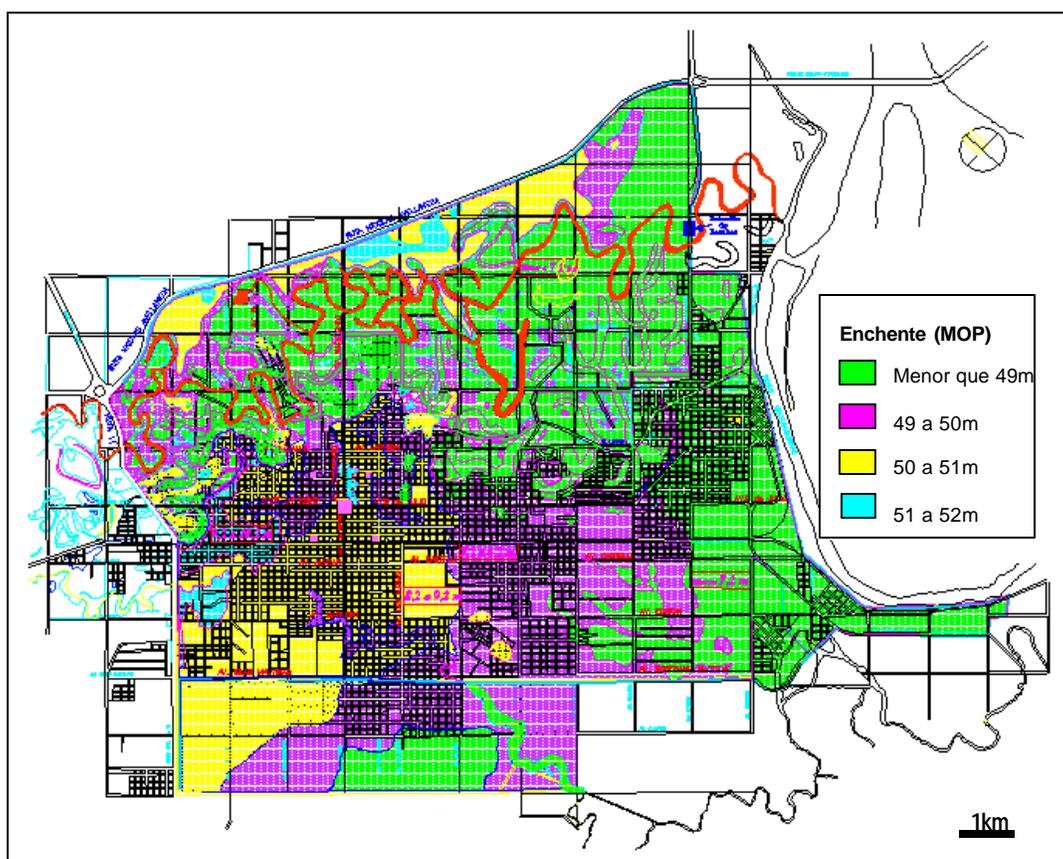


Figura 2.2 Potencial afetação da cidade segundo a importância da enchente

Essas características impõem condicionamentos muito fortes na construção de qualquer obra de características lineares, especialmente as que têm direção leste-oeste, pois é preciso ter muito cuidado para que elas não se transformem em diques frontais nas enchentes do rio Paraná.

Aproximadamente 80% da planta urbana da cidade tem elevação de 48m MOP<sup>#</sup> ou menos, que corresponde a uma frequência de nível do rio Paraná de quase 7%, o que será discutido mais na frente.

Na Figura 2.2 é mostrado um mapa, no qual se visualizam os setores da cidade que seriam afetados por diferentes enchentes no caso de não existirem defesas. Esse mapa mostra com clareza a real vulnerabilidade da cidade ante as enchentes ribeirinhas.

## 2.2. Caracterização ambiental

A AMGR localiza-se nas planícies proximal e distal do rio Paraná, numa região com uma combinação muito particular de variáveis bióticas e abióticas e que apresentam um aspecto muito particular.

As principais unidades de vegetação (segundo o relatório de SETEC, 2001) estão constituídas por: “selva ripária” (ou de inundação), especialmente nas margens dos rios principais; pequenos agrupamentos de *Salix Humboldtiana* e *Croton Urucurana*; várias espécies de *Panicum* e comunidades de hidrófitos natantes flutuantes.

Com referência à fauna aquática, das 416 espécies de peixes de água doce que habitam Argentina, 355 encontram-se no rio Paraná. Desse total, por sua vez, 196 vivem no Paraná Médio, onde encontra-se Resistencia, e 28% dos mesmos têm valor comercial .

Embora a população tenha aos peixes como a porção mais substancial da fauna aquática, existe também uma meso e micro-biota, altamente diversa e complexa que são a base de importantes cadeias ecológicas.

---

<sup>#</sup> O MOP é um dos sistemas de referência para elevações utilizados na República Argentina. O datum deste sistema é o definido como nível médio do rio Riachuelo na cidade de Buenos Aires. Existe um outro sistema, chamado IGM, que tem seu datum 0,556m acima do MOP (cota MOP [m] = cota IGM [m] + 0,556m).

Lamentavelmente, a urbanização intensa e crescente impactou (e impacta) forte e negativamente os ecossistemas. Porém, a região ainda apresenta belas paisagens, muito ricas, ambiental e ecologicamente falando que, sendo possível, deveriam ser preservadas.

### 2.3. As enchentes ribeirinhas na AMGR

A AMGR, por sua localização geográfica e suas condições geomorfológicas é muito vulnerável a enchentes ribeirinhas, além de sofrer também enchentes pluviais por causa da rede de drenagem pouco integrada e a alta urbanização.

Ela padece com freqüência inundações do rio Paraná (as mais importantes) e do rio Negro, ou de ambos.

O rio Negro atravessa a cidade, e tem uma bacia da ordem de 8.100km<sup>2</sup> (Ruberto, 1999). Para proteger a região urbana de suas enchentes foi desenhada uma estratégia de defesa que consiste numa derivação das suas vazões através de uma obra de controle localizada aproximadamente 40km a montante da cidade (obra de controle de Laguna Blanca), e uma segunda obra de controle na foz, com estação de comportas e de recalque para desaguá-lo quando o rio Paraná esteja com águas altas. Esta última obra está em fase de início de execução.

Além deste desenho, foi implementada uma medida não estrutural, através de legislação provincial: a Resolução N° 1111 da APA<sup>\*</sup>. Esta resolução define a linha de ribeira e a linha de afetação por enchentes do rio Negro de 10 anos de tempo de recorrência, estabelecendo a proibição de ocupação das áreas com cotas abaixo da primeira, e impondo fortes restrições à ocupação das que se encontram entre ambas.

No entanto, as enchentes mais catastróficas que aconteceram na cidade foram devidas às cheias do rio Paraná.

A bacia do rio Paraná, na latitude da AMGR, é de 1.950.000km<sup>2</sup> (Giacossa, Paoli e Cacik, 2000), incluída a bacia do rio Paraguai. A declividade média do talvegue é de 8cm/km ( $8 \cdot 10^{-5}$ ), enquanto na região da AMGR é um pouco menor, de 6 a 7cm/km. O vale de inundação desenvolve-se principalmente na margem direita,

---

<sup>\*</sup> APA: Administración Provincial del Agua del Chaco ( Órgão de aplicação do Código de águas desta província).

tendo frente à AMGR aproximadamente 10km de largura, enquanto a calha principal possui aproximadamente 1,50km.

Na Figura 2.3 são apresentadas duas imagens Landsat-TM 5, em falsa cor composta, de 23 de março de 2003 (à esquerda), que corresponde a estiagem, e de 4 de maio de 1998 (à direita), correspondente ao pico da enchente desse ano (49,97m MOP), e que permitem ter uma idéia da dimensão da largura do vale de inundação deste rio e a vulnerabilidade da AMGR ante suas enchentes.

Fonte: APA

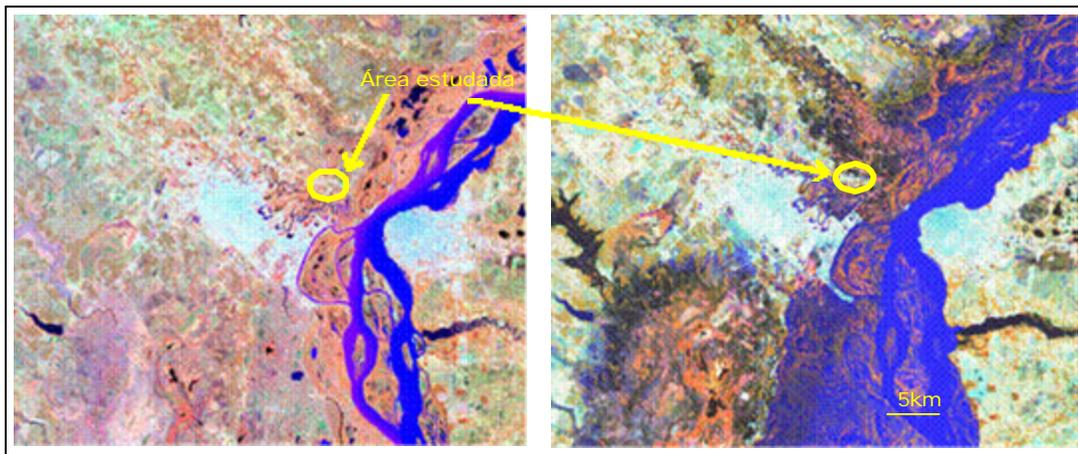


Figura 2.3 Largura do vale do rio Paraná

Características hidrológicas do rio Paraná na latitude da AMGR são apresentadas na Tabela 2.1 (EVARSA, 1997).

Tabela 2.1 Características hidrológicas do rio Paraná na latitude da AMGR

Período	Q anual médio (m <sup>3</sup> /s)	Q anual máximo (m <sup>3</sup> /s)	Q anual mínimo (m <sup>3</sup> /s)
1904-1997	17.202	60.215 (ano 1983)	9.575 (ano 1944)
1961-1997	18.441	60.215 (ano 1983)	10.558 (ano 1968)

A vazão da cheia é, segundo Toniollo, apud Rayano (2003), 27.330m<sup>3</sup>/s, que corresponde a uma cota de 47,37m MOP. Mas, em forma genérica, considera-se que existe uma situação de cheia quando as vazões superam os 30.000m<sup>3</sup>/s, que

corresponde à vazão máxima média anual, segundo a série hidrológica chamada de “atual”, que cobrem os 37 anos entre 1961 e 1998 (Depettris e Rohrmann, 1998).

É costume fazer a diferença entre a série atual e a total, sendo considerado que a primeira é mais homogênea, dado que a partir dos anos 60 e 70 houve uma importante mudança no tipo de cobertura da bacia.

A maior enchente registrada (e documentada) no século vinte é a de 1982-83, com 5 picos com vazões superiores a  $50.000\text{m}^3/\text{s}$ , tendo-se mantido por acima de  $35.000\text{m}^3/\text{s}$  durante 8 meses e acima de  $30.000\text{m}^3/\text{s}$  11 meses (Depettris e Rohrmann, 1998). A recorrência avaliada na época foi 196 anos, mas, quando incorporada a década de 1990, diminuiu para 44,4 anos (tomando como base as alturas hidrométricas do Porto de Barranqueras, e uma distribuição de Pearson, que apresentou o menor erro de variável e de frequência).

Desde o ano 1935 foram registradas 28 enchentes com vazões superiores a  $30.000\text{m}^3/\text{s}$ . Elas são apresentadas na Tabela 2.2 (Paoli e Cacik, 2000).

Tabela 2.2 Principais enchentes desde 1935

<b>Ano</b>	<b>Q Max (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Duração por acima de 30.000 m<sup>3</sup>/s (días)</b>
1935	33.512	78
1935	31.858	49
1939	31.012	42
1945	33.672	140
1951	33.193	131
1954	30.632	107
1958	32.404	54
1959	33.383	60
1961	34.720	72
1965	33.833	90
1966	43.829	-
1974	30.405	81
1977	36.717	100

1980	34.075	75
1981	31.012	81
1982	38.805	-
1983	60.215	-
1987	38.861	77
1990	43.829	55
1990	35.216	44
1990	37.055	48
1991	37.703	107
1992	54.000	98
1993	30.254	49
1994	31.548	73
1995	34.969	23
1997	41.528	87
1998	50.600	91

Na Tabela 2.3 é apresentada uma análise de freqüências dos níveis hidrométricos médios diários do rio Paraná, no Porto de Barranqueras, para o período 1966–1998.

Tabela 2.3 Freqüência de elevações do rio Paraná em Porto Barranqueras

<b>Elevação do rio Paraná (m MOP)</b>	<b>Freqüência absoluta</b>	<b>Freqüência relativa</b>
50,39	0	0,00%
50,30	9	0,08%
49,80	65	0,55%
49,30	182	1,53%
48,80	362	3,04%
48,30	578	4,85%
47,93	829	6,96%
47,30	1588	13,33%
46,80	2399	20,14%

46,30	3580	30,06%
45,80	5016	42,11%
45,30	6872	57,69%
44,80	8418	70,67%
44,30	9705	81,48%
43,80	10773	90,45%
43,30	11238	94,35%
42,80	11529	96,79%
42,30	11779	98,89%
41,80	11890	99,82%
41,68	11911	100,00%

Fonte: SETEC S.R.L. Consultora

#### 2.4. As estratégias de defesa contra as enchentes do rio Paraná

Como já foi indicado, a enchente de 1982-83 do rio Paraná foi a mais importante do século, não apenas pelo nível atingido pelas águas (50,40m MOP), mas também pelo custo dos danos que provocou, avaliados em aproximadamente u\$s 270 milhões (Departamento de Hidráulica, 1995).

A partir desse evento começaram a ser em projetadas defesas definitivas para a cidade, adotando-se como estratégia isolá-la do rio mediante aterros (polders).

Estas obras, dependendo de sua localização específica, são (e foram) construídas com aterros de areia de dragado (refulada), ou de solos coesivos, com cota superior em 54m MOP, 8m de largura mínima no topo e taludes de 1:3 ou 1:4 (V:H).

Para definir a cota de acabamento adotou-se uma altura de 52m MOP, correspondente a uma enchente que, tomando como base a série “atual”, teria uma recorrência de 200 anos, segundo o ajuste da distribuição Gumbel. A esta elevação foi adicionado um excesso de 2m para cobrir as ondas que se formam no rio (para águas altas, a recorrência de um evento de enchente importante praticamente não varia se ele é caracterizado pela sua altura hidrométrica ou segunda a vazão).

Além de serem onerosas, estas defesas sempre geraram à população da cidade expectativas e atritos. Expectativas no sentido da incorporação de superfícies ao recinto defendido, o que produz pressão política, e atritos com grupos ambientalistas.

Atualmente, está vigente o “Código de Aguas de la Provincia del Chaco”, estabelecido por lei, que regula o uso da água na província. O órgão de aplicação deste Código é a Administración Provincial da Água (APA), cujo diretório é integrado por um presidente e dois vogais. A defesa norte é uma obra praticamente concluída, mas a discussão sobre se o seu traçado é ou não o mais adequado ainda persiste e é motivo de reclamações ante a APA.

Mais especificamente, a sua porção mais ao leste, de aproximadamente 3,50km de extensão, sempre foi o mais contraditório e conflitivo, e por este motivo as autoridades da APA sugeriram que, se possível, fosse o setor estudado nesta pesquisa. Na Figura 2.4 é mostrado o setor leste da defesa norte numa imagem Landsat TM5, em falsa cor composta (R-G-B, 2-3-4).

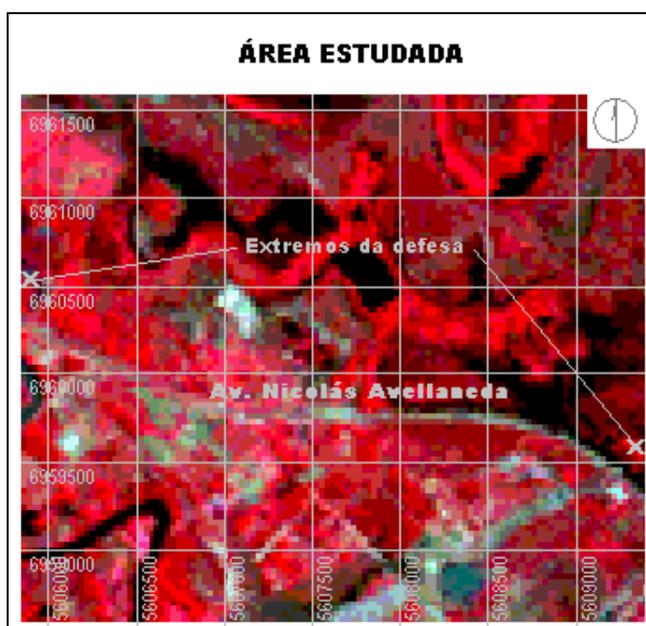


Figura 2.4 Imagem da área estudada

Para a localização desta defesa adotou-se um critério político segundo o qual seu traçado deve ir ao norte da Avenida Nicolás Avellaneda, limite norte do setor

urbano consolidado da cidade, porém, não foi utilizado nenhum modelo de otimização.

## 2.5. Dados disponíveis

Os dados disponíveis para encarar este trabalho foram, entre outros:

- imagens Landsat TM 5 e 7, nas 7 bandas e de várias datas;
- fotografias aéreas coloridas, sem restituir, em escala aproximada de 1:5.000, de abril de 1997;
- alguns levantamentos topográficos de baixa precisão;
- a cota do topo da defesa norte (54m MOP) e o layout do aterro (8m de largura no topo e taludes laterais 1:3);
- séries hidrométricas do rio Paraná no Porto de Barranqueras, que permitiram verificar se a cota adotada para a defesa é adequada para oferecer uma proteção contra uma enchente de 200 anos de tempo de recorrência (52m MOP segundo a série de alturas), mais um excesso de 2m para compensar as ondas que se geram no rio Paraná.

Todos estes dados correspondem à informação oficial, disponível na biblioteca da APA e do Departamento de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade Nacional do Nordeste.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

*Não fracassei. Simplesmente achei outras dez mil maneiras de fazê-lo, mas que não funcionam.*

*Thomas A. Edison*

### 3.1. Introdução

Esta pesquisa está fundamentada em três temas de interesse, passíveis de revisão: os caminhos de mínimo custo, o paradigma multiobjetivo e seus usos integrados para a solução do problema em análise. Um quarto tema deve ser incluído e tem a ver com a teoria dos conjuntos difusos, que foram utilizados apenas de forma exploratória.

Esta revisão abordará cada um desses temas em itens separados, que serão apresentados a seguir.

### 3.2. Problemas de caminhos de mínimo custo

#### 3.2.1. A necessidade de traçados ótimos

Os projetos de obras de proteção contra enchentes têm de estar associados a políticas de desenvolvimento sustentável, em especial a de manejo da planície de inundação, para diminuir os riscos de danos potenciais decorrentes de tais enchentes.

Para essa finalidade podem ser tomadas medidas “não estruturais” ou medidas “estruturais”, de preferência no marco de um Plano Diretor (Tucci, 1997, Lanna, 1997, Freitas, 2000).

As medidas não estruturais tentam amenizar a convivência com os problemas. São predominantemente do tipo administrativo e legal, como por exemplo o zoneamento de áreas de risco, regulação do uso do solo, utilização de incentivos econômicos, implementação de sistemas de alerta associados a planos de evacuação da população, sistemas de informação pública e educação, entre outros. Por outro lado, as ações que envolvem a construção de obras são consideradas medidas estruturais.

As medidas não estruturais são muito convenientes na fase de planejamento urbano, principalmente por terem um custo de implementação mais baixo. Mas, quando o problema tem a ver com uma urbanização consolidada, normalmente a sociedade reclama obras.

As enchentes ribeirinhas são, lamentavelmente, muito comuns nas capitais do nordeste argentino. Para prevenir suas conseqüências deletérias, por algum motivo, os decisores políticos escolheram como estratégia a construção de diques perimetrais às cidades. O custo desse tipo de obras é alto, tanto sob a ótica financeira e econômica, como também ambientalista.

Para a escolha do traçado desses diques, em geral não foram seguidos critérios de planejamento baseados em técnicas modernas, nem modelos matemáticos de otimização.

Utilizar os escassos recursos (especialmente os financeiros) com eficiência deveria ser o princípio que norteasse o planejamento estratégico desse tipo de obras, procurando fazer com que os traçados sigam os lineamentos dos chamados caminhos de mínimo custo ou, segundo a bibliografia específica, "least-cost-path".

### 3.2.2. Os caminhos de mínimo custo

Ao serem tomadas decisões referentes a traçados de estradas, canais e condutos em geral, procura-se que elas gerem o menor impacto possível. Mas, como conseguir isso?

O problema dos caminhos de mínimo custo começou a ser estudado recentemente, há pouco mais de um quarto de século, mas de forma isolada e

separada por especialistas da Pesquisa Operacional e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Segundo os primeiros, o problema consiste em achar o caminho “mais barato” entre dois pontos do espaço de decisão, dada uma rede de pontos e os arcos que os vinculam, mais os custos associados a cada arco. Esses problemas podem ser resolvidos aplicando alguma técnica de Programação Dinâmica (PD).

Por outro lado, existem problemas da engenharia prática, nos quais os pontos correspondem a um espaço geográfico e os arcos representam custos que poderiam ser expressos por meio de uma função de custo incremental entre esses pontos. Esses problemas podem ser abordados com técnicas de SIG, conhecidas no jargão do geoprocessamento como problemas de caminhos de mínimo custo, ou “least cost-path”.

O custo deve ser entendido como um atrito e poderia medir-se em termos de distância, risco, impacto ambiental, tempo de viagem, etc. Portanto, fica configurado um típico problema de otimização: uma função (de custos) a ser otimizado (minimizado), mais um conjunto de restrições a serem consideradas no processo de decisão.

Num plano perfeito, o caminho mais curto entre dois pontos será, obviamente, uma linha reta. Se sobre esse plano são superpostas outras capas representando atritos (por exemplo, tipo de usos do solo, presença de corpos de água, etc.), os caminhos mais curtos começarão a se afastar das linhas retas para se transformarem em poligonais (Collischonn e Pilar, 2000).

Por exemplo, dois pontos do espaço podem estar muito próximos, porém separados por barreiras importantes como, por exemplo, corpos de água, morros, etc. Nesses casos, o caminho de menor custo não será necessariamente o mais curto.

Quando não há limitações de escolher caminhos preestabelecidos o ambiente raster se apresenta como muito adequado. No formato raster a área de estudo é dividida em uma fina malha de células de grade, nas quais são registrados as condições ou atributos da superfície terrestre naquele ponto (Eastman, 1995).

Por outro lado, quando o caminho procurado estiver, obrigatoriamente, sobre ruas ou avenidas de uma cidade, ou sobre as rodovias de uma região, o problema é mais facilmente resolvido em um ambiente que poderia ser chamado de vetorial, onde a dificuldade de avanço, ou tempo de deslocamento, é válida apenas para os

trechos de ruas e avenidas que unem dois pontos. Nesse contexto, um vetor pode ser definido como um arco orientado, ou seja, com uma origem e um final, e um determinado custo para percorrê-lo.

O grande número de informações que podem ser consideradas, levando em conta sua base geográfica, tornam os SIG o ambiente ideal para resolver problemas de caminhos de mínimo custo. Utilizar somente a intuição ou a experiência pode levar a resultados satisfatórios em pequenos problemas, mas pode conduzir a soluções não ótimas, mais caras, mais impactantes, mais demoradas ou de maior risco (Ventsel, 1982). Em problemas mais complexos, um SIG pode ajudar a obter de maneira mais rápida e segura a solução do problema.

Funções para a estimativa do caminho de mínimo custo têm sido incluídas em programas de geoprocessamento comerciais há algum tempo. O programa IDRISI, por exemplo, conta com duas funções para estimar caminhos de mínimo custo sobre planos de informação “raster” (Eastman, 1995). Já os problemas de caminhos de mínimo custo em ambiente “vetorial” vêm sendo estudados e resolvidos pela Pesquisa Operacional, que elaborou as técnicas de Programação Dinâmica, Redes de Fluxo, PERT-CPM, etc.

### 3.2.3. Os caminhos de mínimo custo na literatura técnica

O tema dos caminhos de mínimo custo tem sido abordado por uma grande quantidade de pesquisadores, sendo hoje muito utilizado nos projetos de engenharia. A seguir, serão apresentadas algumas aplicações muito interessantes.

Hammad, Itoh e Nishido (1993) realizaram um trabalho relacionado com o planejamento de estradas de grande porte (highways), no qual procurava-se otimizar a localização de pontes em relação aos alinhamentos desejáveis para estes tipos de vias de comunicação, utilizando SIG e sistemas especialistas. Porém, não atacaram frontalmente o problema dos caminhos de mínimo custo.

Weber e Hasenak (1998) apresentaram um exemplo de aplicação desses conceitos para o traçado de um trecho de um gasoduto que alimenta a usina termoeletrica de Uruguaiana-RS.

Outro trabalho interessante, que considera como fator de resistência a visibilidade é o de Lee e Stucky (1998). Por sua vez, Stefanakis e Kavouras (1995), apresentam uma descrição dos caminhos ótimos num contexto espacial.

Saab e VanPutte (1999) desenvolveram uma variante do algoritmo de Dijkstra para determinar o que eles definem como caminhos de mínimo custo num espaço geográfico, embora na verdade apenas determinaram caminhos mais curtos.

Alguns programas comerciais de SIG têm incorporado funções para traçar caminhos de mínimo custo faz algum tempo (Eastman, 1995). Num SIG baseado em vetores, com ruas e estradas representadas por linhas, a aplicação de técnicas de PD pode ser direta, precisando-se apenas de uma interface que prepare os dados georreferenciados. Para os SIG baseados em grades (rasters), as técnicas de PD aplicam-se de forma indireta (Douglas, 1994).

O ponto débil dos programas de SIG na resolução de problemas de PD em ambientes geográficos é que o custo para atravessar uma célula da grade é considerado intrínseco. Na realidade, o custo de passagem pode variar com a direção e com o sentido. Por exemplo, para escoar um determinado volume de água, descer é mais fácil que subir.

Collischonn e Pilar (2000) apresentaram um algoritmo que resolve esta limitação em ambientes geográficos, desenvolvido a partir de um trabalho elaborado por Pilar (1999), no qual é descrito um algoritmo simplificado para a resolução de problemas de PD tradicionais.

Ambos trabalhos mostram algoritmos que resolvem os problemas partindo do conhecimento a priori da função-objetivo (FO). Porém, conhecer esta FO não é tarefa fácil, pois devem ser conjugados objetivos relativos à satisfação de necessidades sociais, políticas, ambientais e econômicas, o que gera um verdadeiro problema de otimização multiobjetivo e multicritério.

Na atualidade, existem técnicas matemáticas para resolver problemas deste tipo, que procuram definir uma FO integradora, ou fornecer uma ordem de prioridade (rank) a uma série discreta de alternativas.

### 3.2.4. Caminhos de mínimo custo em ambiente vetorial

Existem problemas nos quais já existem caminhos predefinidos, como por exemplo, a rede viária de uma cidade. Nesses casos, o caminho para unir dois pontos desta rede, necessariamente, deve pertencer à rede. Cada arco desta rede poderia ser visualizado como um vetor, ou seja, possui um início, um final e um custo (tempo, distância, etc.) para percorrê-lo. Então, o problema consiste em achar o caminho “mais barato” entre dois pontos, dada uma rede de pontos e arcos que os conectam sob um determinado custo.

Esses problemas podem ser resolvidos aplicando alguma técnica de Programação Dinâmica (PD), assim como os algoritmos de redes e o algoritmo de Dijkstra (Taha, 1995), entre outros.

A PD é um método de otimização adaptado a problemas de etapas múltiplas. Uma etapa poderia ser definida como a parte do problema que possui um conjunto de alternativas mutuamente excludentes e que caracterizam o estado desta etapa. O estado reflete as restrições que vinculam as etapas (Ventsel, 1983; Wagner, 1986; Bronson, 1993; Taha, 1995; Eppen et al, 2000; Barros, 1997; Cifres, 1993).

A forma na qual a PD é resolvida consiste em procurar a direção ótima “passo-a-passo”, levando em consideração as conseqüências futuras de cada decisão. Ou seja, a decisão na etapa “i” não apenas procura ser a melhor para a mesma, como também para todas as restantes, incluindo a própria etapa “i”, tomadas em conjunto.

Dessa maneira, o problema de PD é caracterizado por um espaço de decisão de duas dimensões: etapas-estados, no qual fica configurada uma grade de pontos interconectados por arcos que representam a viabilidade dessa decisão e o seu correspondente custo (Pilar, 1999).

Os problemas de redes e os de programação dinâmica constituem, cada um, um assunto de interesse especial da Pesquisa Operacional e existem algoritmos especializados para resolvê-los. Mas, se os mesmos podem ser representados como de tomada de decisões seqüenciais, existe uma forma geral e muito simples de abordá-los.

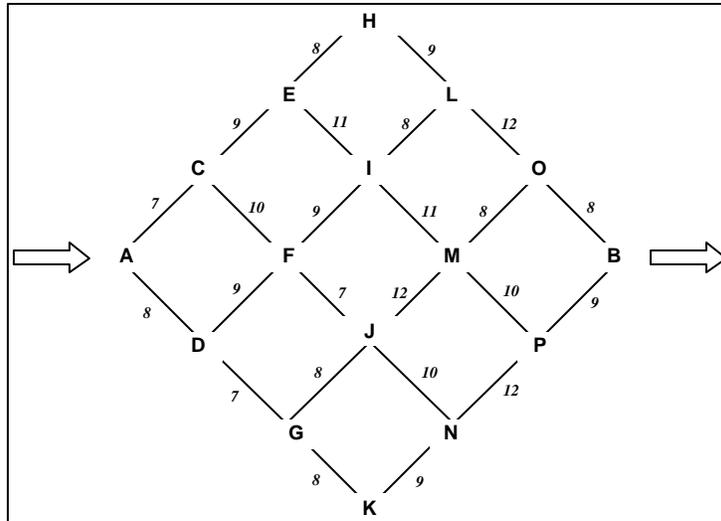


Figura 3.1 Mapa simplificado das ruas de uma cidade

Para exemplificar isto será utilizado o problema representado na Figura 3.1, que mostra algumas ruas de um bairro hipotético de uma cidade qualquer. Os pontos “A” e “B” são a origem e o fim de um determinado percurso e os valores indicados nos arcos os tempos aproximados (impedância), em segundos, para percorrê-los. O problema consiste em encontrar a rota que demande o menor tempo entre os pontos “A” e “B”, avançando sempre da esquerda para a direita, sem retroceder.

A abordagem matemática do problema, a priori, não parece fácil, pois a decisão a ser tomada num ponto intermediário qualquer mantém estreita relação com as decisões seguintes. Aparentemente, o problema se apresenta como indefinido.

Porém, existem dois pontos onde o problema fica perfeitamente definido: os pontos “O” e “P”, onde as únicas decisões possíveis são, em ambos os casos, ir para o ponto “B”, gastando um tempo de 8 e 9 segundos, respectivamente.

Estas decisões ótimas serão indicadas no diagrama com setas e os tempos mínimos necessários para ir desde “O” e “P” até “B” serão expostos dentro de círculos na Figura 3.2. Estes círculos sintetizam todo o processo para escolher o caminho ótimo para ir desde “O” e “P” até o fim.

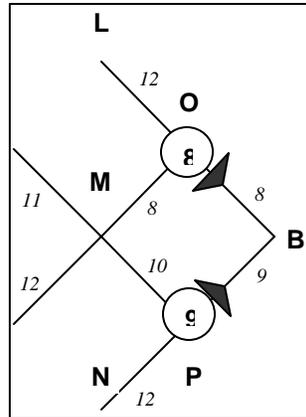


Figura 3.2 Detalhe dos trechos finais do percurso de A até B no mapa da cidade.

Seguindo este raciocínio, poderiam ser avaliadas as melhores decisões a serem tomadas nos pontos “L”, “M” e “N”.

Para o ponto “L”, a melhor decisão a ser tomada é única (pois não é permitido “retroceder”): ir para o ponto “O”. Então, o menor tempo para ir de “L” até o fim será o tempo para ir de “L” até “O”, mais o menor tempo para ir de “O” até o fim, já avaliado no passo anterior e colocado num círculo, conforme Figura 3.3. Um raciocínio semelhante pode ser feito no ponto “N”.

No ponto “M”, por outro lado, têm-se duas opções: ir ao ponto “O” ou ir ao ponto “P”. Os menores tempos para ir desde “O” e “P” até o fim são conhecidos e foram indicados nos círculos da Figura 3.3. Portanto, a melhor decisão em “M” corresponderá ao caminho que levar ao menor resultado entre os tempos para ir de “M” até “O”, mais o tempo mínimo para ir de O até o fim, neste caso  $8 + 8 = 16$ , e o tempo para ir de “M” até “P”, mais o tempo mínimo para ir de “P” até o fim, ou seja  $10 + 9 = 19$ . Portanto, a melhor decisão em “M” será ir para o ponto “O”. Na Figura 3.3 são representados estes últimos resultados.

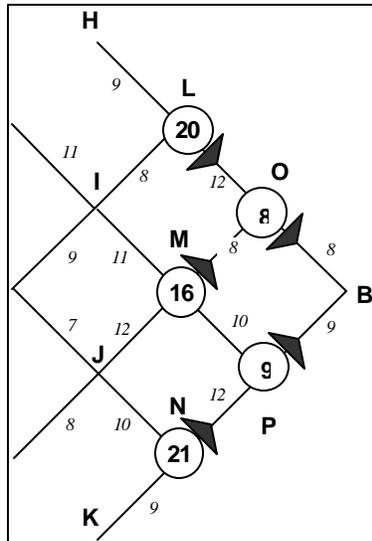


Figura 3.3 Novo detalhe dos trechos finais do percurso de A até B

É possível seguir o mesmo raciocínio até chegar ao ponto de início (ponto “A”). Esse procedimento é chamado de “recursivo” (Wagner, 1986; Bronson, 1993; Taha, 1995). Em cada ponto do mapa está indicada por uma seta a melhor direção a seguir e, pelo número no interior do círculo, o tempo mínimo demandado para atingir o ponto “B”. Finalmente, o caminho que demanda menos tempo para ir de “A” até “B” é destacado na Figura 3.4.

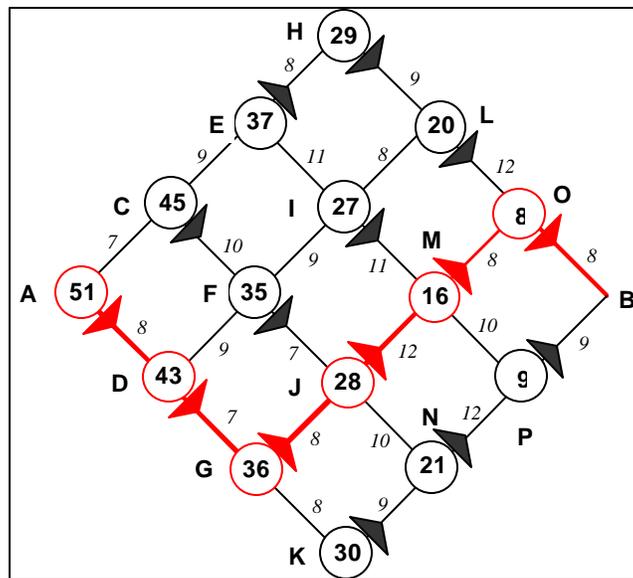


Figura 3.4 Caminho mais rápido para ir de A até B

Muitas vezes, por desconhecimento ou por considerar os cálculos dos algoritmos de otimização muito complexos, ao ponto que pareceria mais sensato (ou menos trabalhoso) utilizar a “experiência” ou a intuição, recorrendo a métodos que, aparentemente, poderiam dar uma boa solução. Esses métodos costumam ser chamados de heurísticos, pois sua lógica se baseia em regras ou métodos práticos que, talvez, conduzam a uma boa solução (Taha, 1994).

Embora pareçam razoáveis, os métodos heurísticos, ou intuitivos, levarão a soluções sub-ótimas. Existem situações onde as consequências de escolher um caminho não ótimo, mesmo que próximo deste, pode levar ao comprometimento de uma grande quantidade de dinheiro, um grande risco para o meio ambiente ou para vidas humanas.

Em casos como estes, insistir em tomar decisões com base na experiência prévia é muito audaz e até uma negligência. Nessas situações muito especiais a experiência passada pode não dar bons conselhos e o aparente bom senso pode produzir enganos.

### 3.2.5. Caminhos de mínimo custo em ambiente raster

A combinação do sistema de informações geográficas com os algoritmos de busca de caminhos de mínimo custo tem mostrado seus melhores resultados em ambientes raster. Neste contexto, uma grande vantagem dos SIG é que eles permitem a possibilidade de combinar e considerar uma grande quantidade de informações na análise.

Os algoritmos para encontrar o caminho de mínimo custo em ambiente “raster”, costumam separar o problema em três partes:

**1) Geração de um plano de custo de passagem.** O custo de passagem é um valor atribuído às células da grade em que foi dividido o espaço e que deve refletir o atrito que produz atravessar a célula. Esse atrito pode ser caracterizado em termos de tempo de deslocamento, impacto ambiental, etc.

**2) Cálculo de um plano de custo acumulado até o fim do caminho, a partir de um plano de custo de passagem.** O plano de custo acumulado é calculado iterativamente e em etapas. A regra para calcular o plano de custo acumulado é semelhante à regra para vetores, descrita anteriormente, isto é, se o caminho de menor custo de um ponto “A” até outro “B” passa pelo ponto “C”, então o caminho de menor custo de A até “C” é parte do caminho de menor custo de “A” até “B”.

**3) Percurso do plano de custo acumulado de um ponto de início até o ponto final do caminho.** Na maioria dos casos o plano de custo acumulado é percorrido do ponto final do caminho até o início, sempre na direção da célula vizinha que tiver o menor custo acumulado.

Um exemplo de algoritmo para resolver situações deste tipo é apresentado em Collischonn e Pilar (2000). Segundo este algoritmo, o processo de atribuição de custo é feito célula por célula, para toda área. Uma janela móvel de 3 x 3 células percorre toda área do plano de custo de passagem, identificando células cujo custo já foi calculado, células cujo custo acumulado foi alterado na iteração anterior e células cujo custo acumulado ainda não foi calculado.

Na Figura 3.5 é apresenta essa janela de 3 x 3 células, onde estas estão marcadas com números para sua identificação. O custo acumulado da célula central é calculado pela soma do custo acumulado de uma célula vizinha à central , mais o custo incremental do caminho entre ambas.

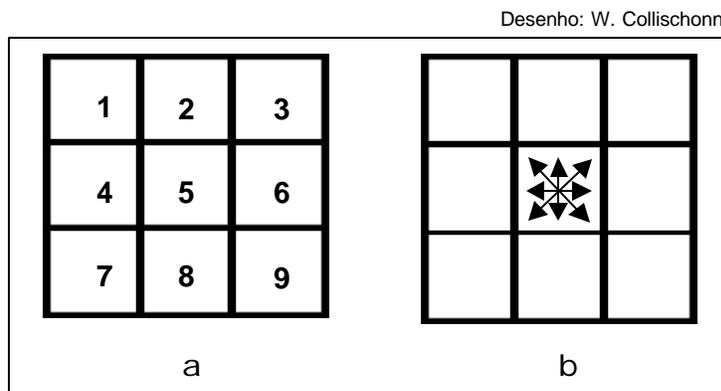


Figura 3.5 Janela de 3 x 3 células sobre a qual é realizado o processo de cálculo

Esse algoritmo é semelhante a um algoritmo de programação dinâmica em que o diagrama de caminhos possíveis não está completamente definido quando se inicia a busca. Na extensão para o ambiente raster o caminho a seguir a partir de uma célula qualquer levará, necessariamente, a uma das 8 células vizinhas, como mostra a grade da Figura 3.5b.

O custo acumulado de cada célula é o menor custo dessa até a célula que define o final do caminho.

Em cada iteração aumenta a quantidade de células com o custo calculado e, então, aparecem novos caminhos factíveis. Portanto, o custo acumulado de cada célula deve ser repetidamente revisado. A necessidade de um procedimento iterativo decorre do fato de que os caminhos possíveis não são conhecidos a priori, mas vão sendo identificados à medida que o procedimento avança.

Em cada iteração, uma janela de 3 células de largura por 3 células de altura percorre o plano de custo acumulado até encontrar uma célula cuja vizinha (qualquer célula da periferia na janela 3x3) teve o custo acumulado alterado na iteração anterior. Essa alteração do custo acumulado alerta para a necessidade de revisar o custo acumulado da célula central. Nesse caso, duas situações são possíveis:

1) a célula central ainda não teve seu custo acumulado calculado (porque não havia ainda nenhuma célula vizinha com o custo acumulado já definido na iteração anterior) e é necessário fazê-lo;

2) a célula central já teve seu custo acumulado calculado, mas uma das vizinhas teve seu custo alterado na iteração anterior, sendo então necessário revisá-lo.

Em qualquer caso, a direção de menor custo, a partir da célula central pode ser qualquer uma das oito direções definidas na Figura 3.5.

Na Figura 3.6 é representado o esquema de cálculo numa iteração  $k$  (que vem a ser a iteração 2). A janela móvel se aproxima da célula que define o final do canal (célula preta) e chega à borda de uma região formada por células cujo custo acumulado já foi calculado numa iteração anterior (células acinzentadas). As células brancas da figura ainda não tiveram o seu custo acumulado definido.

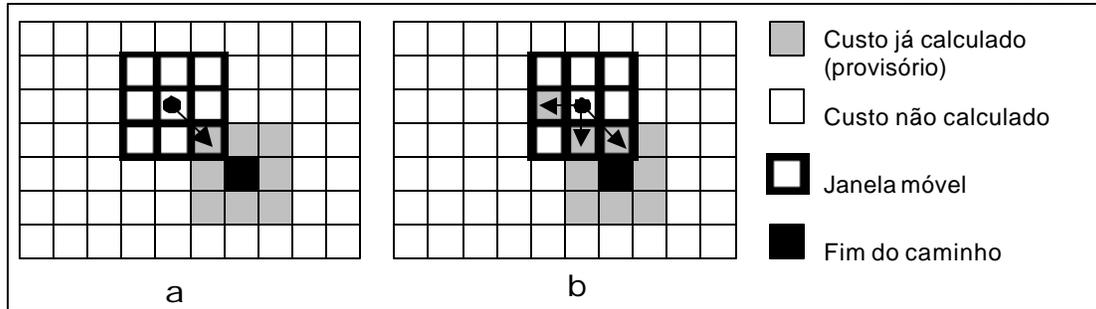


Figura 3.6 Esquema do processo de cálculo numa iteração

Na posição da janela móvel apresentada na Figura 3.6a, o único caminho possível que pode ser avaliado na janela móvel é na direção diagonal para a direita embaixo, que será o caminho escolhido. Tendo como base a numeração de células da Figura 3.5, o custo acumulado a ser atribuído à célula central da janela móvel é o resultado da soma do custo acumulado da célula 9, mais o custo incremental entre as células 5 e 9 (que é diferente do custo incremental entre 9 e 5).

Na posição da janela móvel apresentada na Figura 3.6b, após avançar uma coluna, já existem três caminhos possíveis para o traçado do canal, incluindo o horizontal para a célula da esquerda, cujo custo acumulado foi o último calculado, mas apenas dois que se comunicam com a célula do fim do caminho (célula preta). O algoritmo escolhe a de menor custo acumulado entre estas duas opções.

Ao final da iteração  $k$ , a região formada pelas células com o custo acumulado (provisório) já calculado terá crescido em todas as direções, assumindo a configuração apresentada na Figura 3.7.

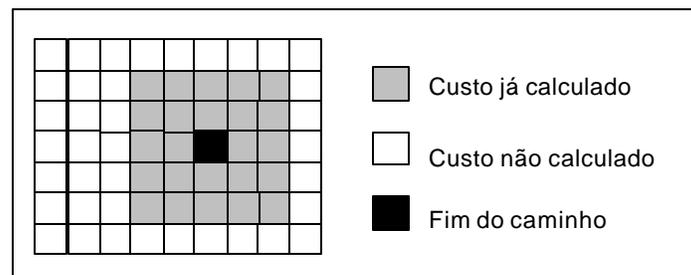


Figura 3.7 Células com o custo acumulado definido ao final da iteração “k”

Os valores dos custos acumulados já definidos estarão sujeitos a modificações. A alteração do custo acumulado em uma célula vizinha, na iteração  $k+1$ , alerta para a necessidade de revisar o custo acumulado da célula central na iteração  $k$ . Como a janela móvel percorre toda a região, todas as células, com exceção das linhas e colunas das bordas externas, são analisadas como célula central da janela móvel uma vez a cada iteração.

O processo de atribuição de custos acumulados encerra quando, entre duas iterações, nenhuma célula sofreu alteração de custo acumulado. Essa situação significa que cada célula já teve seu custo acumulado ótimo definido.

Essa técnica iterativa e a revisão repetida do custo acumulado permitem ao algoritmo a descoberta de trajetórias complexas.

### 3.3. O Paradigma Multiobjetivo

#### 3.3.1. O processo de tomar decisões e a otimização multiobjetivo

Tomar decisões é uma atividade tão cotidiana (e antiga) que poucas vezes se fazem reflexões sobre ela.

Quando é preciso decidir sobre situações futuras desconhecidas e incertas, muitas vezes os decisores realizam essa tarefa de forma intuitiva, esperando que a sorte os ajude. Essa atitude, embora familiar, não é outra coisa que colocar a carroça na frente dos bois.

Dois elementos que distinguem o que se denomina corriqueiramente de “tempos modernos” do resto dos milhares de anos de história da humanidade são o estudo e o domínio do risco.

O avanço do conhecimento científico aplicado ao estudo e ao domínio do risco está estreitamente vinculado à teoria das probabilidades. Já o nascimento dessa última é fixado por alguns autores no momento em que um nobre francês desafiou a Blaise Pascal a resolver um problema conhecido como o “Enigma de Paccioli”, no ano 1654. Anteriormente, a solução de situações incertas era feita com o auxílio de oráculos e pitonisas (Bernstein, 1997).

A evolução posterior dessa ciência, com a Teoria dos Grandes Números, de Jacob Bernoulli, o Teorema de Bayes, os postulados de Daniel Bernoulli, a estrutura da distribuição normal exposta por De Moivre (Gauss apenas desenvolveu a equação da curva que hoje leva seu nome) e os trabalhos de Galton sobre regressão à média, são as sementes da moderna teoria das decisões e do planejamento científico.

A otimização multiobjetivo tem as suas origens nos trabalhos de Edgeworth e Pareto, no final do século XIX (NEOS Guide, 1996). Outros antecedentes que se lhe reconhecem são, entre outros, a Teoria da Utilidade, de Daniel Bernoulli, a Teoria do Bem-estar Social, criada no final do século XVIII a partir dos trabalhos do Marques de Condorcet; a Teoria da Medição Psico-sensitiva; a Pesquisa Operacional, especialmente a Programação Matemática, que tiveram sempre o problema de precisar definir a priori uma função-objetivo a ser otimizada (Jacquet-Lagrèze, 1994?).

Os princípios de negociação para resolver problemas de decisão (tomar decisões) pareceriam pertencer mais às técnicas de resolução de conflitos que à Pesquisa Operacional. A formulação objetiva de um problema de tomada de decisão é complicada pela imprecisão e incertezas inerentes, que criam um ambiente difuso para o decisor.

Os conceitos e definições associados à otimização multiobjetivo, acertados ou errados, tentam objetivar de alguma maneira o subjetivo processo de decisão, rompendo com o mito da decisão ótima no mais puro e abstrato sentido matemático.

Alguns autores definem estes métodos como uma terceira alternativa à eterna dicotomia entre pragmatismo e purismo (Barredo Cano, 1996).

Diferentemente da otimização tradicional, com um único objetivo, onde se maximiza ou minimiza uma função-objetivo única, na multiobjetivo tem que ser otimizado um vetor e isso, em teoria, é impossível: na realidade não existe uma única solução ótima, senão um conjunto de soluções que satisfazem em diferente grau e forma os objetivos escolhidos (Andreu, 1993).

Este é o princípio dos ótimos “paretianos”. Para defini-los é preciso apresentar as soluções viáveis num espaço de decisão diferente, no qual cada objetivo representa uma dimensão. Isto permite visualizar as soluções chamadas **dominantes** e as que não o são (a visualização aplica-se exclusivamente a casos onde as funções-objetivo não sejam mais do que três).

É considerado que uma solução é **dominante** (ou não dominada) quando, para melhorá-la segundo um dos objetivos, necessariamente é piorada segundo pelo menos um dos outros (Braga e Gobetti, 1997; Cohon, 1978; Zionts, 1994?; Duckstein e Szidarovski, 1994).

Conceitualmente, esta é uma boa definição, fácil de ser entendida. Porém, aparecem inconvenientes quando há muito mais variabilidade num objetivo que no outro. Alguns autores têm proposto, para superar esta dificuldade, normatizar a amplitude das variações. Mas, isto implica admitir alguns pressupostos básicos:

- 1) que os valores extremos das oscilações das funções-objetivo podem ser conhecidas a priori, ou bem idealizar algum ótimo total e absoluto, hipotético e inatingível;
- 2) que todos os intervalos de variações segundo os diferentes objetivos têm a mesma importância.

### 3.3.2. Problemas semânticos: a necessidade de um vocabulário comum

Desde o início das pesquisas formais nesta área surgiram conflitos originados nas denominações utilizadas. Estes problemas foram e são de natureza puramente semântica.

É notória a superposição terminológica evidenciada na literatura revisada: um mesmo modelo é considerado por um autor como multiobjetivo, por outro como multicritério e para um terceiro como multiatributo (Barbosa, 1997).

A tomada de decisões multicritério ou multiobjetivo envolve um mundo de conceitos, aproximações e métodos para subsidiar as ações de avaliação, ordenação, hierarquização, aceitação e/ou rejeição de soluções com base em critérios de preferência, expressos através da atribuição de pontos, valores ou níveis de intensidade dessa preferência. Estes critérios podem representar diferentes aspectos da teleologia: objetivos, metas, valores de referência, níveis de aspiração ou utilidade (Colson y De Bruin, apud Barredo Cano, 1996).

Para não cair na armadilha semântica, a seguir serão enunciadas algumas definições que serão utilizadas ao longo de todo o presente trabalho (tomando como base os trabalhos de Braga e Gobetti, 1997, Barbosa, 1997, Nijkam e Voogd, 1994?).

**Objetivos:** são aspectos que têm a ver, ou com uma maximização econômica, ou com uma minimização de impactos (por exemplo ambientais). Representam ideais ou metas globais da sociedade, sobre os quais exista consenso, num momento histórico.

**Propósitos:** são elementos que contribuiriam ou ajudariam a atingir os objetivos e caracterizam uma utilidade imediata.

Observação: alguns autores preferem considerar que cada medida quantitativa para definir a eficácia e/ou eficiência de uma ação é um objetivo.

**Meta:** é uma intenção ou objetivo muito genérico, atendível através de objetivos mais específicos.

**Atributos (ou critérios, ou aspectos):** são os elementos que permitem quantificar em que medida são atingidas as metas (ou, eventualmente, os objetivos).

**Analista:** é a pessoa que avalia em profundidade os problemas e os modelam com um critério objetivo.

**Decisor:** é quem direta ou indiretamente põe os limites aos problemas e especifica os objetivos e os propósitos a serem atingidos, e também os critérios que serão utilizados na avaliação dos resultados. Além disso, é quem no final do processo aceitará ou rejeitará as alternativas de solução obtidas.

Um problema de otimização multiobjetivo pode-se expressar matematicamente da seguinte forma (Barbosa, 1997):

$$\begin{cases} \text{Max } F(y) \\ \text{ST:} \\ y \in Y \end{cases} \quad (2.1)$$

onde:

Y: é o conjunto de alternativas de solução;

y: é uma alternativa particular;

F: é a função ou funcional que reflete as preferências dos decisores.

O analista pesquisa o conjunto “Y”, enquanto o decisor manifesta-se sobre a função “F”.

Segundo as definições dadas anteriormente, pode ser inferido que os problemas de decisão multiobjetivo poderiam ser estruturados segundo uma hierarquia.

Em síntese, os objetivos refletem as aspirações dos decisores em relação a atingir alguma meta. Os atributos serão os elementos que permitam avaliar em que medida estão sendo atingidos os objetivos, ou seja, são as variáveis quantitativas que caracterizam uma decisão.

### 3.3.3. Desde a ótica da Teoria da Decisão

Segundo a Teoria da Decisão, as decisões (seja válida a repetição) podem-se orientar em duas direções (Barredo Cano, 1996):

a) a positiva ou descritiva, e

b) a normativa ou prescritiva.

A primeira orientação é analisada e abordada pela Psicologia e a Sociologia. Estas ciências procuram explicar e predizer o comportamento dos decisores (Romero y Eastman et al, apud Barredo Cano, 1996).

A outra orientação trata de deduzir como e qual deveria ser o comportamento ótimo dos decisores, partindo da suposição do comportamento racional deles. Para isto se desenvolvem e se aplicam técnicas, principalmente de tipo lógico-matemáticas, para facilitar a tarefa dos tomadores de decisões. O presente trabalho foi orientado para este tipo de enfoque do assunto.

#### 3.3.4. O enfoque normativo

O paradigma da decisão multiobjetivo/multicritério aparece em cena na década de 1970. Os trabalhos pioneiros abordavam os problemas segundo a seguinte seqüência: primeiro determinavam o conjunto de decisões viáveis; seguidamente, cada uma delas era valorada segundo algum critério, para estabelecer sua “desejabilidade”; finalmente, aplicando técnicas matemáticas, às vezes muito elegantes (mas sempre muito complicadas), determinavam as alternativas mais desejáveis segundo cada um dos critérios de avaliação adotado.

O problema com esta abordagem é que perante a necessidade real de tomar uma decisão, o encarregado dessa tarefa deve avaliar conjuntamente mais de um critério e, inclusive, vários objetivos.

Acontece que, na maioria das vezes, os decisores reais são pessoas alheias ao ambiente acadêmico e não possuem conhecimentos profundos de matemática, o que origina uma rejeição por este tipo de abordagens. O que fazer ante atitudes assim?

Objetivamente, se o comportamento de alguma coisa sobre a qual há que tomar uma decisão é totalmente desconhecido (o que no final das contas constitui a única certeza que se tem sobre o futuro), uma decisão totalmente aleatória poderia ser aconselhável (Ventsel, 1983). Isto que parece ser uma atitude descabida foi pratica comum dos reis, imperadores e gerais da antiguidade: evidentemente, sendo muito pouco elegante ver a estes ilustres jogar os dados antes de tomar as suas decisões; por tal motivo, recorriam a consultar oráculos e pitonisas que, com seus conselhos, quase sempre vagos, introduziam a dose de aleatoriedade necessária nas decisões (Bernstein, 1997).

Apesar das críticas que possam ser feitas, os modelos e técnicas de decisão multiobjetivo/multicritério oferecem a oportunidade de realizar uma análise equilibrada de todas as facetas de um problema de planejamento, especialmente das inatingíveis, como as sociais ou ambientais (Nijkamp e Van Delft, apud Barredo Cano, 1996).

Nas decisões a serem tomadas no contexto de espaços geográficos os modelos e técnicas multiobjetivo/multicritério não mostraram um avanço importante, talvez por não ter sido concebidas para este tipo de problemas (Eastman et al, apud Barredo Cano, 1996).

Com referência a isto último, Fandel e Spronk (1994?) opinam que os que estudam o problema das decisões multiobjetivo/multicritério têm concentrado muitos esforços no desenvolvimento de algoritmos (e as vezes heurísticas), utilizando problemas para ilustrar a aplicabilidade deste métodos. Estes autores não opinam que esta seja uma tendência incorreta, senão que talvez seja desejável uma abordagem mais orientada ou dirigida aos problemas, o que poderia redundar num verdadeiro e duradouro casamento entre as técnicas de decisão multiobjetivo/multicritério e os sistemas de apoio à decisão.

Embora as limitações mencionadas, há trabalhos que abordaram o difícil desafio. Por exemplo, Souza (1999) em sua tese de doutorado apresentou um trabalho cujo espírito foi integrar os SIG e os métodos multicritério de apoio à decisão. Ele estudou o problema da disposição final dos resíduos sólidos na Região Metropolitana de Porto Alegre – Brasil e analisou todo o processo decisório, desde a estruturação do problema e a operacionalização dos diferentes pontos de vista dos possíveis decisores, até a hierarquização das alternativas de locação dos depósitos finais. Isto requereu um trabalho prévio de geoprocessamento para coletar e manipular os atributos espaciais do terreno das áreas analisadas. A metodologia multiobjetivo/multicritério empregada foi a conhecida como Macbeth, à qual se fará referência posteriormente.

### 3.3.5. A institucionalização do planejamento multiobjetivo dos recursos hídricos

Os Estados Unidos da América do Norte foi o primeiro país que institucionalizou o planejamento multiobjetivo de seus recursos hídricos (Cohon, 1978).

Na década de 1960 a Administração Kennedy criou o Water Resources Council (WRC) para revisar os métodos empregados no planejamento dos recursos hídricos deste país. Finalmente, depois de quase uma década de estudos, o WRC elaborou o que é conhecido como “Princípios e Padrões” para o planejamento hídrico.

Estes “Princípios e Padrões” estabelecem que devem ser estudados em detalhe, no mínimo, a maximização da eficiência econômica e da qualidade ambiental nos processos de planejamento dos recursos hídricos, o que representou um grande avanço com referência à até então, tradicional análise da relação benefício/custo.

Porém, depois de transcorrido um quarto de século deste fato auspicioso e, embora exista um interesse crescente nos métodos multiobjetivos/multicritérios, na prática nota-se que sua utilização fora do contexto acadêmico não é comum (Baltar e Cordeiro Neto, 1998a).

### 3.3.6. Métodos de otimização multiobjetivo/multicritério

Segundo Barbosa (1997) existe, ao menos, meia centena de métodos e técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério.

Estes métodos poderiam ser classificados a priori em três grandes grupos (Cohon, 1978; Barbosa, 1997; Cohon y Marks, 1975; Braga y Gobetti, 1997):

- a) técnicas que geram um conjunto de soluções não dominadas;
- b) técnicas que incorporam preferências a priori dos decisores (não interativas);
- c) técnicas que utilizam uma articulação progressiva de preferências (interativas).

Uma quarta categoria que se poderia incorporar é a seguinte:

d) técnicas baseadas em “distâncias”.

a) Técnicas que geram um conjunto de soluções não dominadas

Estas técnicas consideram apenas as restrições físicas do problema. Baseiam-se no princípio de otimalidade enunciado por Pareto em 1896, segundo o qual “os indivíduos têm a máxima satisfação numa certa situação quando é impossível sair dessa situação sem que alguns tenham sua satisfação diminuída e outros a tenham aumentada” (Barbosa, 1997). Baseiam-se também nas condições de Kühn-Tucker para a definição de soluções não inferiores.

Durante o processo não são consideradas as preferências do decisor e o analista deve tratar apenas com as restrições físicas do problema (Braga y Gobetti, 1997).

Pertencem a esta classificação, entre outros:

- o método das ponderações;
- o método das restrições;
- o método NISE, ou de estimativa de um conjunto não inferior;
- a programação linear multiobjetivo.

Almeida e Bond (1991) apresentaram a seleção de alternativas de localização de usinas hidrelétricas na bacia do rio Doce-Brasil, numa fase de inventário. Consideraram como objetivos a maximização da eficiência econômica, a qual avaliaram através de uma relação custo/benefício, e a minimização dos efeitos ambientalmente negativos, utilizando como atributos ou descritores quatro índices de impacto ambiental. As pontuações de cada uma das 48 alternativas avaliadas foram graficadas num espaço de decisão bidimensional (uma dimensão por

objetivo). A escolha das alternativas mais convenientes segundo o conceito paretiano foi feita por simples análise visual do gráfico mencionado.

Cohon e Marks (1973) apresentaram um exemplo de aplicação deste método ao planejamento de um rio hipotético, considerando objetivos regionais e nacionais. A obtenção de ótimos segundo cada um dos objetivos foi feita aplicando um modelo linear. A análise dos “trade offs” entre os objetivos foi feita utilizando o método das restrições, que considera que a parametrização dos elementos do vetor de recursos (right hand side) da formulação linear é mais eficiente que os pesos ponderados para gerar o conjunto de soluções não inferiores.

Estes métodos têm uma carga conceitual matemática muito importante. Em geral são muito laboriosos e requerem um processamento tal que, na prática, os tomadores de decisões reais tendem a duvidar deles e a não aplicá-los.

#### b) Técnicas que incorporam preferências a priori dos decisores

Estas são as técnicas mais utilizadas na prática e requerem que os decisores se pronunciem a priori sobre as suas preferências, mas não existe depois interação entre estes e o analista. O rol que cabe a este último é semelhante ao que acontece no grupo anterior.

Pertencem a esta classificação, entre outros:

- técnicas que utilizam funções de utilidade multiatributo;
- técnicas que atribuem pesos ou ponderações a priori;
- os métodos Electre (1 a 3 e as variantes 4 a 6);
- o método Promethee;
- método do valor substitutivo de intercâmbio;
- método da Análise Hierárquica (Saaty, 1991);
- método Macbeth (Bana e Costa e Vansnick, 1995; Souça, 1999; Schmidt, 1995).

Goicochea et al (1979) apresentaram um exemplo de aplicação que utiliza a função utilidade multiatributo para avaliar a possibilidade de melhorar e manejar segundo um esquema multiobjetivo 5.700 ha que seriam afetadas pela exploração de uma jazida a céu aberto de carvão durante 30 anos.

Braga (1985) realizou um interessante trabalho para a previsão de vazões afluentes para operar a barragem Ponte Nova (SP–Brasil), localizada no rio Tietê, aplicando a função utilidade multiatributo. Esta barragem deveria cumprir a dupla função de abastecimento de água (uso urbano e para irrigação) e proteção contra enchentes. Dado o conflito de usos, era importante prever as vazões afluentes do período chuvoso (novembro a abril). O modelo multiobjetivo utilizado formava parte de um modelo de decisão que utilizou, numa primeira etapa, a PD determinística para definir a operação do reservatório, sendo a função-objetivo uma função utilidade multidimensional multiplicativa. Por tal motivo, os resultados foram fortemente dependentes das previsões das vazões afluentes e da precisão das mesmas. Este modelo utilizou as preferências do decisor de forma explícita.

O mesmo problema apresentado por Almeida e Bond (1991), já descrito anteriormente, foi abordado por Braga et al. (1991), com a diferença que a seleção e ordenamento das alternativas escolhidas foram feitas aplicando uma variante do Método da Análise Hierárquica. Para a definição dos pesos a atribuir a cada uma das alternativas e a cada critério utilizaram o método dos mínimos quadrados ponderados. Finalmente, fizeram uma análise de sensibilidade considerando três cenários plausíveis: 1) com uma preferência absoluta da eficiência econômica sobre a questão ambiental; 2) sem uma preferência marcada por uma ou outra questão; e 3) com preferência absoluta da questão ambiental.

Na literatura técnica revisada, o método que aparece como o mais utilizado é o Electre, desenvolvido por Benayoun et al. e por Roy et al. (Natchnebel, 1991?), talvez porque permite manejar critérios quantitativos ou qualitativos, para elaborar um ranking das alternativas analisadas através de comparações paritárias entre as mesmas. Cabe salientar que o método só pode ser aplicado a um conjunto discreto de alternativas.

Baltar e Cordeiro Netto (1998) utilizaram o Electre 3 para estudar como poderia ser estabelecida uma ordem de hierarquia de 8 projetos de aproveitamentos hídricos a serem executados através do Programa de Desenvolvimento Sustentável de Recursos Hídricos para o Semi-Árido Brasileiro–PROÁGUA. Os projetos foram

avaliados segundo seis critérios, que contemplaram aspectos econômicos, sociais, políticos, técnicos e ambientais. Ademais, consideraram dois tipos de comportamento plausíveis do eventual decisor: 1) comportamento mais político, dando mais peso aos aspectos sociais, e 2) comportamento mais técnico, dando mais peso aos critérios econômicos.

Posteriormente, em outro trabalho, os mesmos autores realizaram uma análise de sensibilidade dos resultados obtidos, segundo três critérios: 1) análise individual por critério para cada alternativa; 2) análise individual de cada critério; e 3) análise de sensibilidade aleatória. Toda análise de sensibilidade permite delimitar de certa forma os riscos inerentes à tomada de uma decisão. Por isto, um dos objetivos dessa análise de sensibilidade foi procurar que na hora de decidir, o encarregado dessa tarefa tivesse mais segurança e menos dúvidas.

Outra aplicação ao planejamento de recursos hídricos do Electre 3 pode-se encontrar em Nachtnebel (1991?). Este trabalho mostra a aplicação do método para decidir sobre a localização de uma usina hidrelétrica no rio Danúbio, analisando cinco possíveis sítios de localização, quatro objetivos (hidroeletricidade, melhora da economia nacional, melhora das condições de navegabilidade e preservação de áreas úmidas) e sete critérios (geração de energia, potência instalada, custo, número de exclusas, superfície do lago, superfície de áreas úmidas afetadas e longitude de trechos do rio a serem inundados).

Pilar et al. (2002) e Pilar (2003) utilizaram o Método da Análise Hierárquica para estabelecer uma ordenação hierárquica de três alternativas de localização de uma obra de controle na foz do rio Negro na cidade de Resistencia (Argentina). Foram levados em conta 6 atributos ou aspectos considerados relevantes para a definição deste problema.

### c) Técnicas que utilizam uma articulação progressiva de preferências

Estas técnicas requerem uma interação permanente entre analista e decisor, o que permite incorporar informação adicional durante todo o processo decisório (Kindler, 1991?). Baseiam-se em utilizar um procedimento de prova e erro para atingir a solução de melhor compromisso. Pertencem a este grupo os denominados métodos que utilizam trade-offs.

Kindler et al. (1991?) utilizaram este tipo de metodologia para definir a alocação de água para diferentes usos, levando em consideração cinco funções-objetivo (maximização da produção de grãos, minimização do déficit na provisão de água para consumo humano, minimização da variação da vazão regularizada por uma barragem do sistema, minimização da variação do volume armazenado nesta barragem -para garantir a viabilidade de recreação- e minimização da concentração de poluentes num ponto de controle).

Tyszewski e Zielinski (apud Kindler, 1991?) também apresentaram um exemplo de utilização dessa técnica. O caso analisado refere-se ao planejamento do controle em tempo real da descarga de uma barragem para abastecimento de fábricas, cujos efluentes seriam tratados nas próprias plantas, procurando manter um nível aceitável de armazenamento no reservatório. Os objetivos considerados foram: 1) abastecimento de água para as fábricas; 2) manutenção de uma vazão mínima no rio (vazão ecológica); e 3) garantia de qualidade d'água do rio a jusante da descarga da planta de tratamento. Utilizaram previsões hidrológicas de longo prazo (2 meses), médio prazo (15 dias) e curto prazo (2 dias).

#### d) Técnicas baseadas em "distâncias"

Estas técnicas baseiam-se no pressuposto que existe um ótimo global, real ou hipotético, que pode ser conhecido a priori. Duckstein e Szidarovszky (1991?) as incluíram no grupo das técnicas que incorporam preferências a priori dos decisores (item b), pois consideram que requerem de uma definição de preferências a priori. Os resultados são obtidos através de diferentes técnicas, como a solução mini-max, distância ponderada, mínimos quadrados, Nash-Harsanyi, etc.

Podem ser consideradas dentro dessa categoria:

- a programação de metas;
- a programação de compromisso.

Baltar e Cordeiro Netto (1998) utilizaram a Programação de Compromisso como alternativa para resolver o problema do PROÁGUA brasileiro, comentado anteriormente.

Por sua vez, Goicochea, Duckstein e Fogel (1976), apresentaram a utilização de uma técnica semelhante à Programação de Metas para planejar o uso da bacia do rio São Pedro, pertencente à bacia do Charleston em Arizona, Estados Unidos. Consideraram cinco funções-objetivo a serem maximizadas (incremento do escoamento, benefícios recreacionais, manutenção das condições naturais da área, benefícios comerciais e controle de sedimentos), levando em consideração dezoito restrições lineares e não lineares.

### 3.3.7. Reflexões sobre os métodos multiobjetivo/multicritério

O Electre em todas as suas versões aparece na bibliografia consultada como o método mais utilizado em trabalhos científicos sobre otimização multiobjetivo-multicritério, talvez porque a elegância da sua lógica seja sedutora para os pesquisadores. Porém, os índices de concordância e de discordância que utiliza não são fáceis de entender por pessoas alheias aos ambientes acadêmicos, em especial pelos políticos encarregados de tomar decisões, o que é um motivo forte para que estas pessoas tenham a tendência de rejeitar este método.

O método Promethee, que poderia ser considerado uma espécie de filho do Electre, teria condições para superar a mencionada reação negativa para este método pelo fato de não utilizar os mencionados índices de concordância e de discordância. Porém, utiliza os denominados “fluxos de superação”, positivos, negativos e líquidos, que complicam o entendimento e aceitação do método, embora sua lógica também seja impecável.

Finalmente, qualquer das técnicas ou métodos multiobjetivo/multicritério poderiam ter servido aos fins da realização da presente tese. No entanto, a robustez conceitual e matemática que apresentam o MAH e o Macbeth, e a semelhança que alguns dos políticos tomadores de decisões consultados encontraram com as medidas de eficiência econômica tradicionais, do tipo relação benefício/custo ou

diferencia benefício-custo (benefício líquido), os fatores determinantes para que sejam estes os tipos de métodos a serem aplicados nesta pesquisa.

A técnica Macbeth tem um problema: para ser aplicado de imediato seria preciso dispor do código computacional elaborado por Banna e Costa, que não é gratuito, enquanto o MAH pode ser implementado utilizando apenas uma planilha eletrônica tipo Excel. Por tal motivo, não foi utilizado o método Macbeth.

A Programação de Compromisso, ao se basear no conceito de distância a um ponto considerado ideal, também poderia ser de fácil compreensão pelos tomadores de decisões consultados a propósito desta pesquisa. Embora estes não tenham sido interrogados sobre este método, a sua abordagem quase intuitiva foi o motivo pelo qual ele foi utilizado no presente trabalho.

### 3.3.8. Os métodos empregados neste trabalho

#### i. O método da análise hierárquica (MAH)

Escolher uma opção entre varias possíveis, e levando em consideração vários aspectos, além de uma tarefa difícil, é uma fonte de conflitos potenciais.

Quando num processo decisório várias alternativas são consideradas por uma pessoa ou grupo de pessoas, elas, em princípio, tentarão desenvolver um juízo sobre a importância relativa dessas alternativas.

Uma analogia válida é supor que estes juízos são, de alguma maneira, o resultado de comparar medidas físicas muito precisas, como por exemplo pesos (Saaty, 1991) e encontrar estes pesos não é trivial nem tarefa fácil. Comparar (pesar) ao mesmo tempo todas as alternativas entre si é uma tarefa praticamente impossível. Mas é possível realizar comparações “paritárias” entre elas, ou seja de duas a duas. Se o resultado dessas comparações é lançado em uma matriz, se terá algo semelhante ao mostrado na Figura 3.8.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.8 Matriz das comparações paritárias entre alternativas

Na matriz “A” da Figura 3.8, “ $a_{12}$ ” representa a importância relativa entre a alternativa “1” e a “2”. Por tanto, esta matriz “A” será recíproca, ou seja, o que fica por acima da diagonal principal será recíproco o do que fica por baixo da mesma.

Se na matriz “A” cada elemento “ $a_j$ ” é trocado pela relação que ela representa, entre os pesos “ $w_i$ ” e “ $w_j$ ”, se terá uma matriz como a mostrada na Figura 3.9.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix}$$

Figura 3.9 Interpretação da matriz de comparações paritárias

Não se espera que um equacionamento semelhante seja feito cada vez que uma decisão venha ser tomada. Porém, se é esperado que o juízo seja equânime, o processo de decisão não deveria afastar-se muito disto.

Continuando com o raciocínio, considere-se a linha “i” da matriz “A” mostrada na Figura 3.9:  $a_1 ; a_2 ; \dots ; a_j ; \dots ; a_n$ . Se multiplica-se o primeiro elemento dessa linha por “ $w_1$ ”, o segundo por “ $w_2$ ”, e assim adiante, se terá o seguinte:

$$\frac{w_i}{w_1} \cdot w_1 = w_i \quad \frac{w_i}{w_2} \cdot w_2 = w_i \quad \dots \quad \frac{w_i}{w_j} \cdot w_j = w_i \quad \dots \quad \frac{w_i}{w_n} \cdot w_n = w_i \quad (3.1)$$

Se o mesmo for feito com os juízos reais (já não com os ideais), se terá uma linha (vetor linha), cujos elementos representariam a **dispersão estatística** do juízo elaborado sobre o valor de “ $w_i$ ”. Então, parece razoável utilizar como estimativa de “ $w_i$ ” à **média** destes valores (Saaty, 1991).

$$\text{Caso ideal:} \quad w_i = a_{ij} \cdot w_j \quad (\text{para } i \text{ e } j \text{ variando de } 1 \text{ até } n) \quad (3.2)$$

$$\text{Caso mais real:} \quad w_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j \quad (3.3)$$

Supondo que se tenha uma matriz “A”, integrada por juízos (comparações) “precisos” e outra matriz “A’”, que seja uma estimativa aproximada de “A”, se poderá escrever o seguinte:

$$A' \cdot w = \lambda_{MAX} \cdot w \quad (3.4)$$

Se pode demonstrar que, no caso em que a “A’” seja uma matriz consistente, ou seja com juízos ou ponderações coerentes, a equação (2.4) tem solução única e nela “ $\lambda_{MAX}$ ” é o maior **autovalor** de “A’”, enquanto que “w” é seu **autovetor**. Este autovetor será o “vetor de prioridades” das alternativas que estão sendo analisadas, segundo os critérios utilizados na elaboração das comparações.

É possível perceber que, quanto mais semelhante seja “ $\lambda_{MAX}$ ” ao número de alternativas sendo comparadas (n), mais consistente será o juízo de valor que foi elaborado. Além do mais, se pode demonstrar que sempre será  $\lambda_{MAX} \geq n$ .

O desvio da consistência pode ser representado pelo seguinte índice:

$$IC = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1} \quad (\text{índice de consistência}) \quad (3.5)$$

O inventor do método (Thomas Saaty) e outros pesquisadores deste tema geraram aleatoriamente matrizes como a “A”, **estritamente recíprocas**, de

diferentes tamanhos, e estimaram as médias dos seus “IC” , que foram classificados segundo o tamanho da matriz. Este índice foi chamado de “índice randômico” (IR).

A relação entre “IC” e “IR” foi chamada de “relação de consistência” (RC) e se o seu valor é menor o igual do que 0,10 se considera que a matriz dos juízos de valor é coerente, respeitando todas as relações transitivas do tipo: se a alternativa “i” tem um peso superior à “j” e, por sua vez, esta tem um peso superior à “k”, a “i” deve ser mais “pesada” que a “k” (Saaty, 1991, Romero, 1996).

## ii. A programação de compromisso

O método, desenvolvido por Zeleny, em 1973, considera vários objetivos e baseia-se em que existe um ponto ou alternativa ideal, comumente, inatingível, que conjuga os melhores resultados segundo os objetivos avaliados. Se ele fosse atingível, seria a solução ótima. Mas, como normalmente não é, a solução de “melhor compromisso” (a mais eficiente) será aquela que tiver a menor distância ao ponto ideal, o que é conhecido como axioma de Zeleny (Romero, 1996).

Então, para cada objetivo é preciso calcular a distância ao ponto ideal:

$$d_j = [f_j^* - f_j(\bar{x})] \quad (3.6)$$

onde a diferença indicada entre colchetes é o grau de proximidade entre o objetivo  $j$ -ésimo ( $f_j(x)$ ), para um vetor “ $\bar{x}$ ” das variáveis de decisão, e o seu valor ideal ( $f_j^*$ ), sendo  $f_j^* = \text{Max } f_j(\bar{x})$ .

Dependendo das variabilidades que podem existir entre as diferentes funções objetivos, as diferenças calculadas aplicando a equação 3.6 deveriam ser “normalizadas”, por exemplo dividindo-a pela diferença entre o valor ideal e o anti-ideal:

$$d_j = \frac{[f_j^* - f_j(\bar{x})]}{[f_j^* - f_{i,j}]} \quad (3.7)$$

onde “ $f_j$ ” é o mencionado anti-ideal. Portanto, o resultado da equação 3.7 variará entre 0 e 1.

Se definido como “ $w_j$ ” a importância que o decisor atribui ao objetivo  $j$ -ésimo, a solução de melhor compromisso surgirá do seguinte problema de otimização (Romero, 1996):

$$\text{Min } \bar{x}_\pi = \left[ \sum_{j=1}^n w_j^\pi \cdot \left( \frac{[f_j^* - f_j(\bar{x})]}{[f_j^* - f_{*,j}]} \right)^\pi \right]^{1/\pi} \quad (3.8)$$

O parâmetro “ $\pi$ ” estabelece a métrica que define a família de funções de distância, ou seja, para cada valor de “ $\pi$ ” se terá uma distância. A distância tradicional euclidiana é um caso particular da equação 3.8, na qual  $\pi = 2$ .

A aplicação deste método não é imediata para um problema como o abordado nesta pesquisa. Portanto, foi preciso fazer algumas mudanças, as quais serão apresentadas no capítulo correspondente à metodologia empregada.

### 3.4. Conceitos básicos da teoria de conjuntos difusos

Durante o preenchimento das matrizes de comparações paritárias do MAH foi percebido certo desconforto nos tomadores de decisões reais consultados na hora de ter que atribuir uma pontuação precisa, de preferência inteira, às relações entre atributos ou aspectos sendo comparados. A dúvida típica é se o valor é exatamente “ $n$ ” ou “ $n-1$ ” ou “ $n+1$ ”.

Os conceitos da lógica difusa permitem levar em consideração estas dúvidas durante o processo decisório. A seguir, serão apresentados alguns conceitos breves e introdutórios à teoria dos conjuntos difusos, sem se aprofundar muito neles. As noções de conjuntos difusos foram consideradas neste trabalho, na fase de otimização multiobjetivo/multicritério, como recurso conceitual para orientação de parte das análises.

Um conjunto difuso tem uma particularidade que o faz diferente de um conjunto clássico: os seus elementos podem ter pertinência parcial. (Na teoria clássica de conjuntos os elementos ou pertencem ou não pertencem a um dado conjunto.)

O grau de pertinência é a certeza que se tem com relação ao fato de um elemento pertencer a esse conjunto difuso. A mesma é definida com um número real, que varia entre 0 e 1: quando existe certeza total de que o mesmo pertença ao conjunto é utilizado o 1. Por outro lado, quando tem-se a certeza que o mesmo não pertence ao conjunto, utiliza-se o 0 (Pedrollo, 2000, Galvão, 1999, Vieira, 1996, Sakawa, 1993).

Estas características dos conjuntos difusos os tornam especialmente aptos para descrever expressões que representam situações ou condições comuns, que mal poderiam ser definidas com uma variável numérica, como por exemplo “a água está suficientemente quente para fazer chimarrão”. Estas expressões costumam ser denominadas de “variáveis lingüísticas”.

Para utilizar adequadamente as expressões da lógica difusa serão definidos a seguir alguns conceitos básicos (segundo Vieira, 1996):

- **Conjunto difuso:** Sendo “X” uma coleção de elementos “x”, a definição formal de um conjunto difuso “ $\tilde{A}$ ” é a seguinte:

$$\tilde{A} = \{ [x, \mu_{\tilde{A}}(x)] \mid (x \in X) \} \quad (3.9)$$

no qual, “ $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ” é a função de pertinência de “x” em “ $\tilde{A}$ ”, que normalmente tem como limite inferior 0, e como limite superior 1. Com estes limites, o conjunto é denominado normalizado ou normal.

- **Conjunto difuso convexo:** Se a função de pertinência “ $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ” é convexa, o conjunto será um conjunto difuso convexo.

- **Número difuso:** Um número difuso é um conjunto difuso normal e convexo. Pode ser interpretado como uma generalização do intervalo de confiança.

Um número difuso é um dado subjetivo e não deve ser entendido como uma variável aleatória: é uma estimativa e não uma medida (Kaufman e Gupta, apud Vieira, 1996). Por tal motivo, é costume que os métodos relacionados com a lógica difusa sejam definidos como “possibilísticos” (Galvão, 1999).

Mas, os métodos “difusos” deveriam ser considerados como complementares e não como substitutivos dos métodos probabilísticos. Estes métodos permitem lidar com um tipo de incerteza cuja natureza é diferente da incerteza de origem.

### 3.5. A abordagem conjunta: caminhos de mínimo custo, otimização multiobjetivo e a teoria de conjuntos difusos

#### 3.5.1. Limitações dos métodos de cálculo de caminhos de mínimo custo

Os métodos avaliados neste trabalho, tanto os que calculam caminhos de mínimo custo em ambiente vetorial como em ambiente raster, utilizam uma função-objetivo única e definida a priori. Porém, a definição da função-objetivo não é trivial num trabalho de planejamento e de sua correta escolha depende o sucesso dessa tarefa.

Mais ainda, os trabalhos consultados não apresentaram, em geral, pesquisas exploratórias no sentido de montar a/as função/ões objetivo/s de forma tal que refletissem o caráter multiobjetivo/multicritério de todo processo decisório.

A incorporação do paradigma multiobjetivo/multicritério à determinação de caminhos de mínimo custo é, certamente, uma linha de pesquisa que poderia (deveria?) ser aprofundada.

#### 3.5.2. A abordagem conjunta

De tudo o que foi apresentado nos dois capítulos anteriores pode-se concluir que, sem dúvidas, a pesquisa no campo dos SIG e da otimização

multiobjetivo/multicritério é abundante, existindo uma grande quantidade de trabalhos e aplicações.

Inclusive, o estudo dos chamados caminhos de mínimo custo não é um tema novo, embora as publicações nesta área sejam menos numerosas.

Porém, se pode observar uma dicotomia entre ambos campos de estudo, destacando-se alguns trabalhos isolados e que representam um importante esforço por enlaçá-os. Mas, o tratamento do problema dos caminhos de mínimo custo através de SIG também parte da definição a priori da função-objetivo, o que é uma fonte de tendenciosidade para os resultados obtidos.

Existem também alguns trabalhos que juntam a otimização multiobjetivo/multicritério e os conjuntos difusos, como os de Sakawa (1993) e o de Chang e Cheng (1997).

Embora tenham sido expressas há mais do que sete anos, as apreciações de Eastman et al. (apud Barredo Cano, 1996) servem para sintetizar a situação atual do tema em estudo. Segundo estes autores, para apoiar os processos de decisão num contexto espacial geográfico, os modelos e técnicas multiobjetivo/multicritério não mostraram um avanço importante, talvez porque não foram concebidos para este tipo de problemas. O esquema apresentado por Collischonn e Pilar (2000) representa um interessante passo à frente neste sentido.

Vale a pena repetir aqui os conceitos de Fandel e Spronk (1994?), já mencionados anteriormente. Estes autores opinam que até agora tem sido feito muito esforço em desenvolver algoritmos e/ou heurísticas para abordar e resolver questões sobre decisões, utilizando problemas mais ou menos reais para ilustrar sua aplicabilidade. Segundo eles, talvez já seja tempo de começar com pesquisas mais orientadas a problemas. Parafrazeando o Professor Lanna, pareceria que as pesquisas buscam desenvolver remédios genéricos, para depois procurar doenças que possam ser curadas por eles, e já seria hora de apostar um pouco mais forte no desenvolvimento de remédios à medida do surgimento de doenças reais.

## 4. METODOLOGIA

---

*Não podemos fazer tudo ao mesmo tempo, mas podemos fazer alguma coisa imediatamente.*

*Graffiti de rua*

### 4.1. Considerações gerais

Planejar obras de engenharia certamente não é simples, pois sempre existirão na sociedade diferentes pontos de vista sobre o problema que se pretende solucionar e, também, diferentes interesses. Portanto, faz-se necessário a aplicação do paradigma multiobjetivo/multicritério.

O traçado de obras com características lineares num espaço geográfico tem um número muito grande (infinito?) de soluções. No entanto, cada uma delas conseguirá satisfazer de maneira diferente às expectativas e anseios dos vários setores da sociedade, destinatária e beneficiária final destes empreendimentos.

Neste contexto, os sistemas de informação geográfica (SIG), quando utilizado um formato raster, permitem fragmentar espacialmente o problema e permitem também atribuir a cada célula espacial características (quantitativas e/ou qualitativas), segundo cada um dos aspectos considerados relevantes na definição e solução do problema. Os SIG têm capacidade para, finalmente, reorganizar e sintetizar esta atomização.

A combinação de SIG e técnicas multiobjetivo/multicritério normalmente utiliza estas últimas para hierarquizar as soluções obtidas. No entanto, a incorporação do paradigma multiobjetivo/multicritério desde o início, para tentar obter um traçado ótimo segundo vários aspectos ou pontos de vista, é uma linha de pesquisa ainda pouco explorada.

O trabalho que aqui se apresenta, embora orientado à solução de um problema específico, foi propositivo, no sentido que foram desenhados esquemas de

cálculo que ampliam a utilização das técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério e que, ademais, servem de remendo para as fendas que, segundo alguns trabalhos consultados, apresentam algumas dessas técnicas.

No caso das defesas de Resistencia, num outro trecho diferente do qual serviu para testar a metodologia desenvolvida nesta pesquisa e para checar a aceitação dos tomadores de decisões reais das abordagens multiobjetivo/multicritério, foi aplicado, anteriormente, o conhecido como Método da Análise Hierárquica para selecionar um traçado entre três possíveis alternativas (Pilar et al., 2002). Foi explorada inclusive a aplicação de um esquema de relaxamento difuso (Pilar, 2003) para esta escolha. A metodologia desenvolvida no trabalho que se apresenta, e que será descrita a seguir, poderia, no entanto, ser aplicada a outras situações onde fosse necessário conciliar diferentes pontos de vista ou interesses.

O desenvolvimento desta metodologia foi dividido em quatro partes bem diferenciadas: a primeira, onde se procuraram os caminhos de mínimo custo econômico e ambiental; a segunda, onde foram aplicados métodos de otimização multiobjetivo/multicritério, levando em conta aspectos econômicos, ambientais e políticos; a terceira, onde foram introduzidos relaxamentos difusos; e a quarta, na qual foi feita uma análise de sensibilidade com referência à discretização espacial da informação. Com exceção desta última, na qual a informação foi discretizada em células de 60m x 60m, nas anteriores foram utilizadas células de 30m x 30m.

Como já foi colocado anteriormente, um dos objetivos foi a utilização de ferramentas computacionais de ampla difusão, como a planilha de cálculo Excel e o programa Idrisi.

#### 4.2. Mapas de atrito

Através de consultas com os reais tomadores de decisões, foi estabelecido que na escolha do traçado desta defesa seriam relevantes, pelo menos, três aspectos: o econômico, o ambiental e o político. Portanto, elaboraram-se mapas que refletissem o atrito provocado por cada um deles.

Poderiam ter sido analisados aspectos adicionais, mas os decisores reais consultados não estavam seguros de quais outros poderiam ser incluídos e

analisados (o fato de ter avaliado apenas três não deve ser considerado como uma limitação da metodologia proposta neste trabalho).

Para poder fazer uma comparação numa mesma métrica de aspectos tão diferentes como os analisados, foi desenvolvido um esquema de “patamares de indiferença” que será descrito a seguir. Com este esquema foram elaborados três mapas de atrito: econômico, ambiental e político.

O esquema de patamares de indiferença adotado é um artifício que permite automatizar alguns processos de comparações, típicos das técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério, eliminando a necessidade de apreciações subjetivas por parte dos decisores, como as comparações paritárias. Este mostrou ser um esquema eficaz e eficiente, o que pode ser avaliado nos seguintes trabalhos: Pilar (2000), Pilar et al. (2002) e Pilar (2003).

#### 4.2.1. Mapa de atrito econômico

O atrito gerado pelo custo econômico da construção de um aterro para defesa contra enchentes tem, pelo menos, duas componentes: o custo de construção propriamente dito e o custo do transporte do material.

Para fazer a estimativa do custo de construção se utilizou o MNT. O layout deste aterro, definido pelas autoridades do Governo da Província do Chaco, exigia uma cota de acabamento de 54m MOP, uma largura superior de 8m e um talude de 1:3 (vertical:horizontal). Então, foi calculada a seção do aterro por pixel, em função da sua elevação, obtida do MNT.

Para considerar a outra componente do custo foi elaborado um mapa de distâncias de cada pixel às jazidas. No entanto, devido ao fato que oficialmente a unidade de volume de aterro é faturada por metro cúbico de material finalmente colocado, este mapa não foi considerado neste trabalho.

Sempre é conveniente que todos os mapas que representam atritos sejam elaborados utilizando uma única métrica ou escala que permita sua comparação. Embora Saaty (1991) considere que esta escala deve variar entre um mínimo de 1 e um máximo de 9, no intuito de tornar o modelo de apoio à decisão elaborado nesta pesquisa mais compreensível pelos tomadores de decisões reais, a escala adotada

variou de 1 até 10, semelhante à escala adotada para qualificar corriqueiramente qualquer exame escolar.

Uma questão importante foi a adoção dos limites superior e inferior. O esquema adotado foi: situação mais conveniente, pontuação 1; situação menos conveniente, pontuação 10 (pois seriam calculados caminhos de mínimo custo ou, como indicado na bibliografia específica, least-cost-path).

Estes limites inferior e superior são os que, no contexto deste trabalho, foram denominados “patamares de indiferença”. A variação da pontuação entre os extremos foi adotada como linear o que, no caso do custo econômico, é verdadeiro (Figura 4.1).

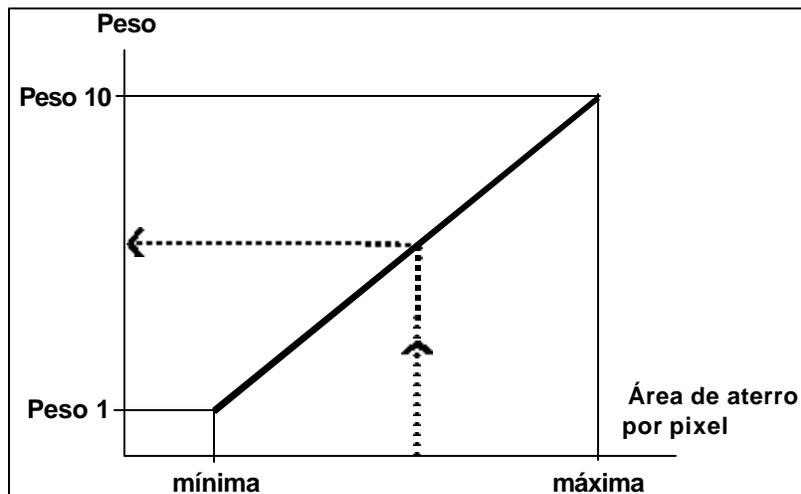


Figura 4.1 Patamares de indiferença para o aspecto econômico

#### 4.2.2. Mapa de atrito ambiental

O mapa de atrito ambiental foi elaborado a partir do mapa de uso do solo. Foram consultados especialistas locais em temas ambientais aos quais se pediu para atribuírem uma pontuação aos 10 tipos de usos do solo utilizados na classificação, com base na sua vulnerabilidade ambiental e a resiliência.

A métrica adotada foi a mesma do caso anterior, com um limite inferior 1 para a situação menos comprometida ambientalmente falando e um limite superior de 10 para as áreas que deveriam, se possível, serem preservadas.

Como era de se esperar, as opiniões dos especialistas em questões ambientais não coincidiram e, portanto, foi preciso recorrer a um processo de negociação, adotando a técnica denominada “Delphi” (uma descrição breve e concisa desta técnica apode ser encontrada em Schmidt, 1995).

#### 4.2.3. Mapa de atrito político

A incorporação da questão política foi certamente difícil: encontrar um ou vários indicadores que a refletissem de forma simples teve suas complicações. No entanto, foi detectado que a ampliação da área defendida da cidade é um anseio dos setores de interesse político (e também de alguns grupos com interesses específicos, como as imobiliárias).

Portanto, foi escolhido como objetivo político levar a linha de defesa o mais ao norte que fosse possível da Avenida Nicolas Avellaneda (ver Figura 2.4).

Estabeleceu-se como patamar de atrito superior de “peso 10” uma distância de 100m (ao norte) da Avenida Nicolás Avellaneda, enquanto o patamar de atrito inferior de “peso 1” foi estabelecido para a distância 1.500m (também ao norte) da mesma avenida. A variação entre estes patamares foi adotada como linear.

Aos pixels com distâncias superiores a 1.500m da avenida lhes foi atribuída pontuação 1, enquanto os distantes a menos de 100m receberam pontuação 10 (Figura 4.2).

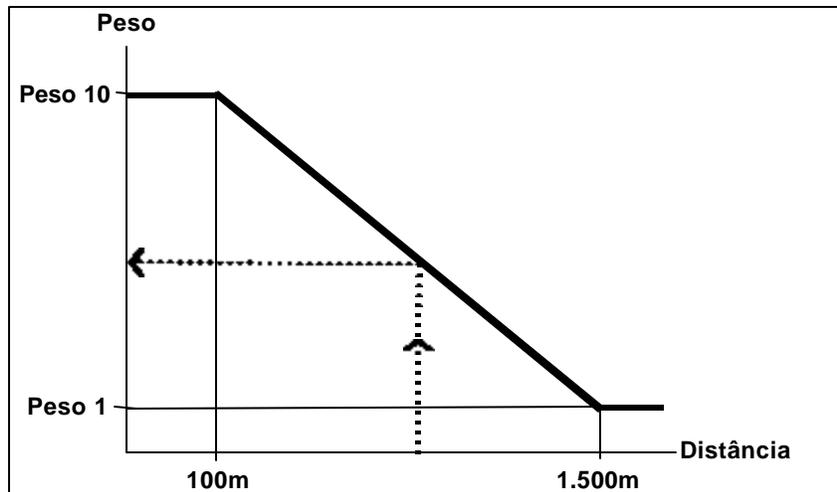


Figura 4.2 Patamares de indiferença para o aspecto político

#### 4.3. Mapas de mínimo custo

Para o traçado de mapas de mínimo custo poderia ter sido utilizado neste trabalho a metodologia desenvolvida por Collischonn e Pilar (2000). Mas, foi objetivo e paradigma desta pesquisa desenvolver um sistema de apoio à decisão baseado em softwares de utilização (e difusão) mais ou menos ampla entre os profissionais da Engenharia. Portanto, nesta tarefa foi utilizado o programa Idrisi-32 que, com algumas limitações e aproximações (no sentido que considera o custo como intrínseco de cada célula, não levando em consideração sua eventual variabilidade direcional), mediante a combinação de dois comandos pode realizar esta tarefa. O primeiro dos comandos é o “COST”, que considera efeitos de atritos isotrópicos (todos os atritos utilizados neste trabalho são deste tipo), com a opção “cost-push” (esforço de custo). O outro comando é o “PATHWAY”, que calcula a rota de menor custo (Eastman, 1995).

##### 4.3.1. Traçados de menor custo econômico e ambiental

Primeiramente foi calculado o mapa de menor custo econômico. Para realizar esta tarefa foram utilizados o mapa de atrito econômico e mapas indicando o ponto de início e do fim da defesa. O procedimento de cálculo deste tipo de mapas não

oferece maiores problemas quando utilizado o Idrisi em todas suas versões, e a seqüência de passos podem ser encontradas no Manual do Usuário (Eastman, 1995).

Também foi calculado o mapa de menor custo ambiental, utilizando como base o mapa de atrito ambiental e os mapas indicando o início e o fim da defesa.

#### 4.3.2. Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo/multicritério

Para poder fazer um mapa de mínimo custo em geral, que considere simultaneamente e pondere adequadamente os aspectos econômico, ambiental e político, foi preciso recorrer a técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério.

Foram testadas várias delas: Electre, Promethee, Método da Análise Hierárquica e Programação de Compromisso. Finalmente, pela aceitação sem inconvenientes entre os tomadores de decisões reais, se decidiu pelas duas últimas opções e a sua adaptação a este problema será explicado a seguir (os índices do tipo concordância e discordância dos métodos da escola de otimização francesa não foram bem entendidos pelos tomadores de decisões, o que fez com que eles rejeitem estes métodos).

A maioria das aplicações das técnicas multiobjetivo/multicritério em obras de engenharia tem por finalidade colocar numa ordem hierárquica várias soluções viáveis. Ou seja, dado um conjunto de soluções, ele é organizado ordinalmente através da aplicação destas técnicas. Nesta pesquisa, estas técnicas foram utilizadas no início, no próprio processo de otimização, e serviram para nortear a definição do melhor traçado.

##### i. Aplicação do Método da Análise Hierárquica (MAH)

Quando num processo decisório um conjunto de alternativas são consideradas por uma pessoa ou grupo de pessoas, que devem escolher uma opção entre varias possíveis, e levando em consideração vários aspectos (ou

critérios), a tarefa se transforma em um assunto difícil e até podem acontecer potenciais conflitos.

O MAH tenta objetivar este processo através da introdução de matrizes de comparações paritárias. Estas matrizes simplificam a difícil tarefa de comparar vários aspectos ou elementos num esquema de “todos contra todos”, mediante a comparação de “a pares” entre eles. O método é útil em situações nas quais os decisores não têm um juízo formado sobre a importância relativa de cada um destes aspectos ou elementos sendo comparados, mas conseguem perceber estas importâncias relativas se comparados de par a par.

O esquema de comparações paritárias do MAH foi utilizado para atribuir pesos relativos aos aspectos econômico, ambiental e político na formulação de uma função-objetivo de tipo soma ponderada.

Foi respeitada estritamente a recomendação de Saaty referida à utilização de uma escala variando entre 1 e 9, segundo a seguinte valoração subjetiva (Saaty, 1991):

- pontuação 1: é o mesmo;
- pontuação 3: é um pouco mais importante;
- pontuação 5: é muito mais importante;
- pontuação 7: é fortemente mais importante;
- pontuação 9: é absolutamente mais importante;

podendo ser utilizadas pontuações intermediárias.

O esquema de comparações paritárias entre os três aspectos considerados é apresentado na Figura 4.3.

	<b>Econômico</b>	<b>Ambiental</b>	<b>Político</b>
<b>Econômico</b>	<b>1</b>	$a_{E-A}$	$a_{E-P}$
<b>Ambiental</b>	$1/a_{E-A}$	<b>1</b>	$a_{A-P}$
<b>Político</b>	$1/a_{E-P}$	$1/a_{A-P}$	<b>1</b>
<b>AUTOVETOR</b>	$w_E$	$w_A$	$w_P$

Figura 4.3 Comparações paritárias entre os aspectos considerados

Como já foi explicado num capítulo anterior, a interpretação da última linha da Figura 4.1, que é o autovetor normalizado da matriz das comparações paritárias, deve ser entendida como sendo que, segundo a opinião dos decisores consultados, a questão econômica influiria em  $(w_E \cdot 100)\%$  na sua escolha, a ambiental em  $(w_A \cdot 100)\%$  e a política em  $(w_P \cdot 100)\%$ .

Certamente, quando é explicado aos tomadores de decisões reais que depois de preencher as matrizes de comparações paritárias é preciso realizar os cálculos dos autovetores, eles podem sentir certo desconforto. Isto foi experimentado na elaboração deste trabalho.

Para contornar este inconveniente foi desenvolvido um procedimento de montagem e preenchimento destas matrizes, objetivando trocar o cálculo de autovetores por um esquema de programação linear, mais simples de entender e de aplicar, e que será explicado a seguir.

Quando analisada em profundidade a matriz da Figura 4.3, é possível perceber que a importância relativa de cada um dos aspectos considerados também pode ser obtida aplicando um esquema de programação linear, no qual devem ser satisfeitas as seguintes restrições, válidas para a matriz da Figura 4.3:

$$\begin{cases} w_E - a_{E-A} \cdot w_A = 0 \\ w_E - a_{E-P} \cdot w_P = 0 \\ w_A - a_{A-P} \cdot w_P = 0 \\ w_E + w_A + w_P = 1 \end{cases} \quad (4.1)$$

A função-objetivo deveria ser a seguinte:

$$FO: \text{Max}(w_E + w_A + w_P) \quad (4.2)$$

Nesta formulação, “ $w_E$ ” representa a importância do aspecto econômico na decisão, “ $w_A$ ” o peso do aspecto ambiental e “ $w_P$ ” o peso do aspecto político.

Uma vez calculados os valores de “ $w_E$ ”, “ $w_A$ ” e “ $w_P$ ”, a seguir os mapas de atrito econômico, ambiental e político foram multiplicados por estes fatores e, posteriormente, somados num esquema célula-a-célula, obtendo um único mapa de atrito combinado e ponderado.

Finalmente, utilizando este mapa e os mapas indicando os pontos de início e fim da defesa, com o auxílio de programa Idrisi foi calculado o traçado de menor custo combinado.

É importante fazer um esclarecimento e uma recomendação neste ponto: Saaty desenvolveu este método para situações nas quais os decisores não tenham uma idéia precisa das importâncias de cada um dos aspectos relevantes numa decisão (coeficientes “ $w_i$ ”), mas sim a percepção suficiente do problema para poder preencher cada célula da matriz das comparações paritárias.

Porém, sendo considerados “ $n$ ” aspectos relevantes, pareceria que fosse preciso fazer  $[(n-1)+(n-2)+(n-3)+\dots+(n-n+1)]$  comparações paritárias, que correspondem ao número de células por acima da diagonal principal (que é formada por uns), enquanto as células por abaixo da diagonal principal deveriam ser recíprocas das suas simétricas com relação a esta diagonal. Posteriormente, deveria ser verificada a consistência desta matriz.

No entanto, é possível garantir que a matriz resultante seja consistente fazendo apenas  $(n-1)$  comparações, correspondentes ao número de células da primeira linha, menos a primeira célula que, por pertencer à diagonal principal teria um 1. Mas, e o resto das células, como seriam preenchidas?

Primeiramente, seria preciso que os aspectos relevantes à decisão estejam listados em ordem descendente de importância. Com isto se garantiria que todas as células por acima da diagonal principal tivessem valores iguais ou superiores a 1, enquanto, abaixo desta diagonal as células teriam valores inferiores ou iguais a 1.

O preenchimento das células das outras linhas (e por acima da diagonal principal) deveria ser feito seguindo o procedimento que se descreve a seguir. Como é conhecida a importância relativa entre o aspecto “i” (o mais importante) e os “j” e “k”, “ $a_{i-j}$ ” e “ $a_{i-k}$ ”, respectivamente, a importância relativa entre “j” e “k”, “ $a_{j-k}$ ” surgiria de aplicar o seguinte raciocínio:

$$\frac{a_{i-j}}{a_{i-k}} = \frac{\frac{w_i}{w_j}}{\frac{w_i}{w_k}} = \frac{w_k}{w_j} = a_{k-j} \quad (4.3)$$

Seguindo este procedimento, o que é feito na realidade é a determinação, mediante consulta com os decisores, da importância relativa do aspecto mais importante com relação aos outros aspectos.

Isto, em verdade, não é um inconveniente, nem uma limitação; muito pelo contrario, é uma vantagem, pois um preenchimento completo da matriz não é tarefa fácil e é muito comum cair em armadilhas perceptuais, que podem acabar quebrando a transitividade imprescindível de um juízo coerente e equânime. A transitividade mencionada refere-se a que se o aspecto “a” é preferível ao “b” e o “b” é preferível ao “c”, por caráter transitivo -e para que exista coerência no juízo do decisor-, o “a” deveria ser preferível ao “c” (embora esta afirmação possa ser contestada pelos seguidores da escola francesa de otimização).

Se o preenchimento da matriz das comparações paritárias (Figura 4.3) não é feito segundo o indicado nos parágrafos anteriores (preenchimento da primeira linha e o resto de forma automática) não poderia ser aplicado diretamente o problema linear apresentado através das equações (4.1) e (4.2). Isto significa que, caso o decisor real insista em preencher completamente a matriz da Figura 4.3, além de ser necessário checar a sua consistência, a equação (4.2) já não poderia ser a função-objetivo e seria preciso modificá-la para incluir os erros de consistência (deverá transformar-se numa soma dos erros, a ser minimizada).

## ii. Aplicação do método da Programação de Compromisso

O conceito de distância do tipo “euclidiana” é corriqueiro no dia-a-dia de qualquer pessoa. Foi percebido que os tomadores de decisões consultados durante a elaboração desta pesquisa, na hora de preencher as matrizes de comparações paritárias do MAH, para se ajudar, elaboraram desenhos de linhas, colocando nos extremos os limites inferior e superior, e tentavam localizar seu parecer nesta “régua”. Este fato motivou a exploração de técnicas baseadas em distâncias.

O esquema desenvolvido, embora sua aceitação pelos tomadores de decisões reais não foi checada, apresenta uma aplicabilidade imediata, quase intuitiva.

Como foi explicado no capítulo 3, no item 3.3.8.ii, o método da Programação de Compromisso parte da consideração que existe uma situação ideal, caracterizada por tantos valores quantos aspectos estejam sendo considerados, e identificada com os melhores resultados segundo cada um deles. Também pode ser definida uma situação anti-ideal.

Num espaço de decisão, tendo por dimensões os aspetos considerados, os pontos ideal e anti-ideal são os vértices extremos de um retângulo, um poliedro, ou um hiper-poliedro, segundo a quantidade de aspectos (dimensões) considerados relevantes.

O método consiste em classificar várias alternativas sendo comparadas, segundo a distância que cada uma tenha em relação ao ponto ideal (menor distância), ou ao ponto anti-ideal (maior distância), no espaço de decisão. O procedimento se assemelha à obtenção de ótimos “paretianos”.

No entanto, podem aparecer inconvenientes quando há muito mais variabilidade num objetivo que no outro, o que seria refletido no espaço de decisão por um forte estiramento do retângulo, poliedro, ou hiper-poliedro que o limita. Portanto, pequenas variações relativas segundo este aspecto poderiam ter muito mais influência no cálculo das distâncias que variações percentualmente maiores num outro aspecto, mas que apresenta variabilidade menor entre as situações consideradas melhor e pior.

A utilização do esquema de patamares de indiferença permitiria evitar este inconveniente, pois normatiza de uma forma muito particular as variabilidades dos

aspectos considerados, o que poderia ser entendido como uma equalização destas variabilidades. Este esquema também permite incorporar na análise de distâncias aspectos caracterizados por variáveis não contínuas, como por exemplo a ambiental.

O procedimento que será apresentado a seguir é, então, uma variante da Programação de Compromisso, e mistura, inclusive, procedimentos do MAH.

Primeiramente foi definido um espaço de decisão no qual as dimensões estão representadas pelos aspectos relevantes do problema, nesta pesquisa o econômico, o ambiental e o político. Os três mapas de atrito preparados permitiriam caracterizar cada ponto do espaço geográfico com três valores, que variam entre 1 e 10, correspondendo 1 à melhor situação e 10 à pior. Portanto, este espaço de decisão fica restrito a um cubo de 9 unidades (10 menos 1) por aresta.

Na realidade, esse espaço somente seria exatamente um cubo no caso em que cada aspecto tivesse a mesma importância relativa na decisão. Mas, segundo o resultado da avaliação do parecer dos decisores, apresentada no item anterior, o aspecto econômico influiria em  $(w_E \cdot 100)\%$  na decisão, o ambiental em  $(w_A \cdot 100)\%$  e o político em  $(w_P \cdot 100)\%$ .

Portanto, o cubo se deformaria e viraria um poliedro, pois a coordenadas de cada eixo deveria ser afetada pelos coeficientes mencionados no parágrafo anterior (Figura 4.4).

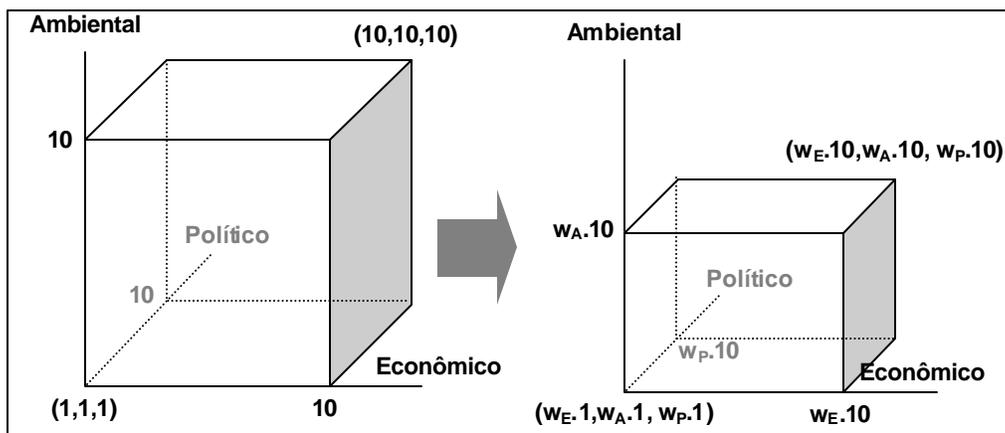


Figura 4.4 Deformação do espaço de decisão

A Programação de Compromisso, da mesma forma que o MAH, é utilizada para fazer uma ordenação hierárquica de várias soluções possíveis, segundo vários aspectos ou critérios. Baseia-se em estabelecer uma situação desejável (target), caracterizada por determinados valores dos aspectos considerados relevantes, e escolher a alternativa que tivesse a menor distância com relação a dita situação objetivo. As distâncias podem ser calculadas segundo várias métricas.

Porém, neste trabalho o método foi aplicado de uma maneira diferente, elaborando mapas de atrito nos quais cada ponto do espaço geográfico é caracterizado em função de sua distância ao ponto ideal ou anti-ideal no espaço de decisão.

Este método é mais intuitivo e fácil de entender pelos tomadores de decisões reais, que o MAH, talvez porque o conceito de distância, sempre que seja do tipo “euclidiana”, é corriqueiro, utilizado no dia-a-dia por todas as pessoas. Portanto, foi esta métrica (a “euclidiana”) a utilizada nesta fase do trabalho.

Para explicar a adaptação da Programação de Compromisso desenvolvida nesta pesquisa será utilizada a Figura 4.5, que representa um espaço de decisão hipotético, com apenas dois aspectos relevantes e igualmente importantes (50% de importância relativa cada um).

Neste espaço existem dois pontos importantes: o caracterizado pelas coordenadas (1,1), que é o mais desejável (o ponto ideal), e o caracterizado pelas coordenadas (10,10), do qual é desejável se afastar o máximo possível (o ponto anti-ideal). Pela igual importância relativa dos dois aspectos considerados, as curvas de iso-distâncias a estes pontos são arcos de circunferências.

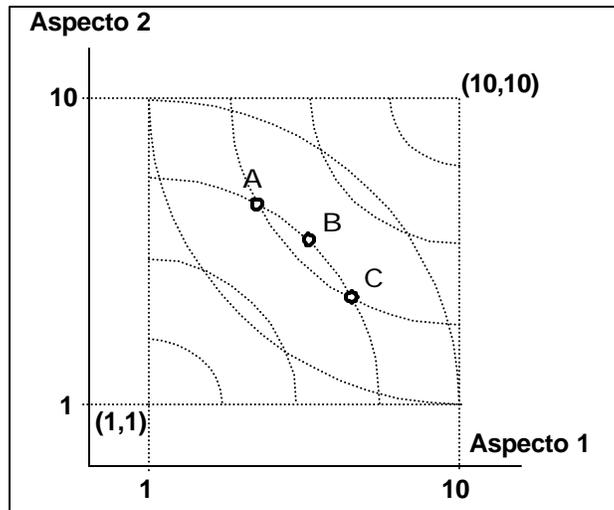


Figura 4.5 Diferença entre os conceitos “ficar perto de” e “ficar longe de”

É comum que os tomadores de decisões reais achem que procurar ficar perto do ponto ideal (1,1) é um conceito complementar de procurar se afastar do anti-ideal (10,10) e, portanto, ambos deveriam produzir resultados equivalentes. Mas isto é em erro, que pode ser demonstrado de forma simples, utilizando os pontos “A”, “B” e “C” da Figura 4.5. Os 3 pontos estão a uma mesma distância do ponto ideal (1,1), mas o “B” fica mais perto que os outros do ponto anti-ideal (10,10). Então, os pontos “A” e “C” têm melhores qualidades que o “B” e deveriam ser preferidos a este.

Portanto, é preciso ponderar quão desejável é ficar perto do ponto ideal (1,1) e longe do anti-ideal (10,10). Neste caso, adotou-se arbitrariamente a ponderação 2/3 e 1/3, respectivamente.

Uma forma de calcular, para uma célula “i” qualquer do espaço geográfico, com coordenadas “ $X_{1-i}$ ” e “ $X_{2-i}$ ” no espaço de decisão, sua distância “euclidiana” ao ponto (1,1) deste último espaço é aplicando a fórmula seguinte:

$$d_i = \left( [w_1 \cdot (X_{1-i} - 1)]^2 + [w_2 \cdot (X_{2-i} - 1)]^2 \right)^{0,5} \quad (4.4)$$

na qual “ $w_1$ ” e “ $w_2$ ” representam as importâncias relativas (pesos) dos aspectos 1 e 2, respectivamente.

Para calcular a sua distância ao ponto (10,10) pode-se aplicar uma fórmula semelhante, mas trocando o número 1 por o número 10.

Na hora de combinar os critérios “ficar perto de” e “ficar longe de”, novamente surgiu o problema operacional decorrente de ter que comparar coisas ou conceitos diferentes. Para evitar este inconveniente se utilizou, mais uma vez, o artifício dos patamares de indiferença. Estes patamares são mostrados nas Figuras 4.6 e 4.7.

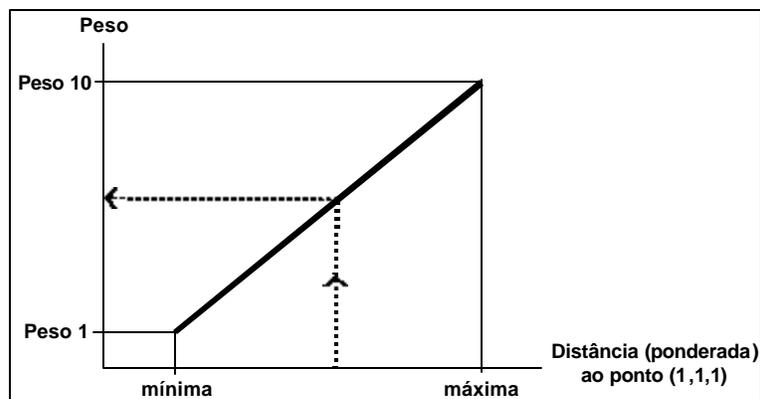


Figura 4.6 Patamares de indiferença para o conceito “ficar perto” do ponto ideal

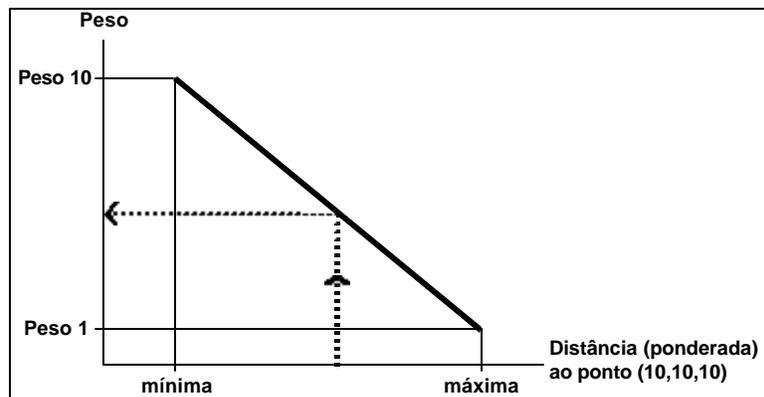


Figura 4.7 Patamares de indiferença para o conceito “ficar longe” do ponto anti-ideal

Com os pesos “ $w_i$ ” definidos através da matriz da Figura 4.3 puderam ser preparados 3 novos mapas de atrito: com distâncias “euclidianas” do ponto ideal (1,1); com distâncias “euclidianas” do ponto anti-ideal (10,10); e uma combinação (num esquema célula-a-célula) dos dois anteriores, ponderando em 2/3 a primeira e em 1/3 a segunda.

Com base nestes 3 mapas e nos pontos de início e fim da defesa, foram calculados os caminhos de menor custo, aplicando os comandos específicos do programa Idrisi.

#### 4.3.3. Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo-multicritério com relaxamento difuso

O preenchimento de matrizes de comparações paritárias, como a apresentada na Figura 4.3, normalmente produz nos decisores reais um certo desconforto: eles não têm a certeza que, por exemplo, a comparação entre a questão econômica e a ambiental fosse precisamente 4, e não 3 ou 5.

Para tentar evitar este inconveniente foi explorado nesta pesquisa um relaxamento das pontuações, que foi caracterizado por um número difuso triangular, segundo uma proposta apresentada por Pilar (2003).

Para as células da primeira linha da matriz (com valores superiores à unidade) considerou-se que a relação “ $a_{ij}$ ”, que define o peso relativo do elemento “i” sobre o “j”, poderia variar entre um valor “n”, com grau de pertinência máximo, até “n-1” e “n+1”, com graus de pertinência nulos em ambos os casos. As células da primeira coluna deveriam ter valores recíprocos e, portanto, poderiam variar entre “1/n”, com grau de pertinência máximo, até “1/(n+1)” e “1/(n-1)”, como limites superior e inferior, respectivamente, e com graus de pertinência nulos (Figura 4.8). O resto das células foi preenchido aplicando o raciocínio da fórmula (4.3).

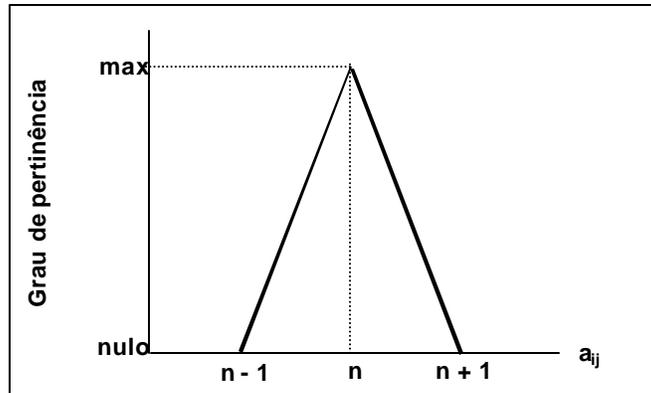


Figura 4.8 Caracterização difusa da relação “ $a_j$ ”

Então, seguindo com o raciocínio, a matriz de comparações paritárias passaria a ter agora 3 valores por célula: um correspondente ao grau de pertinência máximo e os outros dois, um superior e o outro inferior, com graus de pertinência nulos. Isto resultou em 3 vetores representando as importâncias relativas dos aspectos econômico, ambiental e político, um para as comparações com grau de pertinência máximo e os outros para os valores que representam estas comparações para os graus de pertinência nulos.

Neste esquema, os traçados de menor custo obtidos utilizando todas as variantes de otimização multiobjetivo/multicritério apresentadas no item anterior, representariam o resultado da aplicação do vetor de preferências correspondente ao grau de pertinência máximo e que poderia ser chamado de “mais provável”, sem implicar isto nenhuma associação com funções de distribuição de probabilidades (talvez o termo mais correto poderia ser “mais possível”). Repetindo os procedimentos, mas utilizando os vetores de preferência correspondentes aos graus de pertinência nulos (limite superior e inferior) seriam obtidos outros traçados para a defesa.

#### 4.3.4. Influência da discretização espacial da informação

Para verificar a influência da discretização espacial da informação, o MNT da área de estudo e o mapa de uso de solo foram recalculados para células de menor resolução espacial, ou seja, de maior tamanho, neste caso 60m x 60m.

Com esta nova discretização da informação foram refeitos os mapas de atritos econômico, ambiental e político e re-elaborados os mapas de mínimo custo econômico e ambiental.

## 5. APLICAÇÃO

---

*Não temos a solução de todos os problemas do mundo em nossas mãos; mas perante os problemas do mundo temos nossas mãos.*

*Ley-motivo do site SER SOLIDARIO*

*www.sersolidario.com.ar*

### 5.1. Desenvolvimento do trabalho

Um dos paradigmas deste trabalho foi a utilização de ferramentas computacionais simples (software e hardware), de ampla difusão e/ou baixo custo, na conformação de um sistema de apoio à decisão orientado ao planejamento e gestão espacial de obras relacionadas aos recursos hídricos, mas sem ser este último uma limitação excludente.

O trabalho partiu da extensão da Programação Dinâmica tradicional (definida neste trabalho como vetorial) a um espaço geográfico, com discretização espacial de tipo raster, resolução 30m x 30m, e que poderia ser enquadrado no denominado problema de caminho de mínimo custo (least-cost-path). Mas, para aplicar a Programação Dinâmica é preciso ter definida a priori uma função-objetivo.

Para isto, foi explorada a forma de como poder capturar a percepção dos tomadores de decisões reais sobre estes tipos de problemas, através de técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério e que foram resolvidas aplicando Programação Linear. Também foi explorada a inclusão de um relaxamento difuso dos pareceres dos decisores e, finalmente foi avaliada a influência no resultado da discretização espacial da informação.

O assunto no qual foram testadas as propostas deste trabalho é a definição do traçado da defesa norte da cidade de Resistencia, que tem como finalidade protegê-la das enchentes dos rios Paraná e Paraguai.

## 5.2. Preparação dos dados e dos mapas de base

Toda a informação relevante para esta pesquisa foi colocada em forma de mapas, num formato raster, utilizando uma resolução espacial de 30m x 30m, compatível com as imagens Landsat TM 5 e 7.

Para não introduzir “ruídos”, foi estudada apenas uma área de aproximadamente 3,50km de largura e que vai até 2km ao norte da Avenida Nicolás Avellaneda. A superfície desta área é 1072ha. O setor que fica ao sul desta avenida não foi considerado na análise.

### 5.2.1. Dados hidrológicos

A cota das defesas da cidade de Resistencia foi fixada em base a estudos hidrológicos, de tal forma que protegessem das enchentes da ordem de 200 anos de tempo de recorrência, mais um excesso de 2m para as ondas. Portanto, o valor a ser atingido pelo acabamento dos aterros é 54m MOP.

Este valor foi verificado na elaboração do trabalho, mas não serão apresentados os dados nem os procedimentos realizados já que não foi o foco desta pesquisa.

### 5.2.2. Modelo Numérico do Terreno (MNT)

A cidade de Resistencia não conta com um Modelo Numérico do Terreno (MNT) e a informação topográfica disponível apresenta algumas inconsistências e erros, o que é um grande contratempo, se considerada a declividade regional, da ordem de poucos centímetros por quilômetro.

Os poucos dados topográficos disponíveis foram transformados para um sistema de referência compatível com o sistema Gauss-Kruger, adotado oficialmente para a informação cartográfica da República Argentina. Posteriormente, foi feita uma interpolação para uma resolução de 30m x 30m, utilizando o método da inversa do quadrado da distância. Foram testados outros interpoladores, inclusive o

método de Krigging, mas os resultados não refletiram razoavelmente a realidade. Neste processamento foi utilizado o programa Surfer.

Para eliminar alguns “saltos” pronunciados, não compatíveis com a topografia da região, o MNT foi posteriormente suavizado pela aplicação de um filtro de médias (low-pass) de tamanho 5x5 (Schowengerdt, 1983, Meijerink et al., 1994).

O mapa resultante é apresentado na Figura 5.1 e, embora não foi validado por medições no terreno, teve uma boa correspondência com as geformas existentes.

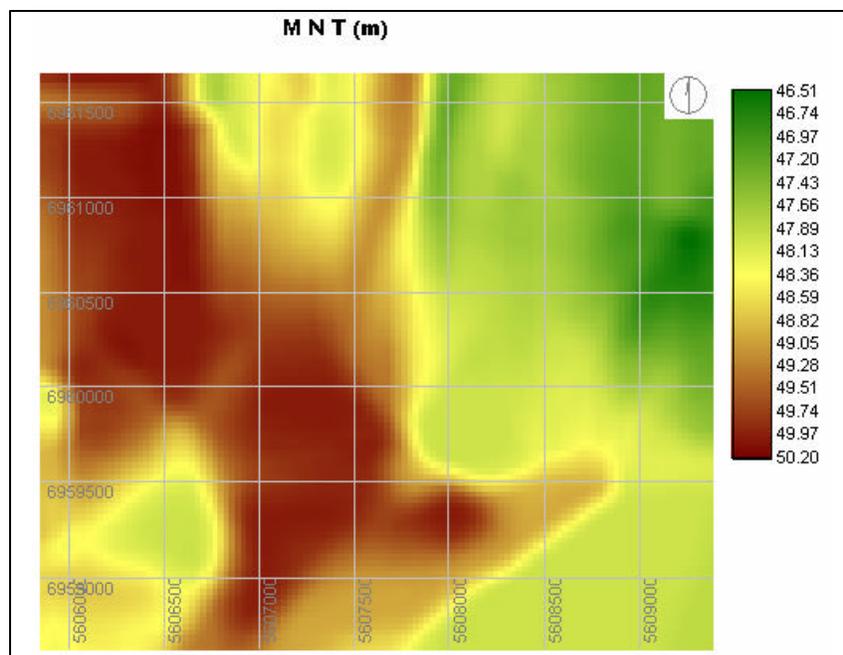


Figura 5.1 Modelo Numérico do Terreno

### 5.2.3. Mapa do uso do solo

Se considerou que ter mapeado o uso do solo seria um subsídio adequado para tentar refletir a problemática ambiental. Foi elaborado um mapa específico, utilizando as imagens de satélites e fotografias aéreas disponíveis. Este mapa seria um dos elementos de base mais importantes do trabalho.

A região em estudo conta com fotografias aéreas coloridas, sem restituição, na escala aproximada de 1:5.000. Estas fotografias poderiam ser consideradas boas áreas de treino para uma classificação supervisionada. Mas, como se decidiu estudar apenas a área de terreno que limita com o trecho da defesa analisado, que não é muito extensa (de apenas 1.072 ha) para não introduzir “ruídos” no processo de classificação, isto conspirou na utilização de classificadores precisos.

Finalmente, optou-se por fazer uma classificação não supervisionada, utilizando a metodologia conhecida como “clustering” (Schowengerdt, 1983, Meijerink et al., 1994, Swain e Davis, 1978, Eastman, 1995), com um nível de generalização de tipo “fino”, limitando o número de classes a dez. O resultado é apresentado na Figura 5.2.

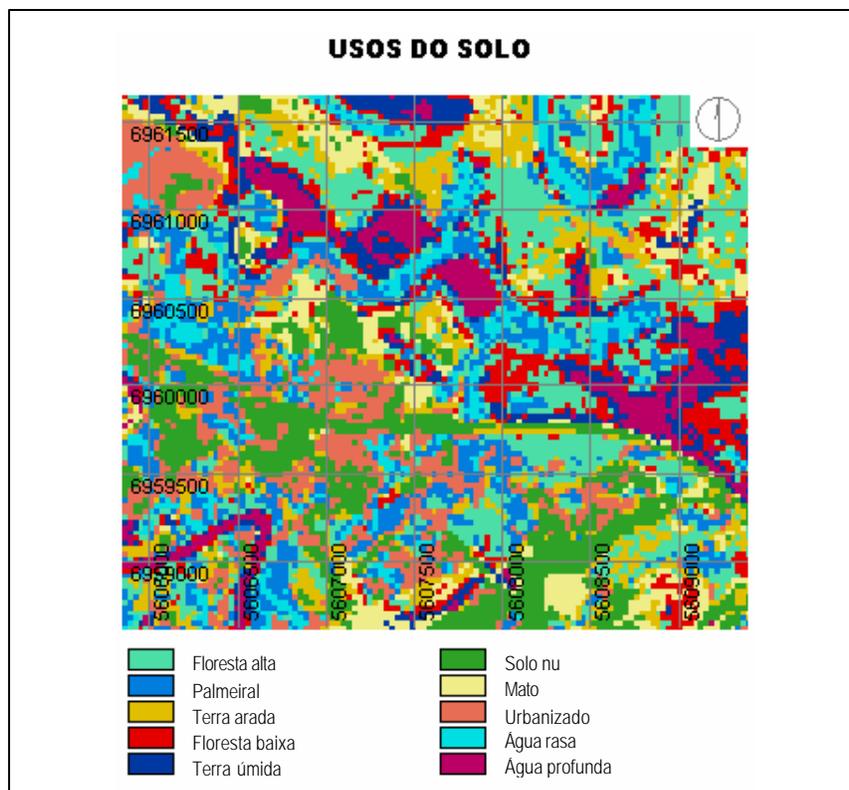


Figura 5.2 Classificação do uso do solo

### 5.3. Mapas de atrito

Como o que estava sendo procurado eram caminhos de mínimo custo, na elaboração dos mapas de atrito, utilizou-se o critério segundo o qual às situações desejáveis lhes foram atribuídas pontuações baixas (mínimo atrito) e altas a aquelas indesejáveis (máximo atrito). A escala adotada foi: situação melhor, pontuação 1; situação pior, pontuação 10.

Utilizou-se um esquema de patamares de indiferença, desenhado e elaborado nesta pesquisa, que foi aplicado segundo o que se descreve a seguir.

Um esclarecimento se faz necessário: a superfície que fica ao sul da Av. Nicolás Avellaneda foi descartada (para não introduzir “ruído” no processamento), pois é interesse dos decisores políticos que a defesa fique ao norte dela.

#### 5.3.1. Os atributos ou critérios adotados

Como já foi explicado, em conjunto com os tomadores de decisões reais, estabeleceu-se que seriam utilizados três atributos para definir o traçado mais adequado para a defesa norte da cidade de Resistencia: econômico, ambiental e político.

O econômico foi relativamente fácil de formalizar, pois o custo unitário do aterro era mais ou menos conhecido, em função de análises realizadas por técnicos da APA e de ofertas de empresas para execução de trabalhos similares. Este custo, embora inclua o transporte, não o discrimina. Porém, introduzi-lo em separado não é tarefa complexa.

O ambiental já foi um pouco mais difícil. O critério adotado em conjunto com os tomadores de decisões reais foi atribuir uma pontuação de atrito segundo o uso do solo.

O mais complicado foi o político, pois os decisores reais não tinham formado um critério com referência a ele. Durante as consultas foi percebido que aumentar a área protegida pela obra em análise é um anseio de grupos políticos (e de alguns grupos de interesses específicos, como o imobiliário). Portanto, se adotou o critério

segundo o qual, quanto mais ao norte da Avenida Nicolás Avellaneda ficasse a defesa, melhor segundo a ótica chamada de política.

Para definir a importância relativa de cada um destes aspectos sobre os outros, foram utilizadas técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério, descritas no capítulo anterior.

Finalmente, partindo dos mapas base elaborados neste trabalho (MNT e de uso do solo), foram preparados três mapas de atrito: econômico, ambiental e político.

### 5.3.2. Mapa de atrito econômico

O caso do atrito econômico pode ser caracterizado por uma variável contínua. Esta variável foi a seção de aterro por pixel, que é função da topografia. Como já foi explicado anteriormente, o custo de transporte desde a jazida não foi considerado pois o preço unitário do aterro era único.

Adotou-se como patamar de indiferença de “peso 1” ao menor valor da seção transversal de aterro que, obviamente, correspondeu ao pixel com cota mais alta, pois requer um menor volume de aterro sobre ele (a cota do acabamento da defesa foi fixada com base em uma análise de risco hidrológico e, portanto, o volume do aterro aumentará para aqueles pixels com menor elevação). No outro extremo, o patamar de indiferença de “peso 10” foi para o pixel com maior seção de aterro, correspondente ao de menor elevação. Entre estes extremos, adotou-se uma variação linear.

Na Figura 5.3 é apresentado o mapa de atrito econômico.

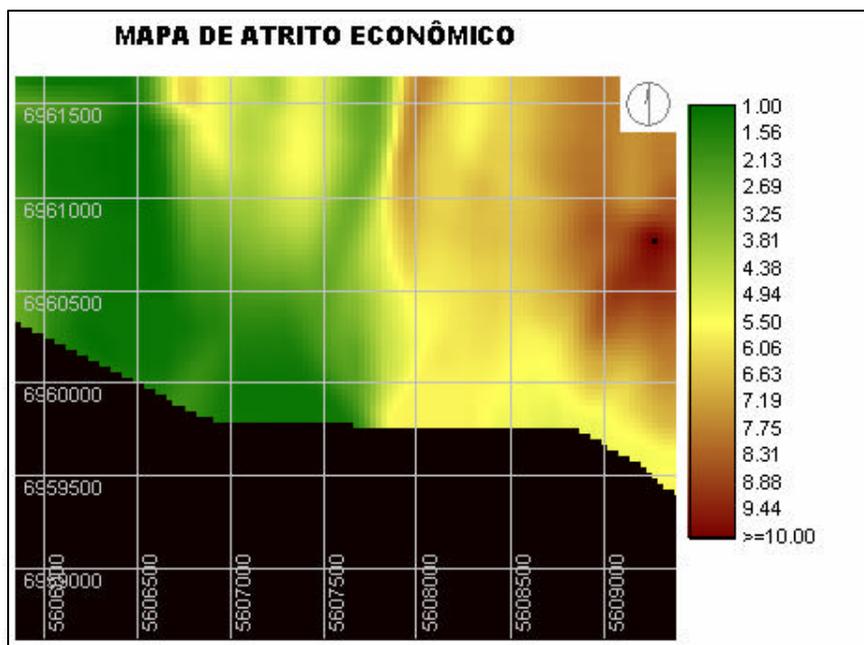


Figura 5.3 Mapa de atrito econômico

### 5.3.3. Mapa de atrito ambiental

O caso do atrito ambiental é diferente, pois o uso do sdo, que foi o aspecto escolhido para representá-lo, não pode ser caracterizado por uma variável contínua. Portanto, o esquema de patamares de indiferença não pode ser utilizado.

Para resolver este inconveniente, pediu-se a um grupo de especialistas locais em temas ambientais que atribuísssem uma pontuação a cada um dos 10 tipos de uso do solo em que fora classificada a área em estudo, levando em consideração a vulnerabilidade ambiental e a resiliência de cada tipo de uso.

O limite inferior de “peso 1” foi para o uso menos comprometido ambientalmente falando (neste caso, correspondeu ao uso denominado “urbanizado”, constituído por áreas com casas e ruas), enquanto que o limite superior de “peso 10” foi para as áreas que deveriam, se possível, serem preservadas (que correspondeu ao uso “floresta alta”). Como as opiniões dos ambientalistas não coincidiram na pontuação a atribuir a alguns dos usos, foi preciso recorrer a um processo de negociação, adotando a conhecida como técnica “Delphi”.

Os tipos de uso e as pontuações finalmente adotadas para eles são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Pontuação adotada para cada uso do solo

Tipo de uso	Pontuação adotada
Floresta alta	10
Água profunda	9
Água rasa	7
Floresta baixa	7
Palmeiral	7
Terra úmida (borda de lagoa)	7
Mato	6
Terra arada	3
Solo nu	2
Urbanizado	1

Na Figura 5.4 é apresentado o mapa de atrito ambiental.

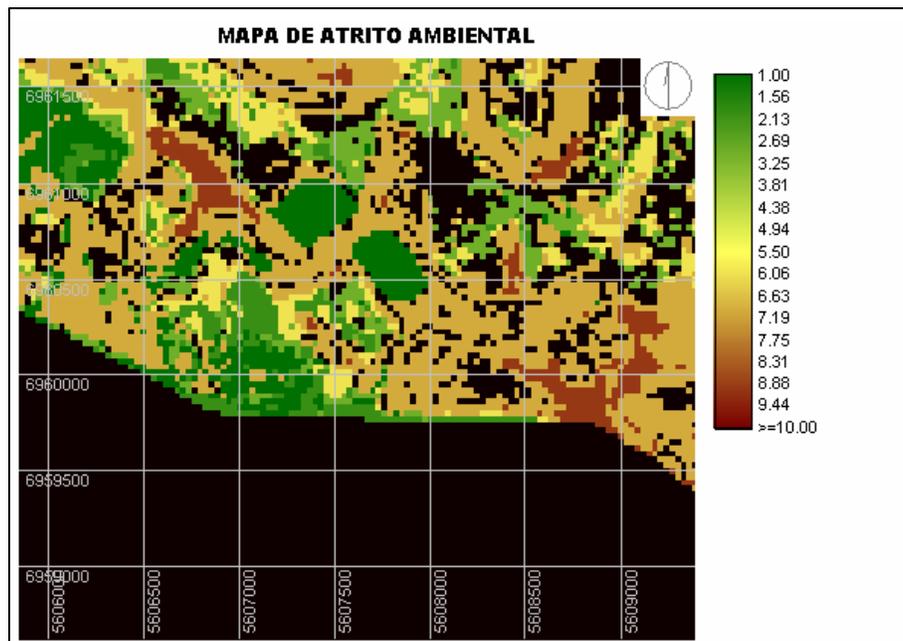


Figura 5.4 Mapa de atrito ambiental

### 5.3.4. Mapa de atrito político

Segundo o raciocínio utilizado para definir este mapa de atrito, seria desejável, politicamente falando, aumentar a área protegida pela obra.

Hoje, o limite norte da parte urbanizada da cidade de Resistencia é a Avenida Nicolás Avellaneda e estender este limite mais para o norte é um anseio dos políticos e urbanistas locais, pois as condições de exposição e vulnerabilidade às enchentes fluviais é ali menor que no resto da cidade.

Então, foi elaborado um mapa em formato raster que representa, para cada pixel, a distância da mencionada Avenida e foi considerado que esta distância é adequada para refletir o atrito que foi chamado de político.

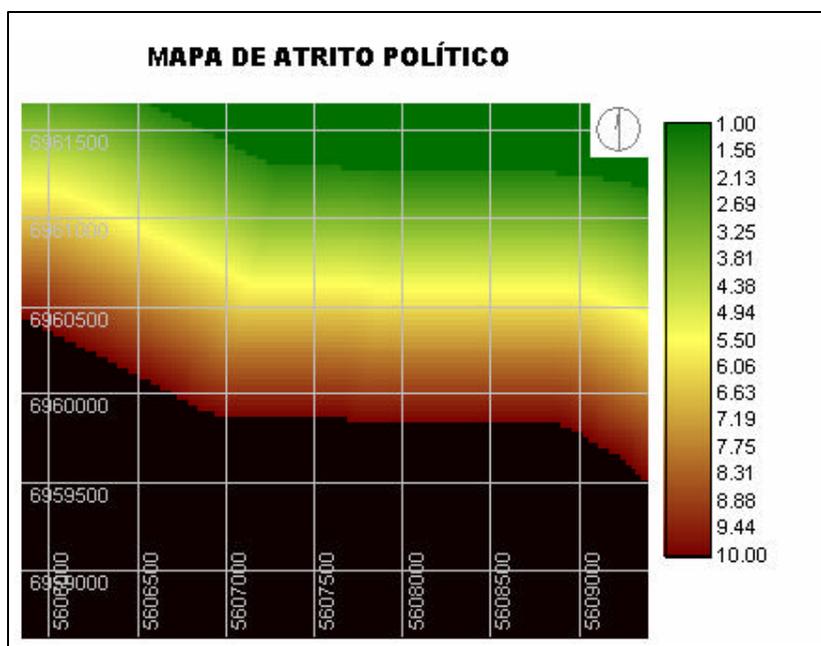


Figura 5.5 Mapa de atrito político

Portanto, este atrito é caracterizado por uma variável contínua, o que viabilizou a utilização do esquema de patamares de indiferença. Adotou-se como patamar de “peso 10” a distância de 100m à Avenida Nicolás Avellaneda, que corresponde ao largo da área de domínio público lateral à mesma. Para o patamar de “peso 1” estabeleceu-se a distância 1.500m da avenida, pois mais além começa

o município de Colonia Benítez e poderiam aparecer conflitos de jurisdições. A variação entre estes patamares foi adotada como linear e, logicamente, aos pixels com distâncias superiores a 1.500m da avenida Ihes foi atribuída a pontuação 1, enquanto que os distantes menos de 100m receberam a pontuação 10.

Na Figura 5.5 é apresentado o mapa de atrito político.

#### 5.4. Mapas de mínimo custo

##### 5.4.1. Traçados de menor custo econômico e ambiental

Aplicando a metodologia descrita no capítulo anterior e mediante o uso do programa Idrisi, foram calculados os traçados de menor custo econômico e ambiental. Os mapas são apresentados nas Figuras 5.6 e 5.7.

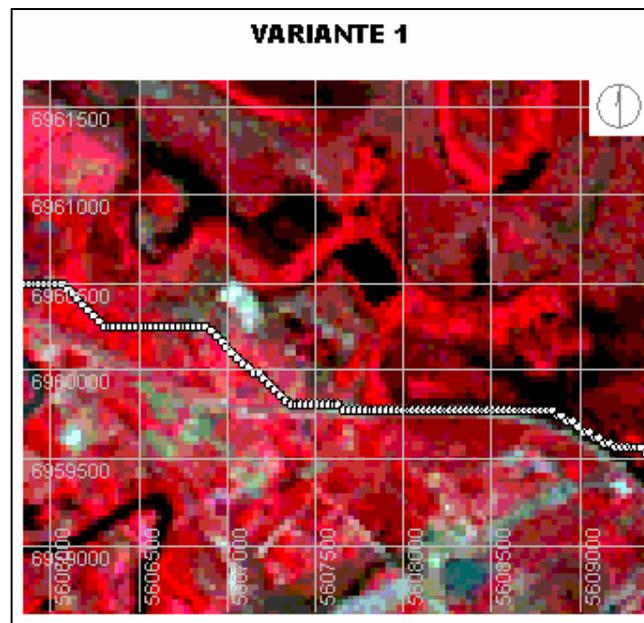


Figura 5.6 Traçado de mínimo custo econômico

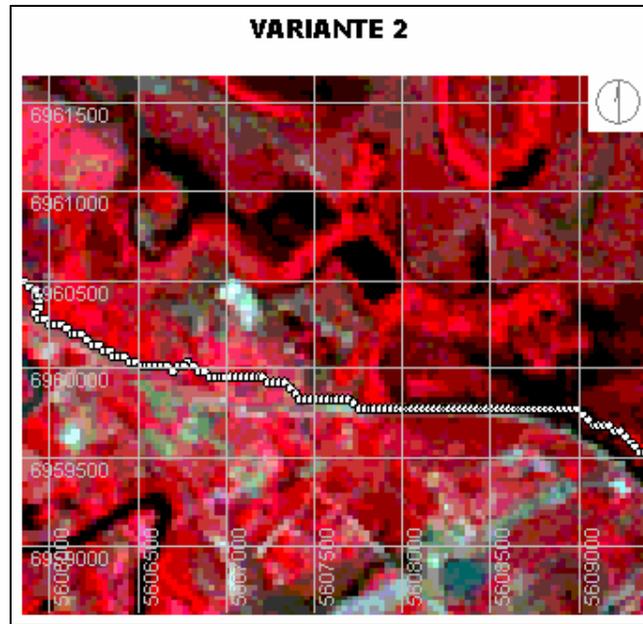


Figura 5.7 Traçado de mínimo custo ambiental

#### 5.4.2. Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo-multicritério

As técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério foram utilizadas neste trabalho para obter traçados da defesa considerando simultaneamente vários aspectos, especificamente econômicos, ambientais e políticos.

Em função da boa aceitação que tiveram entre os tomadores de decisão reais, foram utilizadas variantes das técnicas conhecidas como Método da Análise Hierárquica e Programação de Compromisso.

##### i. Aplicação do Método da Análise Hierárquica

Neste trabalho foi utilizado apenas uma parcela do método, que corresponde à comparação paritária entre os aspectos levados em consideração. A matriz destas comparações, preenchida pelos tomadores de decisões, é apresentada na Figura 5.8.

	Econômico	Ambiental	Político
Econômico	1	4	7
Ambiental	1/4	1	7/4
Político	1/7	4/7	1
AUTOVETOR	0,718	0,179	0,103

Figura 5.8 Comparações paritárias entre os aspectos econômico, ambiental e político

Esta matriz foi montada seguindo as recomendações mencionadas no capítulo anterior: os aspectos foram listados em ordem decrescente de importância e apenas a primeira linha foi preenchida, enquanto que as outras foram preenchidas automaticamente com base nos valores colocados nessa linha.

Para obter a importância dos aspectos econômico, “ $w_E$ ”, ambiental, “ $w_A$ ” e político, “ $w_P$ ”, foi montado o seguinte problema de programação linear:

$$FO : \text{Max } (w_E + w_A + w_P) \quad (5.1)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$\begin{cases} w_E - a_{E-A} \cdot w_A = 0 \\ w_E - a_{E-P} \cdot w_P = 0 \\ w_A - a_{A-P} \cdot w_P = 0 \\ w_E + w_A + w_P = 1 \end{cases} \quad (5.2)$$

O resultado deste problema, aplicando o programa Lindo, em sua versão freeware, foi:

$$\begin{cases} w_E = 0,718 \\ w_A = 0,179 \\ w_P = 0,103 \end{cases}$$

que deve ser interpretado da seguinte maneira: a questão econômica influi 71,8% no parecer dos decisores, a ambiental 17,9% e a política 10,3%.

Como já foi explicado no capítulo anterior, os mapas de atrito foram multiplicados por estes valores ( $w_E$ ,  $w_A$  e  $w_P$ ) e, posteriormente somados num esquema célula á célula, obtendo assim um novo mapa de atrito combinado, que foi utilizado para calcular o traçado da defesa aplicando o programa Idrisi. O resultado é apresentado na Figura 5.9.

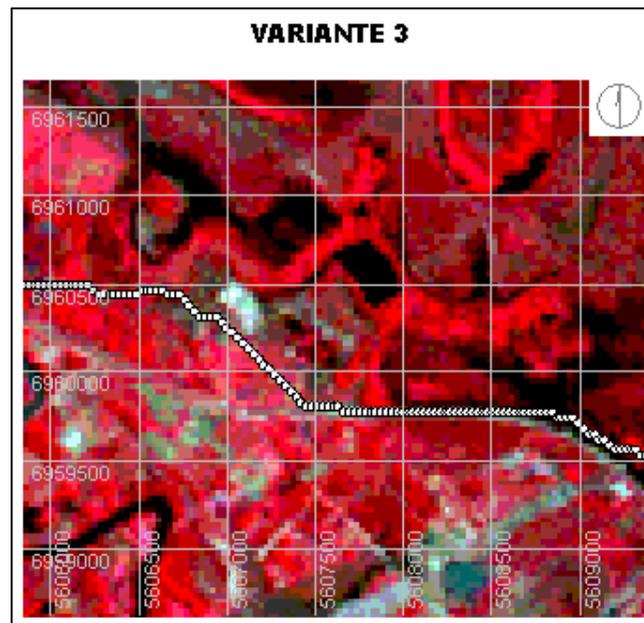


Figura 5.9 Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH

## ii. Aplicação do método da Programação de Compromisso

Tendo como base os três mapas de atritos, o espaço de decisão fica definido por um cubo, de 9 unidades (10 - 1) de comprimento por aresta. Os eixos do espaço de decisão correspondem aos aspectos econômico, ambiental e político e, neste espaço, cada pixel do espaço geográfico fica caracterizado por 3 valores de atrito que, dada a forma na qual foram elaborados os mapas correspondentes, podem variar de um mínimo de 1, até um máximo de 10. No espaço de decisão o vértice (1,1,1) é o ponto mais desejável ou ideal, enquanto o (10,10,10) é o contrário ou anti-ideal.

A seguir, foram calculadas distâncias euclidianas a ambos pontos mas, previamente, foi preciso deformar o espaço de decisão (cubo mencionado acima) multiplicando as coordenadas do eixo econômico por “w<sub>E</sub>”, as do eixo ambiental por “w<sub>A</sub>” e as do eixo político por “w<sub>P</sub>”, que foram definidas por comparações paritárias ao aplicar o MAH.

Formalmente, as distâncias euclidianas desde um ponto “P<sub>i</sub>” do espaço geográfico, caracterizado no espaço de decisão pela terna de valores de atrito (x<sub>i-E</sub>, x<sub>i-A</sub>, x<sub>i-P</sub>), até os pontos (1,1,1) e (10,10,10) foram calculadas segundo:

$$d_{(1,1,1)} = \left\langle [w_E \cdot (x_{i-E} - 1)]^2 + [w_A \cdot (X_{i-Ai} - 1)]^2 + [w_P \cdot (X_{i-Pi} - 1)]^2 \right\rangle^{0,5} \quad (5.3)$$

$$d_{(10,10,10)} = \left\langle [w_E \cdot (10 - x_{i-E})]^2 + [w_A \cdot (10 - X_{i-Ai})]^2 + [w_P \cdot (10 - X_{i-Pi})]^2 \right\rangle^{0,5} \quad (5.4)$$

Nas equações (5.3) e (5.4) “d<sub>(1,1,1)</sub>” e “d<sub>(10,10,10)</sub>” representam as distâncias euclidianas aos pontos (1,1,1) e (10,10,10) do espaço de decisão, respectivamente.

Como já foi demonstrado no capítulo anterior, os critérios de ficar perto do ponto ideal e ficar longe do ponto anti-ideal, se bem complementares, não fornecem resultados semelhantes, e não são comparáveis.

Para que posam sê-lo foi preciso elaborar mais dois mapas de atrito, um para o conceito “ficar perto de” e o outro para o conceito “ficar longe de”, tarefa para a qual aplicou-se, novamente, o esquema de patamares de indiferença.

No primeiro caso, o patamar de “peso 1” foi para a distância nula ao vértice (1,1,1) do espaço de decisão, enquanto o patamar de “peso 10” foi para a distância máxima ao mesmo vértice.

No segundo caso, para a distância nula ao vértice (10,10,10) foi atribuído o patamar “peso 10” e à distância máxima o patamar “peso 1”.

Numa decisão “que parece razoável”, no entanto arbitrária, estabeleceu-se que é mais importante ficar perto do vértice (1,1,1) do que ficar longe do (10,10,10), numa proporção de 2/3 e 1/3. A seguir, foi elaborado um terceiro mapa de atrito que é a combinação célula-a-célula dos dois anteriores, ponderados segundo as proporções estabelecidas, 2/3 e 1/3.

Tendo como base estes três mapas de atrito, foram calculados os caminhos de mínimo custo e os resultados são apresentados nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12.

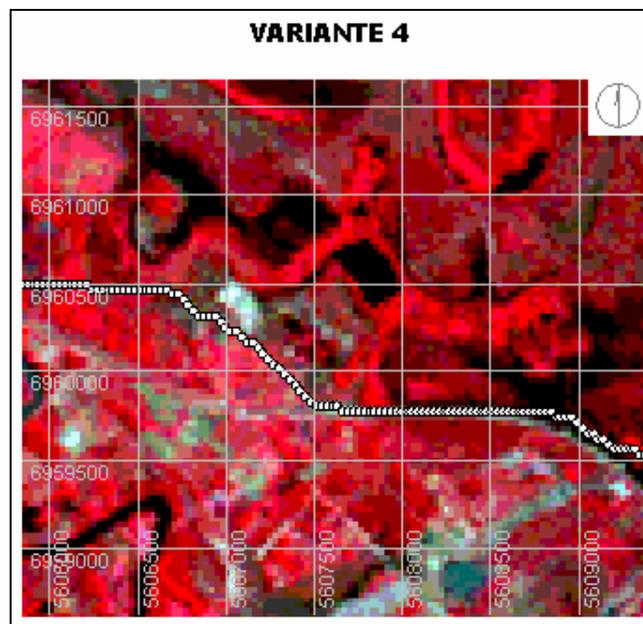


Figura 5.10 Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal

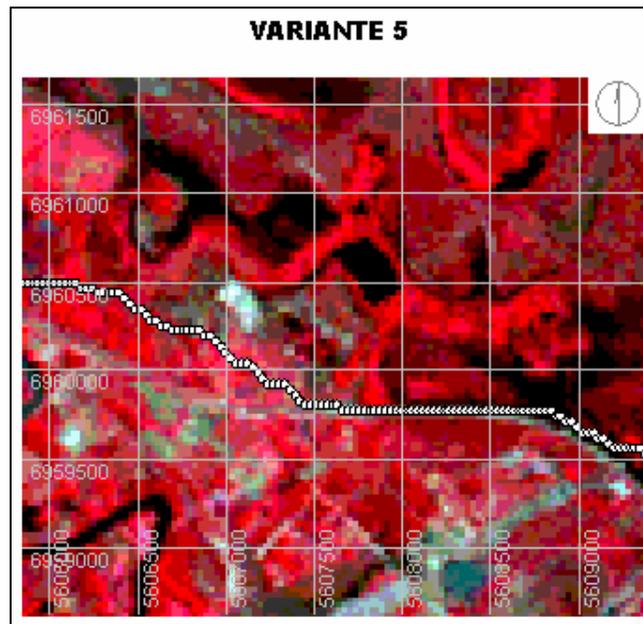


Figura 5.11 Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti-ideal

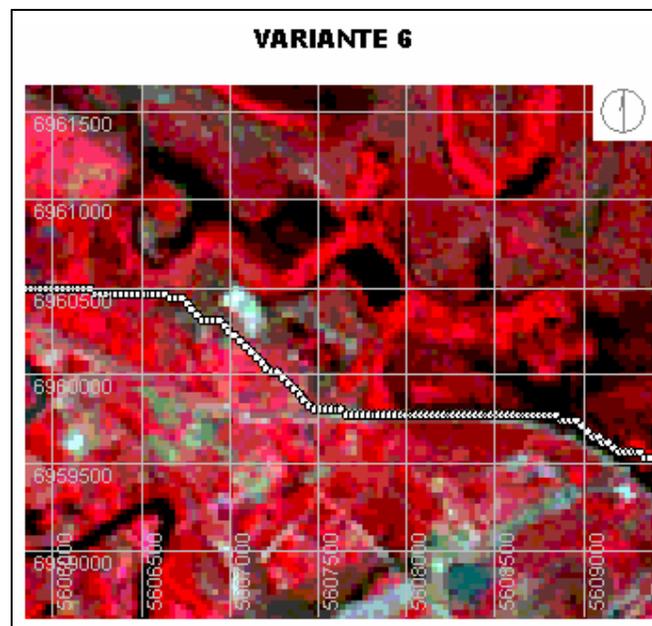


Figura 5.12 Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal

### 5.4.3. Traçado de menor custo utilizando otimização multiobjetivo-multicritério com relaxamento difuso

Para não pressionar os tomadores de decisões reais a adotar uma pontuação precisa, e de preferência inteira, na hora de preencher a matriz da Figura 5.8, aplicou-se o esquema de relaxamento difuso explicado no capítulo anterior. Como resultado, as células da matriz das comparações paritárias passaram a ter três valores: um, o mais provável (sem implicar este adjetivo nenhuma quantificação de probabilidades), com grau de membresia máximo segundo os conceitos da lógica difusa, e os outros dois, com graus de membresia nulos.

Na Figura 5.13 são apresentadas as influências dos aspectos econômico, ambiental e político, aplicando o relaxamento difuso na opinião dos decisores.

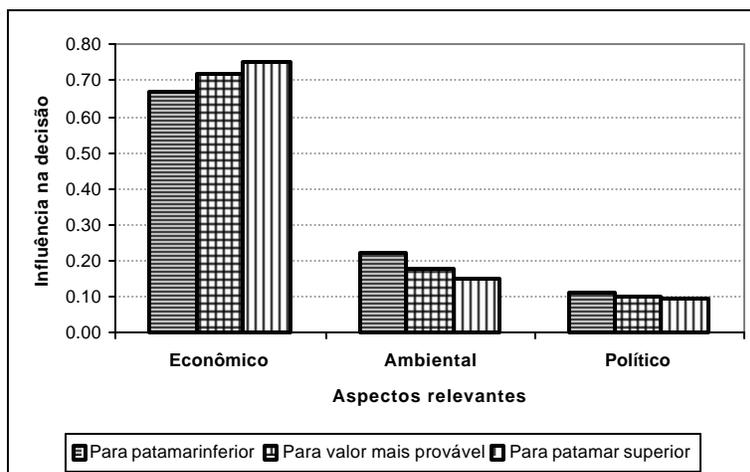


Figura 5.13 Influência na decisão dos aspectos, aplicando o relaxamento difuso

Portanto, foram calculados os caminhos de mínimo custo para as novas combinações de importâncias relativas entre os aspectos, resultantes do relaxamento difuso aplicado. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, nas quais não estão os caminhos de mínimo custo correspondentes aos arranjos de pesos relativos segundo os resultados das comparações paritárias “mais prováveis”, pois são as mesmas mostradas no ponto anterior.

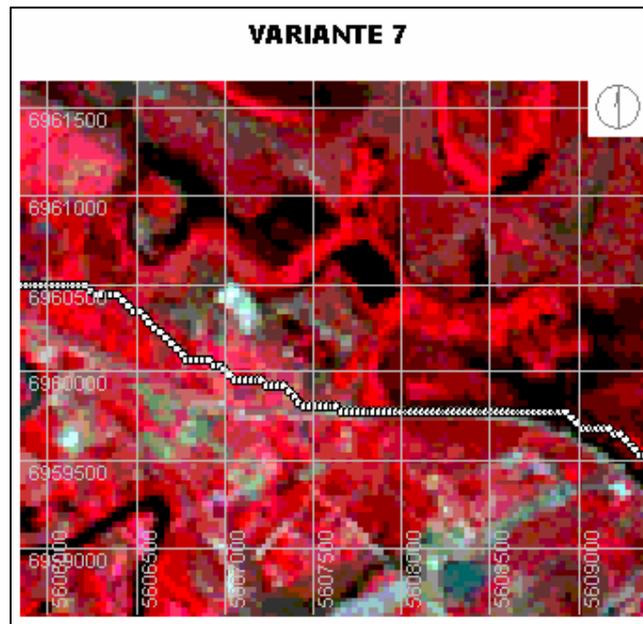


Figura 5.14 Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH e o limite inferior do relaxamento difuso

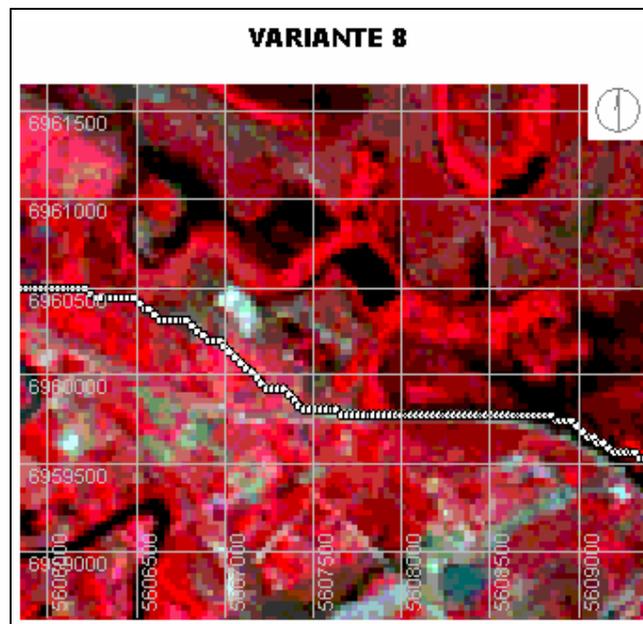


Figura 5.15 Mapa de menor custo combinado, aplicando o MAH e o limite superior do relaxamento difuso

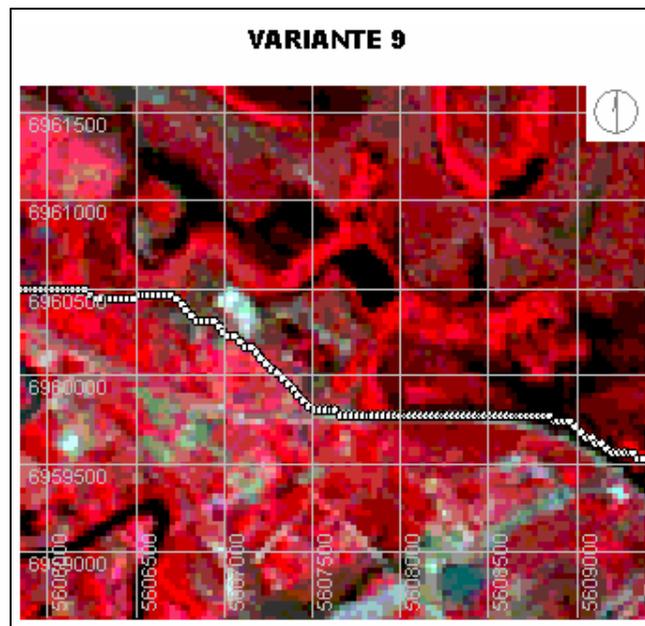


Figura 5.16 Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal segundo o limite inferior do relaxamento difuso

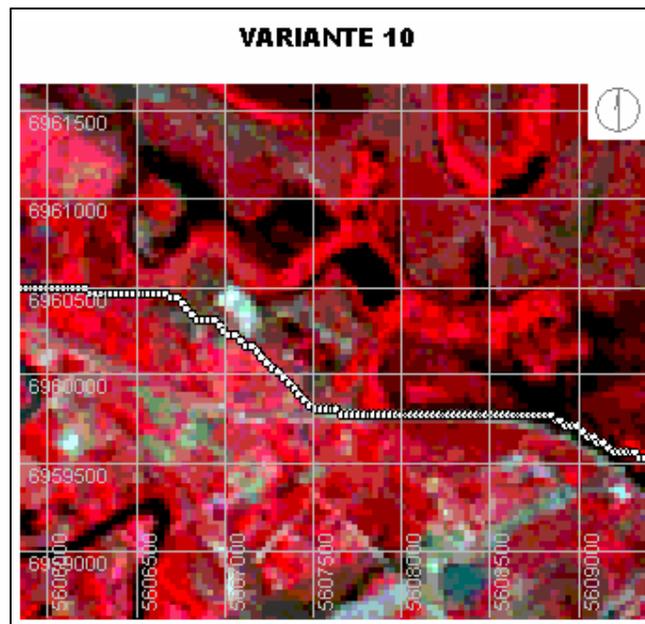


Figura 5.17 Mapa do traçado que minimiza as distâncias à situação ideal segundo o limite superior do relaxamento difuso

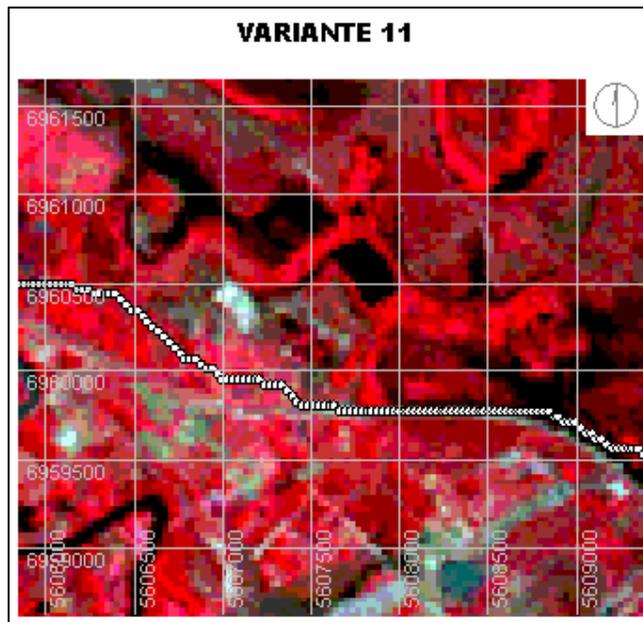


Figura 5.18 Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti -ideal segundo o limite inferior do relaxamento difuso

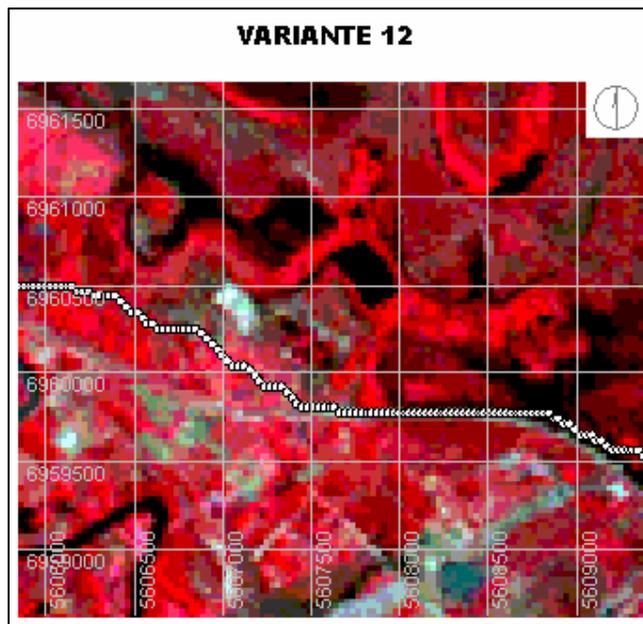


Figura 5.19 Mapa do traçado que maximiza as distâncias à situação anti -ideal segundo o limite superior do relaxamento difuso

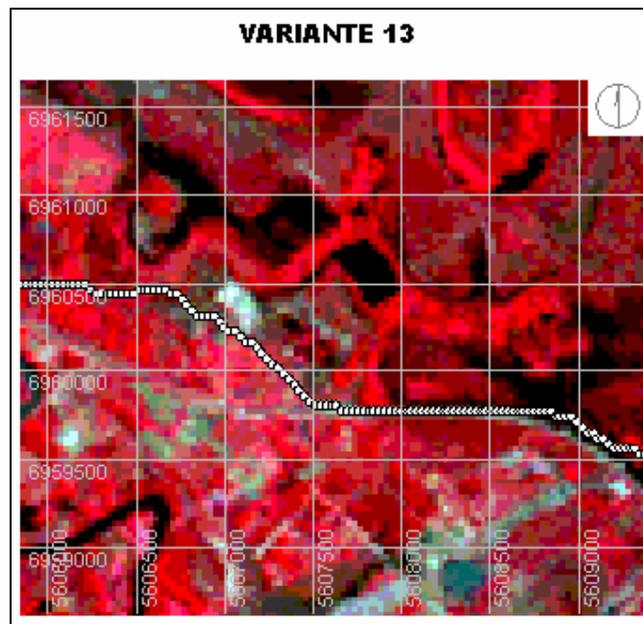


Figura 5.20 Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal, para o limite difuso inferior

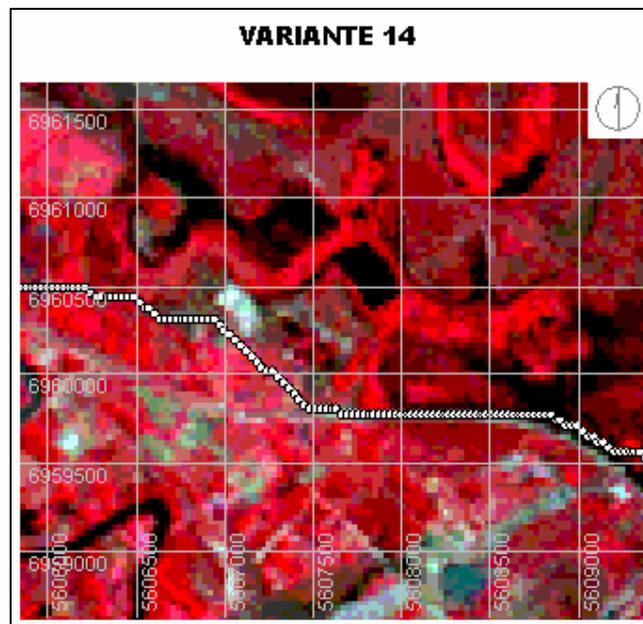


Figura 5.21 Mapa do traçado que combina minimizar as distâncias à situação ideal e maximizá-las à situação anti-ideal, para o limite difuso superior

#### 5.4.4. Verificação da influência da discretização espacial da informação

Finalmente, redesenharam-se os mapas de atritos com uma menor resolução espacial, de 60m x 60m, e foram calculados os caminhos de mínimo custo econômico e ambiental, para verificar a influência no resultado do grau de discretização espacial da informação de base. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.22 e 5.23.

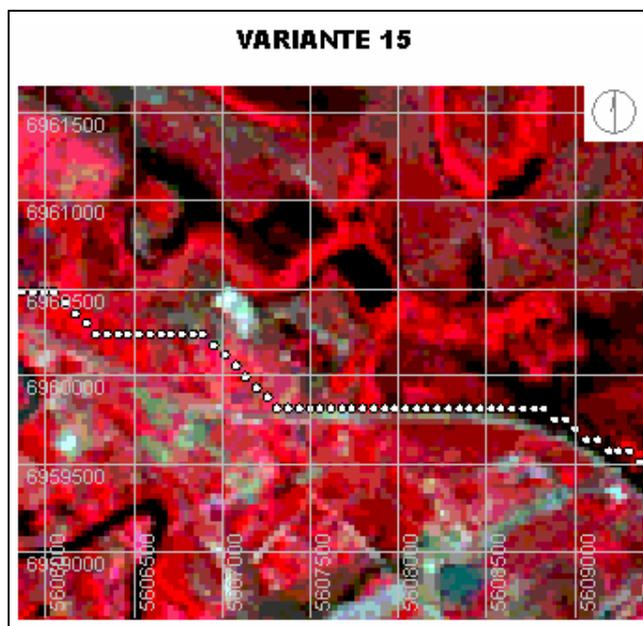


Figura 5.22 Traçado de mínimo custo econômico, calculado com base em pixels de 60m x 60m

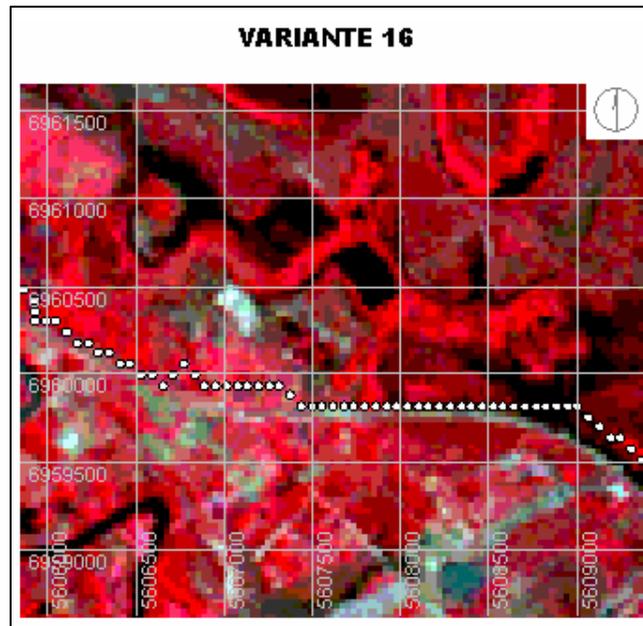


Figura 5.23 Traçado de mínimo custo ambiental, calculado com base em pixels de 60m x 60m

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

---

*O homem erra... e o tempo se cobra vingança.*

*Lord Byron*

### 6.1. Análise dos dados

Para poder comparar numa mesma métrica os três aspectos considerados como relevantes na solução deste problema, os mapas de MNT e de classificação do uso do solo foram transformados em mapas de atrito, utilizando o esquema de patamares de indiferença descrito nos capítulos anteriores.

Como já foi explicado, a utilização deste esquema igualou a variabilidade de todos os aspectos, a que ficou restrita entre 1 e 10.

Em todos os casos, o patamar de “peso 1” correspondeu à situação mais favorável, ou seja de menor atrito. O patamar de “peso 10” foi para a situação oposta.

Para analisar os resultados num contexto adequado é preciso avaliar os histogramas dos mapas de atritos. Nas Figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os histogramas dos mapas de atritos econômico e ambiental respectivamente, dos que foram retirados os pixels correspondentes às áreas que estão ao sul da Avenida Nicolás Avellaneda. Nas Figuras 6.3 e 6.4 são mostrados os mesmos histogramas, para os mapas de atritos com discretização espacial 60m x 60m.

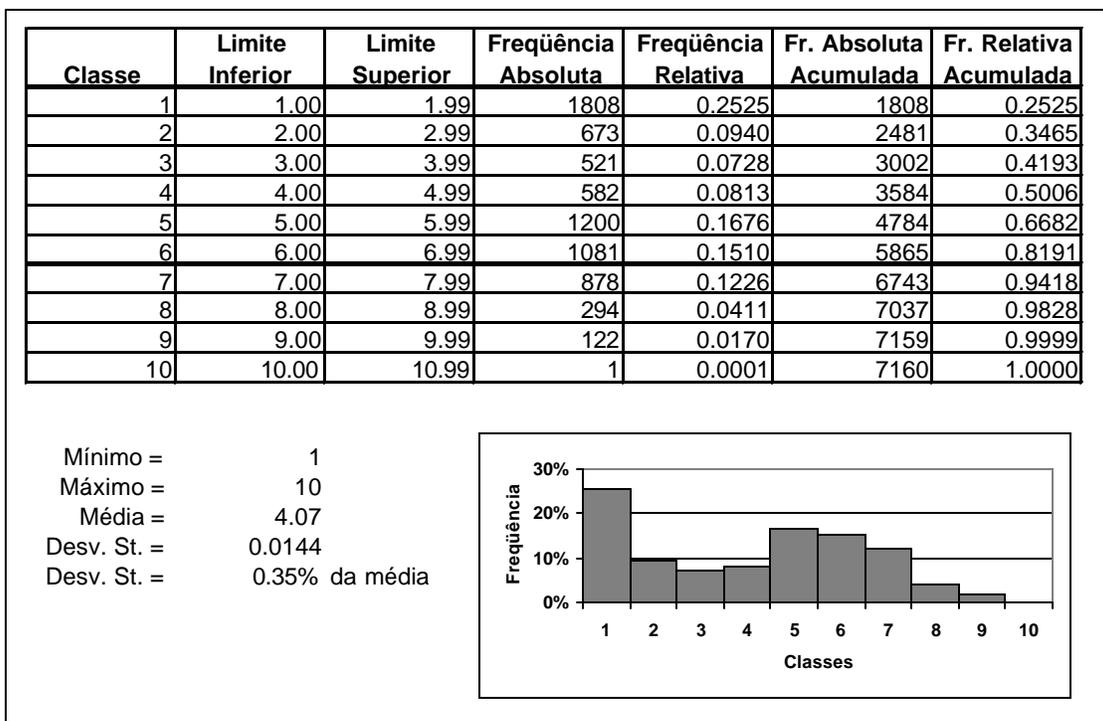


Figura 6.1 Histograma do mapa de atrito econômico

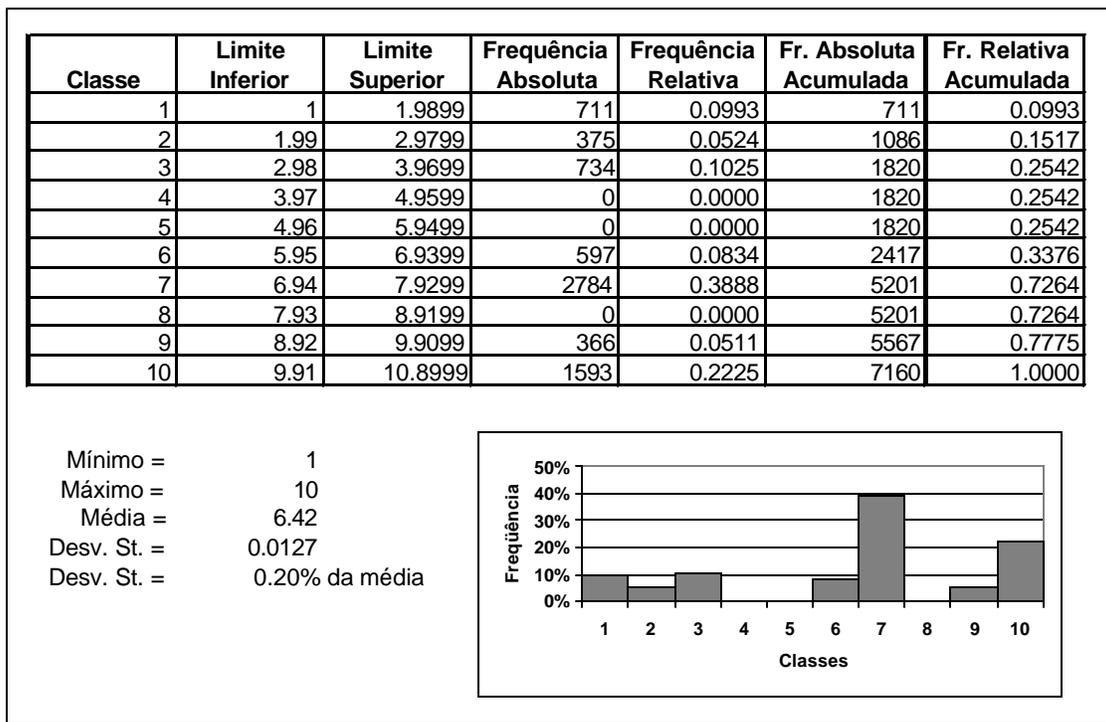


Figura 6.2 Histograma do mapa de atrito ambiental

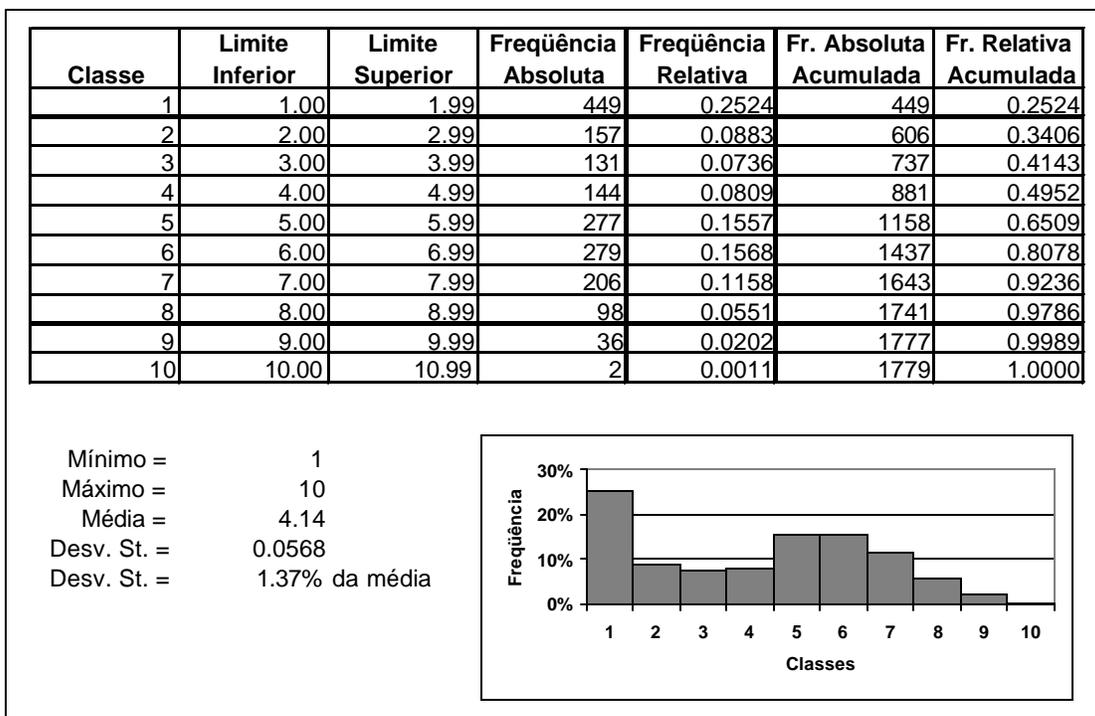


Figura 6.3 Histograma do mapa de atrito econômico com discretização 60m x 60m

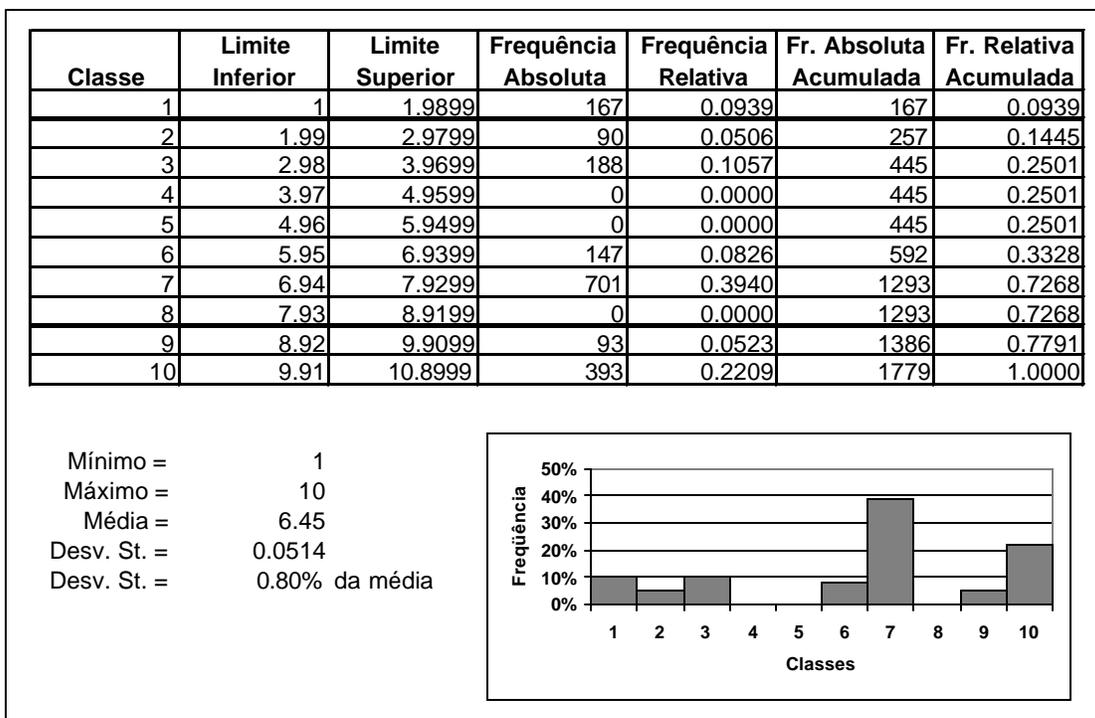


Figura 6.4 Histograma do mapa de atrito ambiental com discretização 60m x 60m

O mapa de atrito econômico apresentou uma média de 4,07 e um desvio padrão de 0,0144 (0,35% da média). A classe 1, que é a de atrito mais baixo (menor custo), representou a quarta parte do mapa, enquanto as 5, 6 e 7 (custos de construção relativamente altos) representaram 44% do mapa.

Por sua vez, o mapa de atrito ambiental apresentou uma média de 6,42, que é um valor ambientalmente alto. O desvio padrão foi 0,0127, que representa 0,20% da média, sendo a classe que mais se repetiu a 7, com quase 39% de frequência.

Os histogramas dos mapas de atrito com discretização espacial de 60m x 60m apresentaram estatísticas similares.

Pela maneira como foram elaborados os mapas de atrito político, sua análise não oferece especial interesse. Além deste fato, a importância atribuída pelos decisores reais a este aspecto foi de apenas 10,3%.

## 6.2. Comparação dos resultados

Sendo uma pesquisa que procura caminhos de mínimo custo, a primeira comparação que era preciso fazer é a dos custos de construção de cada traçado.

Para calcular estes custos com certa precisão, foi necessário considerar em cada pixel se o traçado o atravessava segundo uma direção paralela aos cantos, ou segundo uma diagonal. Utilizando algumas operações lógicas do Excel foi possível realizar esta tarefa (certamente, o Excel não é a ferramenta mais eficiente para fazer estes cálculos, mas mesmo assim ele foi utilizado para explorar os limites desta ferramenta computacional de tão ampla difusão).

As variantes avaliadas foram as seguintes:

**Variante 1:** caminho de mínimo custo puramente econômico.

**Variante 2:** caminho de mínimo custo puramente ambiental.

**Variante 3:** caminho de mínimo custo que combina, mediante a utilização do Método da Análise Hierárquica, os aspectos econômico, ambiental e político.

**Variante 4:** caminho de mínimo custo que combina mediante a utilização da Programação de Compromisso, os aspectos econômico, ambiental e político, num esquema de minimizar as distâncias ao vértice (1,1,1) do espaço de decisão.

**Variante 5:** caminho de mínimo custo que combina mediante a utilização da Programação de Compromisso, os aspectos econômico, ambiental e político, que procura ficar longe do vértice (10,10,10) do espaço de decisão.

**Variante 6:** caminho de mínimo custo que combina as variantes 4 e 5.

**Variante 7:** idem à variante 3, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo inferior das mesmas.

**Variante 8:** idem à variante 3, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo superior das mesmas.

**Variante 9:** idem à variante 4, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo inferior das mesmas.

**Variante 10:** idem à variante 4, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo superior das mesmas.

**Variante 11:** idem à variante 5, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo inferior das mesmas.

**Variante 12:** idem à variante 5, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo superior das mesmas.

**Variante 13:** idem à variante 6, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo inferior das mesmas.

**Variante 14:** idem à variante 6, mas com relaxamento difuso das comparações e utilizando o extremo superior das mesmas.

**Variante 15:** idem à variante 1, com discretização espacial 60m x 60m.

**Variante 16:** idem à variante 2, com discretização espacial 60m x 60m.

Para a comparação dos preços de construção, foi utilizado como base o traçado de mínimo custo econômico, e os custos dos outros traçados foram relacionados com o dele. Na Tabela 6.1 são apresentadas estas comparações.

Tabela 6.1 Comparações entre os resultados

<b>Variante</b>	<b>Custo econômico (\$)</b>	<b>Incremento de custo</b>
1	3 560 367,43	0
2	3 720 138,27	4,49%
3	3 586 519,13	0,73%
4	3 573 075,08	0,36%
5	3 563 253,57	0,08%
6	3 570 982,53	0,30%
7	3 571 400,28	0,31%
8	3 563 964,21	0,10%
9	3 589 155,97	0,81%
10	3 572 564,98	0,34%
11	3 566 166,10	0,16%
12	3 562 306,08	0,05%
13	3 588 723,12	0,80%
14	3 566 405,10	0,17%
15	3 585 763,28	0,71%
16	3 750 795,19	5,35%

A maior diferença foi observada entre o traçado mais econômico e o ambientalmente mais correto. Este foi um resultado de certa forma esperado, visto que, o mais econômico procura as áreas mais altas, nas quais localizam-se os usos que produzem mais atrito ambiental.

Se comparadas as quatro variantes obtidas da aplicação da otimização multiobjetivo/multicritério (as 3, 4, 5 e 6), a maior variação entre elas foi de quase

0,65%, correspondendo este valor à variante 5, na qual foi aplicada a Programação de Compromisso na procura do maior afastamento do ponto anti-ideal. A maior variação entre as outras três variantes não superou 0,27%.

Estas diferenças sumamente baixas entre as abordagens multiobjetivo/multicritério não deveriam ser interpretadas como que as variantes avaliadas são equivalentes e, portanto, sempre produzirão resultados similares. É bom lembrar que o aspecto econômico foi o que mais pesou na decisão segundo a matriz da Figura 5.8, com 71,80% de importância relativa, e ele tem relação direta com a variabilidade da topografia do terreno, que é baixa.

Para ter uma idéia das diferenças espaciais entre os diferentes traçados, foram colocados os resultados das 16 variantes realizadas num mesmo mapa, que é apresentado na Figura 6.5. É possível observar que todos eles coincidem em aproximadamente, mais da metade leste da defesa.

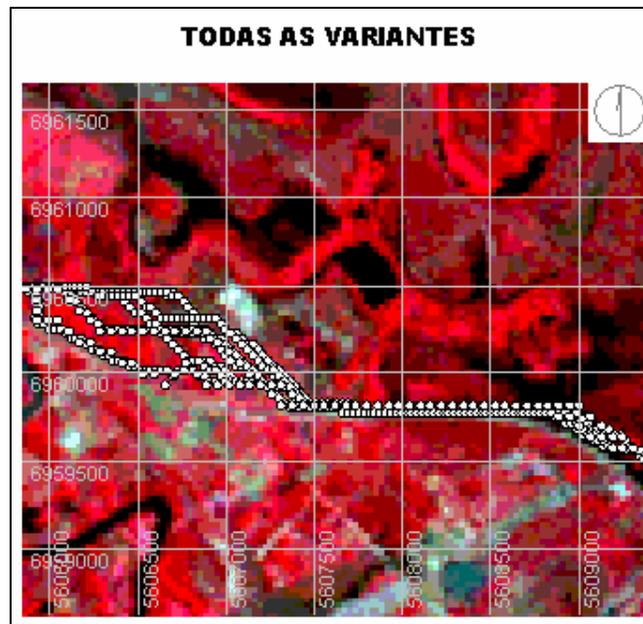


Figura 6.5 Comparação espacial dos resultados das 16 variantes

No outro extremo da defesa -o extremo oeste-, as diferenças entre o traçado de menor custo econômico e o de menor custo ambiental não superaram 330m. Neste trecho a procura do caminho de mínimo custo ambiental puxou a linha de defesa para a Av. Nicolás Avellaneda, que já é uma área antropizada e, portanto, de

baixo atrito ambiental; enquanto a mais econômica procurou se localizar nas áreas altas que ficam um par de centenas de metros ao norte desta Avenida. Quando incorporada a questão política na procura do traçado de menor custo conjunto, ela puxou a defesa para o norte e, portanto, a diferença se incrementou para aproximadamente 450m, pois o aspecto político prioriza o afastamento da Avenida Nicolás Avellaneda.

As diferenças, tanto em custo, como na localização no espaço, não apresentaram incrementos quando os traçados foram calculados com base em uma informação com discretização espacial menor, no caso de 60m x 60m; ou seja, a resolução espacial da informação não teve influência significativa nos resultados.

### 6.3. Discussão dos resultados

Os esquemas desenvolvidos neste trabalho poderiam e têm condições para serem utilizados como um sistema de apoio à decisão para definir o traçado de uma obra de engenharia com características lineares, como uma linha de defesa, ou para dirimir potenciais conflitos entre setores de opinião bem opostos, como por exemplo os puramente economicistas e os ambientalistas mais radicais.

Para o caso da defesa norte da cidade de Resistencia, os traçados obtidos por aplicação dos esquemas desenvolvidos nesta pesquisa permitiriam demonstrar que, em mais da metade da defesa -correspondente ao extremo leste- não existem diferenças substanciais entre os traçados que refletem ambos critérios (econômico e ambiental).

A maior diferença de custos entre ambos foi de 4,49%, que poderia ser considerado inferior, ou da ordem dos erros próprios do MNT; enquanto espacialmente falando, a diferença não superou os 330m.

Portanto, em uma discussão muito acirrada entre um grupo que procure o menor custo e outro com perfil absolutamente ambientalista, se o primeiro relaxar um pouco sua posição, a defesa não teria um incremento substancial no custo.

Não tendo sido feita uma pesquisa de opinião posterior à obtenção dos resultados, não é possível dizer se esta diferença poderia ser tolerada pela

sociedade, ou seja, se ela estaria disposta a aceitar um incremento do orçamento desta obra de 4,45% para lograr o traçado ambientalmente mais correto.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

*A dúvida é a escola da verdade.*

*Francis Bacon*

### 7.1. Conclusões

O planejamento do uso dos recursos naturais, em especial dos recursos hídricos é, em definitivo, um problema de planejamento do uso do espaço. Esta tarefa é multidimensional, pois não existem objetivos únicos (nem estáticos), nem uma única percepção dos problemas e, portanto, das soluções possíveis e plausíveis. Para complicar as coisas, os variados objetivos ou critérios podem até estar em conflito entre si, como é o caso dos interesses econômicos e os ambientais.

Por estes motivos não existe (nem existirá?) uma metodologia padrão na elaboração de esquemas de planejamento do uso do solo, dado que os objetivos variam de região para região, de país para país.

A formulação de projetos de engenharia e a avaliação de seus efeitos não podem ser abordados com precisão matemática, pois é necessário levar em conta condicionamentos políticos, socio-econômicos, legais, institucionais, que os limitam, restringem ou, eventualmente, a inviabilizam. Caracterizar matematicamente a maioria desses condicionantes é, comumente, uma tarefa difícil. Isto faz com que seja imprescindível (ou pelo menos desejável) abordar essa tarefa segundo um paradigma multiobjetivo/multicritério e até construtivista.

Em um problema de otimização multiobjetivo/multicritério se tem, não apenas uma função-objetivo, senão um vetor de funções-objetivo e a otimização de um vetor é impossível. Porém, embora a indeterminação possa ser evidente, é indispensável tomar decisões num processo de planejamento estratégico, ou quando se planeja a solução de problemas.

A abordagem científica destas situações de incerteza requer uma matemática não muito tradicional, muitas vezes pouco conhecida pelos tomadores de decisões reais. Esta situação, que mistura incertezas e falta de conhecimento, se transforma no principal argumento da tradicional reclamação no sentido que existe uma brecha entre a teoria acadêmica e a engenharia prática.

O traçado de obras de engenharia com características unidimensionais tem, em teoria, infinitas soluções, porém, este problema pode ser abordado utilizando algoritmos para a definição dos conhecidos “caminhos de mínimo custo”. A pesquisa neste campo não é nova, ao ponto que os programas comerciais mais tradicionais que lidam com os SIG têm incorporado comandos que, com certas limitações, conseguem calculá-los. O algoritmo apresentado por Collischonn e Pilar (2000) é um avanço na superação dessas limitações.

No entanto, existe um inconveniente relacionado com a definição a priori da função-objetivo. Sua formulação não é tarefa fácil, pois é preciso conjugar objetivos de satisfação de necessidades sociais, políticas, ambientais e econômicas.

A otimização multiobjetivo/multicritério tem as suas origens nos trabalhos de Edgenworth e Pareto, nos finais do século XIX, embora alguns autores considerem como seminais outros trabalhos anteriores, como a Teoria da Utilidade, de Daniel Bernoulli, a Teoria do Bem-estar Social, criada a finais do século XVIII a partir dos trabalhos do Marques de Condorcet e a Teoria da Medição Psico-sensitiva, entre outros.

Os conceitos e definições associados à otimização multiobjetivo/multicritério, acertados ou errados, tentam objetivar de alguma maneira o subjetivo processo de decisão, rompendo com o mito da decisão ótima no mais puro e abstrato sentido matemático. Alguns autores definem estes métodos como uma terceira alternativa à eterna dicotomia entre pragmatismo e purismo.

O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo de apoio à decisão para ajudar na definição do traçado de obras de engenharia com características unidimensionais, como diques, canais, estradas, etc. O modelo foi testado e aplicado para definir a localização de uma porção da defesa norte da cidade de Resistencia, Argentina.

Para incorporar no processo decisório os aspectos que melhor refletissem a problemática abordada, foram consultados tomadores de decisões reais. Destas

consultas surgiu que, pelo menos três, seriam os aspectos mais relevantes: econômico, ambiental e político.

O primeiro estava relacionado com o fato que a defesa é uma obra pública e os dinheiros públicos devem ser alocados da melhor maneira possível. A incorporação do aspecto ambiental esteve relacionada com a procura do traçado de menor impacto ambiental possível, o que é certamente um anseio social. O aspecto político tentou capturar as expectativas de grupos com forte influência na opinião pública e na sociedade, que reclamam que a cidade precisa mais espaço com baixa vulnerabilidade às enchentes para se expandir, e cabe lembrar que o crescimento atual, mal planejado, é de dois hectares por semana.

Para conjugar estes aspectos ou pontos de vista, foram exploradas técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério, e se desenvolveram mais de uma dúzia de variantes. Os resultados da aplicação destas variantes não mostraram diferenças importantes nem nos custos (inferiores a 5%), nem na localização espacial dos traçados.

Na suposição que os modelos montados tenham capturado adequadamente os aspectos considerados, os resultados estariam indicando que as discussões que existem entre pessoas e grupos de pessoas com pontos de vista diferentes sobre o melhor traçado desta obra são apenas de tipo ideológica e/ou dialética.

A abordagem geral que se fez do problema analisado poderia ser aplicada no planejamento de qualquer outra obra de engenharia, em especial daquelas que têm características unidimensionais, embora a unidimensionalidade não seja nem uma condicionante, nem uma limitante. Além disso, poderia servir também para orientar discussões entre setores da sociedade com óticas muito diferentes, como por exemplo economistas e ambientalistas.

Foram integrados vários métodos, abordados por áreas do conhecimento diferentes (Pesquisa Operacional, Teoria da Decisão, SIG), o que representa um avanço no sentido da abordagem conjunta destes temas numa única entidade ou construção conceitual.

O trabalho partiu da extensão da Programação Dinâmica tradicional (definida neste trabalho como vetorial) a um espaço geográfico -campo tradicional de utilização dos SIG-, com discretização espacial de tipo raster e que pode ser enquadrada no denominado problema de caminho de mínimo custo (least-cost-path).

Mas, para aplicar a Programação Dinâmica, tanto a versão vetorial como a raster, é preciso ter definida a priori uma função-objetivo. Para isto, foram exploradas técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério, que foram resolvidas aplicando, entre outros métodos, Programação Linear.

Os programas de SIG de mais ampla difusão possuem comandos para resolver com certas limitações problemas de traçado ótimo. Mas, sua utilização em um contexto multiobjetivo é comumente realizada por meio de uma função-objetivo de tipo “soma ponderada” dos indicadores dos aspectos considerados relevantes, onde os ponderadores são estabelecidos por negociações entre os tomadores de decisões reais. A utilização de uma abordagem baseada no Método da Análise Hierárquica - MAH e na Programação de Compromisso introduziu um pouco de objetividade nesta tarefa tão subjetiva.

As aplicações das técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério no planejamento do uso do espaço em geral e de obras de engenharia em particular pareceriam orientadas a ordenar hierarquicamente um conjunto de soluções viáveis. Neste sentido, sua aplicação no próprio processo de otimização poderia ser considerada uma novidade deste trabalho.

A base da abordagem multiobjetivo/multicritério foi a matriz de comparações paritárias do MAH, que se utilizou, inclusive, com a Programação de Compromisso. No entanto, durante o preenchimento destas matrizes foi percebido nos tomadores de decisões reais certo “desconforto” na hora de terem que atribuir uma pontuação precisa às relações entre atributos ou aspectos sendo comparados. Para contornar este problema foram introduzidos elementos da Lógica Difusa, que permitiram levar em consideração estas dúvidas durante o processo decisório, o que também poderia ser considerado uma novidade desta pesquisa.

Outra novidade é a proposta de uma metodologia diferente para a elaboração das matrizes de comparações paritárias entre aspectos, que foi explicada no item 4.3.2.1.i., e esta variante elimina a necessidade de verificação da consistência da matriz.

O esquema de patamares de indiferença desenvolvido nesta pesquisa permitiu comparar aspectos relevantes muito dissimilares, como o econômico, o ambiental e o político, numa métrica única.

Finalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados com relação à discretização espacial da informação, que mostrou que no problema estudado não tem muita relevância.

Com referência à operacionalização do sistema de apoio à decisão obtido, ele foi elaborado utilizando apenas ferramentas computacionais (software e hardware) simples, de ampla difusão, o que permite afirmar que sua aplicabilidade poderia ser imediata, inclusive por ter mostrado boa aceitação nos tomadores reais de decisões, inclusive a parte do relaxamento difuso, que permitiu incorporar as suas incertezas ao próprio processo de decisão. No entanto, é importante salientar que a planilha de cálculo Excel não é a ferramenta mais eficiente (embora eficaz) para manipular imagens e mapas, pois os arquivos resultantes têm um tamanho muito grande.

Portanto, por não ter utilizado programas computacionais elaborados ad hoc, os que normalmente devem ser readequados para cada nova aplicação, o sistema de apoio à decisão desenvolvido possui um caráter de absolutamente genérico (no sentido de não depender de um software específico ou muito caro) para abordar problemas relacionados ao planejamento e gestão do espaço.

O fato de ter considerado apenas três aspectos não deve ser entendido como uma limitação, podendo ser incorporados outros que, segundo o caso e o parecer dos decisores, sejam relevantes ao problema analisado.

Como conclusão final, o trabalho que aqui se apresenta, embora motivado por um problema específico, foi propositivo, no sentido que foram desenhados esquemas de cálculo que, entre outras coisas, ampliam a utilização das técnicas de otimização multiobjetivo/multicritério e que, ademais, servem de preenchimento de lacunas que, segundo os trabalhos consultados, apresentam algumas destas técnicas.

## 7.2. Recomendações

Com referência ao problema que serviu para testar a aplicabilidade e adequacidade da metodologia proposta, a pesquisa poderia ser aprofundada incorporando outros aspectos que, no caso analisado, geram conflitos muito difíceis, como os custos de desapropriação de terrenos e o custo de transporte do material

para a construção do aterro, que normalmente é muito significativo, pelo menos na região de Resistencia.

A aplicação dos algoritmos próprios do Idrisi para resolver o problema de encontrar os caminhos de mínimo custo foi possível, pois os aspectos considerados não têm relações significativas com gradientes direcionais, como a declividade, que é uma característica espacial que varia segundo a direção e o sentido da análise. No projeto de outro tipo de obras, também lineares, como por exemplo um canal, uma declividade muito íngreme requereria a utilização de comportas; mas, se ela fosse contrária ao sentido do fluxo, poderia ser requerido recalque para conseguir um escoamento.

Em situações nas quais o caráter direcional seja relevante, o problema seria perfeitamente tratável utilizando o esquema apresentado por Collischonn e Pilar (2000) mas, é claro, aplicando um código computacional elaborado pelos autores em linguagem Fortran, e que deveria ser reescrito para cada aplicação.

Um outro tema que poderá ser aprofundado na continuação da pesquisa é a estruturação do problema e a operacionalização dos diferentes pontos de vista dos possíveis decisores. Para isto seria preciso elaborar os conhecidos como “mapas cognitivos” e, talvez, incorporar pesquisadores relacionados à Sociologia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALMEIDA, S.B.; BOND, N.S. 1991. Metodologia para seleção de alternativas de divisão de queda no estudo de inventário hidrelétrico da bacia do rio Doce. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABRH. v.2, p.482-490.
- ANDREU ÁLVAREZ, J. 1993. Análisis multiobjetivo. In: \_\_\_\_\_. **Conceptos y métodos para la planificación hidrológica**. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p.239-248.
- BALTAR, A.M.; CORDEIRO NETTO, O.M. 1998a. Métodos multicritério aplicados a hierarquização de investimentos na área de recursos hídricos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1998, Gramado. **Anais virtuais**. Porto Alegre: UFRGS.
- BALTAR, A.M.; CORDEIRO NETTO, O.M. 1998b. Análise de sensibilidade em hierarquização de projetos: o caso do Electre III. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS, 1998, Gramado. **Anais virtuais**. Porto Alegre: UFRGS.
- BANNA E COSTA, C.; VANSNICK, J.C. 1995. **Uma nova abordagem ao problema da construção de uma função de valor cardinal: Macbeth**. Florianópolis: UFSC. 21p.
- BARBOSA, P.S.F. 1997. O emprego da análise multiobjetivo no gerenciamento dos recursos hídricos. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, v.5, n.8, p.42-46.
- BARREDO CANO, J.I. 1996. **Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio**. Madrid: RA-MA. 264p.
- BARROS, M.T.L. 1997. A programação dinâmica aplicada à engenharia de recursos hídricos. In: TÉCNICAS quantitativas para gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH. p.239-277.
- BERNSTEIN, P.L. 1997. **Desafio aos deuses: a fascinante história do risco**. Rio de Janeiro: Campus. 389p.
- BRAGA JÚNIOR, B.P.F. 1985. Análise de decisão para seleção de modelos de previsão de vazões. **Revista Brasileira de Engenharia. Caderno de Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, v.3, n.3, p.53-67.
- BRAGA JÚNIOR, B.P.F.; MARCELLINI, L.; BARROS, M.T.L.; ALMEIDA, S.B. 1991. Análise de decisão multiobjetivo: o caso do vale do rio Doce. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991, Gramado. **Anais**. Rio de Janeiro: ABRH. v.2, p.501-510.

- BRAGA JÚNIOR, B.P.F.; GOBETTI, L. 1997. Análise multiobjetivo. In: TÉCNICAS quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS:ABRH. p.361-420.
- BRONSON, R. 1996. **Investigación de operaciones** México: McGraw -Hill. 324p.
- CHANG, N.; CHEN, C.G. 1997. A fuzzy multi-objective programming approach for optimal management of the reservoir watershed. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v.99, p.289-302.
- CIFRES GIMÉNEZ, E. 1993. Programación dinámica y aplicaciones. In: ANDREU ALVAREZ, J. (Ed.). **Conceptos y métodos para la planificación hidrológica**. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p.227-238.
- COHON, J.; MARKS, D.H. 1973. Multiobjective screening models and water resources investment. **Water Resources Research**, Washington, v.9, n.4, p.826-836.
- COHON, J.; MARKS, D.H. 1975. A review and evaluation of multiobjective programming techniques. **Water Resources Research**, Washington, v.11, n.2, p.208-220.
- COHON, J.L. 1978. **Multiobjective programming and planning**. New York: Academic Press. 333p.
- COLLISCHONN, W.; PILAR, J.V. 2000. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v.14, n.4, p.397-406.
- DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA. 1995. **Cuantificación de daños en el Gran Resistencia y Pcia. Roque Saenz Peña por las inundaciones de 1982/83 y 1992**. Resistencia: SUCCE – SUPCE. Informe de consultoría.
- DEPETTRIS, C.A.; ROHRMANN, H.R. 1998. Las crecidas e inundaciones recurrentes en el litoral argentino. **Revista Vivienda**, jun.
- DEPETTRIS, C.A.; MENDIONDO, E.M.; NEIFF, J.J.;ROHRMANN, H.R. 2000. **Flood defence strategy at confluence of Parana-Paraguay rivers**. Kassel: SIDCI. 11p.
- DOUGLAS, D. H. 1994. Least cost path in GIS using na accumulated cost surface and slope lines. **Cartographica**, Toronto, v. 31, n. 3, p. 37-51.
- DUCKSTEIN, L.; SZIDAROVSKI, F. 1994. Distance based techniques in multicriterion decision making. In: BOGARDI, J.J., NACHTNEBEL, H.P. **Multicriteria decision analysis in water resources management**. Wageningen: Unesco. p.86-112.
- EASTMAN, J. R. 1995. **Idrisi for Windows: users guide**. Worcester: Clark University.

- EPPEL, G.D.; GOULD, F.J.; SCHMIDT, C.P.; MOORE, J.H.; WEATHERFORD, L.R. 2000. **Investigación de operaciones en la ciencia administrativa**. México: Prentice-Hall. 792p.
- EVALUACIÓN global de los recursos mundiales de agua dulce: artículo especial. 1977. **Boletín. Waterway**, n.11, jul/set. <Disponível em: [http://www.unesco.org/uy/phi/wateresp/Wat11\\_artesp.html](http://www.unesco.org/uy/phi/wateresp/Wat11_artesp.html)>.
- EVARSA. 1997. **Estadística hidrológica**. 1997. Buenos Aires: Subsecretaría de Recursos Hídricos. t.1.
- FANDEL, G.; SPRONK, J. [1994?]. TDMC no seu caminho para a maturidade. In: BANNA E COSTA, C. **Métodos de decisão multicritérios e aplicações**. Florianópolis: UFSC. p.1-5.
- FREITAS, A.J. 2000. Gestão de recursos hídricos. In: SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. (Ed.) **Gestão de recursos hídricos**: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos. cap.1, p.1-120.
- GALVÃO, C.O. 1999. Introdução à teoria dos conjuntos difusos. In: GALVÃO, C.O.; VALENÇA, M.J.S. (Org.). **Sistemas inteligentes**: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, ABRH. cap.5, p.167-191.
- GIACOSA, R.; PAOLI, C.; CACIK, P. 2000. Conocimientos del régimen hidrológico. In: PAOLI, C.; SCHREIDER, M. (Org.). **El río Paraná**. Santa Fe: FICH. p.69-104.
- GOICOECHEA, A.; DUCKSTEIN, L.; FOGEL, M. 1976. Multiobjective programming in watershed management: a study of the Charleston Watershed. **Water Resources Research**, Washington, v.12, n.6, p.1085-1092.
- HAMMAD, A.; ITOH, Y.; NISHIDO, T. 1993. Bridge planning using GIS and expert system approach. **Journal of Computing in Civil Engineering**, New York, v.7, n.3, p.278-295.
- JACQUET-LAGRÈZE, E. [1994?]. Conceitos básicos para suporte de decisão multicritério. In: BANNA E COSTA, C. **Métodos de decisão multicritérios e aplicações**. Florianópolis: UFSC. p.6-14.
- KINDLER, J. 1994. Interactive multiobjective decision making: learning about tradeoffs. In: BOGARDI, J.J., NACHTNEBEL, H.P. **Multicriteria decision analysis in water resources management**. Wageningen: Unesco. p.139-150.
- LANNA, A.E.L. 1982. **Operação estratégica de reservatórios para suprimento hídrico e controle de cheias**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 124p. (Recursos Hídricos. Publicação n.4).
- LANNA, A.E.L. 1997. Gestão dos recursos hídricos. In: TUCCI, C.E. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS: ABRH. cap.19, p.727-768.

- LEE, J.; STUCKY, D. 1998. On applying viedshed analysis for determining least-cost-path on digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v.12, n.8, p.891-905.
- MEIJERINK, A.M.J.; BROWER, H.A.M.; MANNAERTS, C.M.; VALENZUELA, C. 1994. **Introduction to the use of geographic information systems for practical hydrology**. Enschede: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences. 243p. (ITC Publication, n.23).
- NACHTNEBEL, H.P. 1994. Multicriterion decision making methods with ordinal and cardinal scales: Electre III. In: BOGARDI, J.J., NACHTNEBEL, H.P. **Multicriteria decision analysis in water resources management**. Wageningen: Unesco. p.113-138.
- NEOS Guide. 1996. [Argone: Optimization Technology Center]. Disponível em: <<http://www-c.mcs.anl.gov/home/otc/Guide>>.
- NIJKAMP, P.; VOOGD, H. [1994?]. Uma introdução informal à avaliação multi - critérios. In: BANNA E COSTA, C. **Métodos de decisão multicritérios e aplicações**. Florianópolis: UFSC. p.36-49.
- ORFEO, O. 1996. Critério para la clasificación de barras em grandes rios entrelazados de llanura subtropical. In: SIMPOSIO DE ARCILLAS, 1., Bahía Blanca. **Actas**. p.231-236.
- PAOLI, C.; CACIK, P. 2000. Régimen de crecidas y análisis de caudales máximos.. In: PAOLI, C.; SCHREIDER, M. (Org.). **El río Paraná**. Santa Fe: FICH. p.105-173.
- PEDROLLO, O.C. 2000. **Previsão em tempo atual de cheias com uso de sistema especialista difuso**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre.
- PILAR, J.V. 1999. Programación dinámica apliada a los recursos hídricos. **Revista del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales**: CURIHAM, v.5, n.2, p. 36-50.
- PILAR, J.V. 2001. Modelo de optimización multiobjetivo como sistema de apoyo a la decisión en el proceso de otorgamiento de becas en las facultades de la UNNE. In: ENCUESTRO NACIONAL DE DOCENTES DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 14., [e] ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EN INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 12., Huerta Grande, Córdoba. **Anais**.
- PILAR, J.V. 2003. Utilización de un modelo de apoyo a la decisión con relajación "difusa" para la elección de la traza de una defensa para el Gran Resistencia. In: ENCUESTRO NACIONAL DE DOCENTES DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 16., [e] ESCUELA DE PERFECCIONAMIENTO EM INVESTIGACIÓN OPERATIVA, 14., La Plata. **Anais**.

- PILAR, J.V.;ROHRMANN, H.R.; VARGAS, R.; BURGOS, J.C. 2002. Modelo de apoyo a la decisión multiobjetivo para la elección de la traza de una defensa para el Gran Resistencia. In: CONGRESO NACIONAL DEL AGUA, 19., Villa Carlos Paz, Córdoba. **Anais**.
- RAYANO, M. 2003. **Geomorfología y sedimentología del río Paraná en el área del segundo puente interprovincial Chaco-Corrientes**. Dissertação (Maestría en Ciencias de la Ingeniería) - Fac. de Ingeniería-UNNE, Resistencia. [Ainda não defendida].
- ROMERO, C. 1996. **Análisis de las decisiones multicriterio**. Madrid: Algorán 115p.
- RUBERTO, A.R. 1999. **Hidroquímica de la cuenca inferior del río Negro (Chaco)**. Dissertação (Maestría em Gestão Ambiental y Ecología) - Fac. de Arquitectura y Urbanismo-UNNE, Resistencia.
- SAAB, Y.; VANPUTTE, M. 1999. Shortest path planning on topographical maps. **IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics**, Part A, Systems and Humans, New York, v.29, n.1, p.139-150.
- SAATY, T. 1991. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: Makron. 367p.
- SAKAWA, M. 1993. **Fuzzy sets and interactive multiojective optimization**. New York: Plenum Press. 309p.
- SAHUQUILLO HERRAIZ, A. 1993. Reflexiones sobre la planificación hidrológica. In: ANDREU ÁLVAREZ, J. (Ed.) **Conceptos y métodos para la planificación hidrológica**. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. p.1-14.
- SCHMIDT, A.M.A. 1995. **Processo de apoio à tomada de decisão: abordagens AHP e Macbeth**. Dissertação (Mestrado) - UFSC-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis.
- SCHOWENGERDT, R.A. 1983. **Techniques for image processing and classification in remote sensing**. Orlando: Academic Press. 249p.
- SCORNIK, C. O. 1998. **Diagnóstico urbano expeditivo del Área Metropolitana del Gran Resistencia**. Resistencia: SUCCE – SUPCE. Informe de consultoría.
- SETEC. 2001. **Defensa Frontal AMGR, Tramo 3, Barranqueras, Chaco: informe de primera componente**. Resistencia: SUCCE – SUPCE. Informe de consultoría.
- SIMONOVIC, S.P. 1992. Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice. **Journal of Water Resources Planning and Management**, New York, v.118, n.3, p.262-280.
- SOUZA, F.C. Bragança de. 1999. **Sistema de apoio à decisão em ambiente espacial aplicado em um estudo de caso de avaliação de áreas destinadas para disposição de resíduos sólidos na Região Metropolitana de Porto**

- Alegre.** Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.
- STEFANAKIS, E.; KAVOURAS, M. 1995. On the determination of the optimum path in space. In: EUROPEAN CONFERENCE ON SPATIAL INFORMATION THEORY, Semmering. **Proceedings**. Berlin: Springer.
- SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. 1978. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw-Hill. 397p.
- TAHA, H.A. 1995. **Investigación de operaciones** 5.ed. México. Alfaomega. 960p.
- VENTSEL, E.S. 1983. **Investigación de operaciones: problemas, principios, metodología**. Moscú: MIR. 280 p.
- VIEIRA, V.P.P.B. 1996. Teoria dos conjuntos difusos e sua aplicação a projetos de recursos hídricos. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v.1, n.1, p.110-123.
- WAGNER, H.M. 1986. **Pesquisa operacional**. 2.ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall. 851 p.
- WEBER, E.; HASENACK, H. 1998. **Análise de alternativas de traçado de um gasoduto utilizando rotinas de apoio à decisão em SIG**. <Disponível em: [http:// www.fatorgis.com.br](http://www.fatorgis.com.br)>.
- ZIONTS, S. [1994?]. Programação matemática múltiplos critérios: uma visão geral e diversas abordagens. In: BANNA E COSTA, C. **Métodos de decisão multicritérios e aplicações**. Florianópolis: UFSC. p.49-63.