



COPPE/UFRJ

**METODOLOGIA BASEADA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DE ÁREAS PARA A
CONSTRUÇÃO DE UM REPOSITÓRIO PARA O COMBUSTÍVEL NUCLEAR
USADO**

Vívian Borges Martins

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim
Nelson Ferreira Fernandes

Rio de Janeiro

Julho de 2009

METODOLOGIA BASEADA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DE ÁREAS PARA A
CONSTRUÇÃO DE UM REPOSITÓRIO PARA O COMBUSTÍVEL NUCLEAR
USADO

Vívian Borges Martins

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

Prof. Nelson Ferreira Fernandes, D.Sc

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc

Prof. Fernando Carvalho da Silva, D.Sc

Prof. Manoel do Couto Fernandes, D. Sc

Dr. Sérgio de Queiroz Bogado Leite, D. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JULHO DE 2009

Martins, Vívian Borges

Metodologia Baseada em Sistemas de Informação Geográfica e Análise Multicritério para a Seleção de Áreas para a Construção de um Repositório para o Combustível Nuclear Usado./ Vívian Borges Martins. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 124 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim

Nelson Ferreira Fernandes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 84-96.

1. Rejeitos Radioativos. 2. Seleção de Locais. 3. Sistemas de Informação Geográfica. 4. Decisão Multicritério. I. Alvim, Antonio Carlos Marques *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, meus pais, minha avó e meus irmãos por todo o apoio recebido ao longo de toda esta caminhada.

E a meu filho Thiago, por ter doado, mesmo que sem o saber, seu tempo e seu amor para a concretização de um sonho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, pela orientação e apoio no desenvolvimento do trabalho, e pela confiança em mim depositada.

Ao Prof. Nelson Ferreira Fernandes, pela orientação, atenção e por me auxiliar na compreensão de uma área difícil que é geologia.

Ao Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo pela atenção, apoio, incentivo e disponibilidade que me ajudaram a atravessar os momentos de dificuldade.

Aos especialistas consultados, André Luiz Ferrari, Arnaldo Mezhari, Daniel Albert Skaba, Francisco de Assis Dourado da Silva, Gerson Cardoso da Silva Júnior, Gustavo de La Reza, José Francisco Lumberras e Julio Cesar Horta de Almeida, por terem aceitado cooperar com este trabalho dedicando parte de seu tempo, já tão curto, às análises e avaliações necessárias.

Ao Sr Jorge Pimentel do CPRM, por todo apoio que me dispensou, mesmo quando se encontrava extremamente ocupado e por ter, sempre que necessitei, me auxiliado no que lhe foi possível.

Ao Pedro Henrique, pela grande ajuda com o tratamento dos dados, análises e elaboração dos mapas no ArcGIS.

Ao amigo João, pelas valiosas sugestões dadas ao ler este trabalho, pelo apoio, incentivo e por me fazer crer que no final tudo daria certo.

À amiga Anna Letícia, pela amizade e por todo o apoio que me dedicou ao longo deste período. Pelas conversas, sugestões e críticas que foram muito importantes na condução do meu trabalho.

Ao amigo Pedro Saldanha, que mais uma vez se superou no apoio que me concedeu, através de contatos, documentos e conversas.

À amiga Renata Espíndola, pela amizade, discussões e sugestões e também pela paciência com que sempre me escutou.

À Jô, Liliane e Reginaldo, funcionários do Programa de Engenharia Nuclear, pelo empenho em resolver rápido e da melhor maneira possível nossos problemas acadêmicos.

Aos demais professores e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear.

Aos meus pais, cujo amor, incentivo e presença constante foram fundamentais para eu chegar aonde cheguei, à minha avó, pela força que fez para que eu tivesse êxito no caminho que escolhi e aos meus irmãos pelo carinho e pelas palavras de apoio.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro concedido para o desenvolvimento de minha pesquisa.

E por último agradeço a Deus, porque sem ele nada é possível.

*Caminhante, são teus rastos
o caminho, e nada mais;
caminhante, não há caminho,
faz-se caminho ao andar.
Ao andar faz-se o caminho,
e ao olhar-se para trás
vê-se a senda que jamais
se há de voltar a pisar.
Caminhante, não há caminho,
somente sulcos no mar.*

Cantares, Antonio Machado

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

METODOLOGIA BASEADA EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA A SELEÇÃO DE ÁREAS PARA A
CONSTRUÇÃO DE UM REPOSITÓRIO PARA O COMBUSTÍVEL NUCLEAR
USADO

Vívian Borges Martins

Julho/2009

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim
Nélson Ferreira Fernandes

Programa: Engenharia Nuclear

O objetivo desta tese é desenvolver uma metodologia para seleção de locais para o repositório final do combustível nuclear usado, utilizando Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Decisão Multicritério.

O processo decisório em questões deste tipo é freqüentemente complexo, dado o grande número de parâmetros espaciais e as opiniões conflitantes dos diversos envolvidos. A utilização do SIG combinado às técnicas multicritério permite que os dados sobre os parâmetros espaciais possam ser armazenados, tratados e analisados e que as opiniões dos diversos envolvidos sejam incorporadas a análise. Estas duas ferramentas em conjunto tornam o processo decisório mais transparente, ágil e confiável.

A metodologia é aplicada ao caso particular do Estado do Rio de Janeiro. Foram utilizados pesos, obtidos a partir de um painel de especialistas e do método de Análise Hierárquica (AHP), e dados cartográficos do Estado. Estas informações foram combinadas no SIG. A aplicação mostrou que é possível não só selecionar e classificar áreas quanto a sua aptidão para o objetivo proposto, como também excluir as áreas claramente inadequadas, o que otimiza o processo de seleção, reduzindo o espaço de busca e conseqüentemente minimizando os gastos e o tempo despendido nestas buscas.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM AND MULTICRITERIA ANALYSIS
METHOD FOR SITE SELECTION OF SPENT NUCLEAR FUEL DISPOSAL

Vívian Borges Martins

July/2008

Advisors: Antonio Carlos Marques Alvim

Nélson Ferreira Fernandes

Department: Nuclear Engineering

This thesis aims to develop a site selection methodology for the construction of final repository for the spent nuclear fuel disposal, by using geographic information systems (GIS) and multi-criteria decision analysis.

Decision making processes of this kind are often complex, given the great number of space parameters to consider and also the typically conflicting opinions of the diverse stakeholders. By using GIS, data from different space parameters can be quickly and reliably stored, treated and analyzed. Multi-criteria techniques allow for the incorporation of different stakeholders' opinions. These tools, when jointly used, allow for the decision process to be more transparent, quick and reliable.

The method developed was applied to the particular case of the state of Rio de Janeiro. Weights obtained from an expert panel and also by using the Hierarchical Analysis Method and cartographic data were combined in the GIS. The application showed that it is possible not only to select and classify areas as to their aptness for the proposed objective, but also to exclude those clearly inadequate areas, thus optimizing the selection process by reducing the search space and consequently minimizing costs and the time spent in the search.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO.....	4
1.2 RELEVÂNCIA	5
1.3 ORIGINALIDADE	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 O PROCESSO DE SELEÇÃO DE SÍTIOS	8
2.1.1 IAEA	10
2.1.2 <i>Programas de Seleção de Sítios em Alguns Países</i>	12
2.1.2.1 Finlândia.....	12
2.1.2.2 Suécia	13
2.1.3 <i>Processos de Seleção de Sítios no Brasil</i>	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
3.1 DISPOSIÇÃO GEOLÓGICA.....	19
3.1.1 <i>O Repositório Geológico</i>	23
3.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA	25
3.2.1 <i>Componentes de um SIG</i>	27
3.2.1.1 Entrada de dados	28
3.2.1.2 Armazenamento e Gerenciamento de Dados	28
3.2.1.3 Análise e Manipulação dos Dados	32
3.2.1.4 Saída de Dados	33
3.3 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO.....	33
3.3.1 <i>Abordagens para Problemas Multicritério</i>	36
3.3.1.1 Abordagem Multi-objetivo.....	36
3.3.1.2 Abordagem Multi-atributo	37
3.4 ANÁLISE DE DECISÃO MULTICRITÉRIO ESPACIAL.....	38
3.4.1 <i>Infraestrutura do Processo de Análise de Decisão Multicritério Espacial</i>	39
3.4.1.1 Definição do Problema.....	41
3.4.1.2 Critérios de Avaliação.....	41
3.4.1.3 Alternativas	41
3.4.1.4 Pesos dos Critérios	42
3.4.1.5 Regras de Decisão	42
3.4.1.6 Recomendação	43

4	METODOLOGIA.....	44
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	44
4.2	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO E RESTRIÇÕES.....	44
4.2.1	<i>Mapas de Critérios</i>	47
4.2.1.1	Padronização dos Critérios.....	48
4.2.2	<i>Alternativas de Decisão</i>	48
4.2.2.1	Restrições	49
4.2.3	<i>Atribuição de Pesos aos Critérios</i>	50
4.2.3.1	Geração da Matriz de Comparação	53
4.2.3.2	Cálculo dos Pesos dos Critérios	54
4.2.3.3	Estimativa da Consistência das Relações.....	55
4.2.4	<i>Agregação do SIG a Análise Multicritério - Regras de Decisão</i>	56
4.2.4.1	Desenvolvimento da Hierarquia.....	57
4.2.4.2	Comparação dos Elementos de Decisão.....	58
4.2.4.3	Construção do Índice de Adequabilidade.....	58
4.2.4.4	Recomendação	60
5	ESTUDO DE CASO	61
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.	61
5.2	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	63
5.3	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	67
5.3.1	<i>Estruturas</i>	69
5.3.2	<i>Recursos Minerais</i>	69
5.3.3	<i>Litologia</i>	69
5.3.4	<i>Hidrogeologia</i>	70
5.3.5	<i>Relevo</i>	71
5.3.6	<i>Uso e Cobertura do Solo</i>	71
5.3.7	<i>Transporte</i>	71
5.3.8	<i>Unidades de Conservação</i>	72
5.3.9	<i>Demografia – Áreas Urbanas</i>	72
5.4	ATRIBUIÇÃO DE PESOS.....	75
5.5	AGREGAÇÃO DO SIG À ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	77
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
6.1	CONCLUSÕES.....	80
6.2	RECOMENDAÇÕES	82

7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	ANEXO I.....	97
	ANEXO II	105
	ANEXO III.....	108
	ANEXO IV.....	110
	ANEXO V	120

Índice de Figuras

Figura 2.1: Piscina de elemento combustível de Angra I (a) e de Angra II (b).....	15
Figura 2.2 Etapas na seleção do local.	17
Figura 3.1: Exemplos de sistemas multi-barreiras na disposição geológica e sistema KBS-3. ..	21
Figura 3.2 - Desenho esquemático da área industrial de um repositório (maquete)	25
Figura 3.3 – Possível <i>layout</i> do repositório geológico	25
Figura 3.4 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica.....	27
Figura 3.5 - Tipos de dados espaciais organizados em planos de informação	29
Figura 3.6 - Estrutura dos dados em um SIG	29
Figura 3.7 - Modelo de representação matricial ou raster.	30
Figura 3.8: Modelo de representação vetorial: (a) pontos, (b) linhas e (c) polígonos.....	31
Figura 3.9 – Infraestrutura para problemas de decisão multicritério.....	35
Figura 3.10 - Análise de Decisão Multicritério Espacial	39
Figura 3.11 – Infraestrutura para Análise de Decisão Multicritério Espacial	40
Figura 4.1 – Estrutura Hierárquica	52
Figura 5.1: Exemplos que ilustram que um fator “X” pode ser favorável em certas regiões e menos favorável em outras, dependendo da escala utilizada.	62
Figura 5.2 - Utilização dos operadores matemáticos e das funções no <i>Spatial Analyst</i>	79

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Cronologia dos trabalhos realizados.....	16
Tabela 3.1 - Comparação entre representações para mapas temáticos.....	32
Tabela 3.2 – Comparação entre as abordagens multi-atributo e multi-objetivo.....	38
Tabela 4.1 – Padronização dos critérios de avaliação	48
Tabela 4.2 – Matriz relação alternativa-atributo	49
Tabela 4.3 – Escala para comparação para a par.....	53
Tabela 4.4 – Matriz de comparação dos critérios de avaliação.....	54
Tabela 4.5 – Passo I (Soma dos valores das colunas)	54
Tabela 4.6 – Passo II (Matriz de Comparação Normalizada)	54
Tabela 4.7 – Passo III (Cálculo dos pesos)	55
Tabela 4.8 – Passo IV (Cálculo do vetor soma ponderado)	55
Tabela 4.9 – Passo V (Cálculo do vetor de consistência)	55
Tabela 4.10 – Índices de Consistência Randômica para $n=1, 2, \dots, 15$	56
Tabela 4.11 – Classes de Adequabilidade	60
Tabela 5.1 – Critérios de seleção e atributos associados.....	68
Tabela 5.2 – Classes utilizadas para padronização dos critérios.....	74
Tabela 5.3 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Litologia.....	74
Tabela 5.4 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Uso e Cobertura.....	74
Tabela 5.5 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Favorabilidade Hidrogeológica... 74	
Tabela 5.6 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Recursos Minerais	74
Tabela 5.7 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Transportes	75
Tabela 5.8 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Declividade	75
Tabela 5.9 – Matriz de Comparação relacionada à Segurança a Longo Prazo	76
Tabela 5.10 – Matriz de Comparação relacionada a Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental 76	
Tabela 5.11 – Matriz de Comparação relacionada a Viabilidade Técnica	76
Tabela 5.12 – Matriz de Comparação relacionada a Meta	76
Tabela 5.13 - Segurança a Longo Prazo.....	77
Tabela 5.14 - Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental	77
Tabela 5.15 - Viabilidade Técnica	77
Tabela 5.16 - Meta	77

1. Introdução

A energia nuclear tem despertado um renovado interesse em todo o mundo. Este renascimento deve-se a fatores de ordem política, econômica, social e ambiental.

Na arena política, existem as preocupações quanto à segurança do abastecimento de combustíveis fósseis devido à crescente dependência da importação de petróleo e gás de países com política instável ou hostil. Neste caso, a principal vantagem do uso do urânio é que ele garante um suprimento seguro de energia. O urânio é encontrado principalmente em países politicamente estáveis, tais como a Austrália, o Canadá e o Brasil, que detém a 6ª maior reserva de urânio mundial. Já o petróleo é encontrado frequentemente em países politicamente instáveis, tais como o Iraque, o Irã, a Venezuela e a Arábia Saudita. Se um país obtém a maior parte de sua energia de centrais nucleares, então seu suprimento de energia é seguro, sem que haja preocupações com a instabilidade de governos que ameaçam cortar o fornecimento ou usam de chantagem para atribuir preços mais altos a seus combustíveis, o que afeta também o âmbito econômico da questão energética.

Quanto à questão social, houve um grande aumento na demanda energética, o que provocou uma busca por fontes alternativas de energia, tais como a energia nuclear e as fontes renováveis. O problema destas últimas é que tanto a energia solar quanto a energia eólica, no estágio atual de desenvolvimento em que se encontram, são capazes de suprir apenas uma pequena porção da necessidade energética atual. Além disso, como captam energia diretamente da natureza, também são limitadas por ela, o que dificulta a sua utilização em locais que não dispõem destes recursos em abundância ou que estão sujeitos à sazonalidade destes recursos, como por exemplo, os países do norte europeu em relação à energia solar.

Todas estas questões têm contribuído para o chamado Renascimento da Energia Nuclear. Mas um fator talvez possa ser considerado o mais importante, e tem contribuído significativamente para o retorno das discussões acerca do uso da energia nuclear – o aquecimento global.

Esse fenômeno, resultado da liberação de gases tais como o CO₂, o vapor d'água e o metano, denominados de gases do efeito estufa (GEE), consiste no aprisionamento na atmosfera de parte da energia solar que a Terra devolve ao espaço interplanetário. Isto faz com que a temperatura da Terra se eleve e ocorra uma série de impactos adversos tais como uma ocorrência mais freqüente e extrema de problemas climáticos,

como secas, enchentes e ondas de calor, que por sua vez causam mortes, danos materiais e perdas agrícolas (GELLER, 2003).

Este fenômeno foi identificado já na segunda metade do século XIX. Atualmente diversos cientistas e organizações debruçam-se sobre este tema, dentre os quais deve-se destacar a atuação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), uma agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU), e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), responsável pelas questões ambientais no âmbito da ONU.

O IPCC é responsável por avaliar a informação científica, técnica e socioeconômica disponível sobre as mudanças climáticas e, em seu último relatório (*Climate Change 2007 – Fourth IPCC Assessment Report*) no volume desenvolvido pelo Grupo de Trabalho III (Mitigação das Mudanças Climáticas) (FISHER *et al*, 2007), declara que a energia nuclear pode ser benéfica para a questão do aquecimento global - se empregada cuidadosamente, ela tem um amplo potencial como opção de mitigação das emissões de CO₂, com uma boa relação custo-benefício, mas problemas como potenciais acidentes com reatores, proliferação de armas nucleares e disposição e gerenciamento do rejeito nuclear podem representar fatores restritivos.

A recomendação tem origem na ampla discussão a respeito da energia nuclear como energia limpa, ou seja, ela tem importante papel na mitigação do efeito estufa devido a sua operação não emitir CO₂ ou outros gases responsáveis pelo efeito estufa, sendo que apenas uma pequena quantidade (0,5 - 4%) das emissões de uma planta a carvão com capacidade de geração equivalente (TAYLOR, 1997) é emitida durante o seu ciclo de vida, nas etapas de mineração e transporte. Isto faz dela, em relação à questão das emissões, uma energia limpa, já que é sabido que as atividades relacionadas à energia, principalmente a queima de combustíveis fósseis, produzem cerca de 78% de emissões de dióxido de carbono e 23% de emissões de metano provocadas pelo homem (HOLDREN e SMITH, 2000 *apud* GELLER, 2003).

Um fator importante neste renascimento da energia nuclear é que a confiança pública na operação das usinas nucleares tem aumentado cada vez mais, devido à melhor compreensão dos benefícios ambientais e econômicos e à operação mais segura.

Com relação às preocupações expostas pelo IPCC em seu relatório com relação à segurança dos reatores, proliferação de armas nucleares e disposição e gerenciamento dos rejeitos pode-se dizer que:

Quanto às questões de segurança dos reatores e proliferação de armas nucleares, especialistas internacionais em energia nuclear têm buscado avaliar, desenvolver e priorizar tecnologias para reatores da próxima geração (III e IV Geração) com forte potencial de serem mais econômicas, seguras, sustentáveis e resistentes à proliferação do que as tecnologias dos reatores existentes. Ainda assim, os reatores atuais são extremamente seguros e, acidentes como o de Three Mile Island (TMI) e Chernobyl são extremamente raros.

Quanto à questão do gerenciamento dos rejeitos radioativos e sua disposição, diversos estudos têm sido realizados, desde a década de 50, no sentido de apontar um método capaz de mantê-los seguramente armazenados, sejam eles rejeitos de baixa, média ou alta atividade. A preocupação maior é com o rejeito de alta atividade, como o oriundo do reprocessamento do combustível usado, ou o próprio combustível usado em si, quando se considera dispô-lo sem reprocessá-lo. Para estes rejeitos, é consenso técnico internacional que a disposição em um repositório geológico, utilizando um sistema de barreiras naturais e de engenharia é a melhor maneira de se garantir o seu isolamento pelo período de tempo necessário (IAEA, 2003a). Esta opção tem sido estudada por países como a Suécia (SKB, 1992, SKB, 1994 e SKB, 1995), a Finlândia (POSIVA, 2000), a Alemanha (AKEND, 2002), a Inglaterra (NIREX, 2001a, NIREX, 2001b), o Japão (JNC, 2000, NUMO, 2004, JNC, 2005), dentre outros.

A energia nuclear, como utilizada atualmente na maior parte do mundo, possui um impecável registro de segurança. A gestão dos rejeitos não é complicada e o principal impedimento à disposição final dos rejeitos de alta atividade é de ordem política¹. O impedimento de ordem política tem origem principalmente em um problema conhecido como NIMBY (“*not in my backyard*”), traduzindo, “não no meu quintal”.

A percepção negativa da energia nuclear, freqüentemente associada à destruição, morte e contaminação, deve-se à associação de sua imagem aos episódios das bombas atômicas e ao acidente de Chernobyl (no Brasil, outro fator de impacto negativo foi o acidente de Goiânia). Frente a isso, o quadro que se desenha na maioria dos países que enfrentam o problema da gestão dos rejeitos radioativos é sempre o mesmo: uma forte e freqüente oposição ao processo de seleção de um local para armazená-lo, e uma atitude inflexível (SJÖBERG, 2004). Tais atitudes são emocionais, e esta percepção do risco

¹ (<http://www.world-nuclear.org/reference/default.aspx?id=982&LangType=2057&terms=prices+of+uranium+and+fossil+fuels>)

está relacionada, principalmente, ao medo com relação à severidade das consequências no caso de algum evento acidental, medo este agravado pela falta de informação e pela pouca consideração dada a aspectos importantes para a população.

Com o objetivo de se buscar a resolução de conflitos e minimizar a resistência por parte da população e do poder público, viabilizando deste modo o desenvolvimento de um repositório de maneira mais econômica e em um tempo menor, deve-se desenvolver um método de seleção que seja claro, transparente e rastreável, baseado em critérios técnicos, ambientais e sócio-econômicos bem definidos, de modo que possa ser acompanhado e possa ganhar a confiança de todas as partes interessadas.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de auxiliar no processo de seleção de um local para a construção de um repositório final para os rejeitos radioativos brasileiros, com ênfase no combustível nuclear usado.

Como visto, este processo de seleção não é trivial, ainda mais quando se lida com uma questão tão sensível como a do destino dos rejeitos radioativos.

De modo a atender às diversas exigências, interesses e preocupações pertinentes à questão, a metodologia utiliza a abordagem da análise multicritério, considerando fatores reconhecidos internacionalmente como fundamentais para a adequabilidade de um sítio para a construção de um repositório geológico.

Além da análise multicritério, é utilizada também uma ferramenta bastante usada atualmente em problemas que possuem uma componente espacial em sua análise: Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A vantagem desta ferramenta é a possibilidade de mapear, modelar, questionar e analisar grandes quantidades de dados armazenados em um único banco de dados (FOOTE e LYNCH, 1999), o que melhora a eficiência da análise. Isto é uma necessidade no processo de seleção, que requer informação geográfica acerca da geologia, recursos naturais, uso da terra, infraestrutura, etc.

A vantagem do uso conjunto dessas duas ferramentas é que este processo combina e transforma dados (incluindo geográficos) em decisões, auxiliando no processo, muitas vezes complexo, da tomada de decisão e permitindo a otimização do processo de seleção, aumentando a possibilidade de selecionar áreas que, após investigações mais detalhadas (*in situ* e subterrâneas), possam confirmar sua

adequabilidade para hospedar um repositório geológico para a disposição final do combustível usado.

1.2 Relevância

De acordo com a Lei 10.308 de 20 de novembro de 2001, “deverão ser iniciados os estudos para a seleção de local, projeto, construção e licenciamento para a entrada em operação, no mais curto espaço de tempo tecnicamente viável, de um depósito final de rejeitos radioativos em território nacional” (BRASIL, 2001a).

Também de acordo com a Resolução nº. 8 de 17 de setembro de 2002, do Conselho Nacional de Política Energética, que estabelece as condições para a retomada do empreendimento de Angra III, deverão ser iniciados, de imediato, os trabalhos de seleção do local para a construção do depósito definitivo para os rejeitos radioativos provenientes das três usinas nucleares de Angra dos Reis (BRASIL, 2002a).

Além disto, foi concedida pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Renováveis), no dia 23 de julho de 2008 a Licença Prévia Ambiental da Usina Angra 3 (LP). Esta Licença possui 60 condicionantes, dentre as quais deve-se destacar a condicionante de nº 2.18 “Apresentar proposta e iniciar a execução do projeto aprovado pelo órgão ambiental para disposição final dos rejeitos radioativos de alta atividade antes do início da operação da Unidade 3”.

Esta exigência não é de responsabilidade da Eletronuclear e sim da CNEN, de acordo com o Capítulo III, Art. 9º da Lei 10.308 de 20 de novembro de 2001 - “Art. 9º. Cabe à CNEN projetar, construir e instalar depósitos intermediários e finais de rejeitos radioativos.”, no entanto, esta exigência mostra a necessidade, por parte da sociedade e dos órgãos públicos de apresentar, o quanto antes, uma definição quanto ao gerenciamento e destino final dos rejeitos radioativos de alta atividade.

Após a concessão da LP, foi concedida em 5 de março de 2009 a Licença de Instalação da Usina de Angra 3 (LI). Nesta licença, uma das condicionantes trata novamente da questão dos Rejeitos de Longo Prazo. A condicionante 2.20 diz: “Apresentar em 180 dias cronograma técnico-financeiro e de execução conforme estrutura analítica de Projeto RAN – Depósito Rejeitos de Longo Prazo dos combustíveis usados, homologado pela CNEN”.

Tendo em vista o exposto acima, fica clara a urgência do desenvolvimento de estudos no que tange à questão da seleção de locais para a construção do depósito definitivo para os rejeitos radioativos das usinas nucleares brasileiras. A metodologia

proposta se aplica tanto à seleção de locais para a construção de depósitos para rejeitos de baixa e média atividade como também à seleção de locais para a construção de um repositório geológico para a disposição final de rejeitos de alta atividade e vida longa caso o país se decida pelo reprocessamento, ou para o combustível usado das usinas disposto diretamente sem reprocessamento. Além destas aplicações a metodologia pode ser utilizada também no processo de seleção de locais para a construção de novas usinas nucleares, o que a torna interessante neste momento em que o país tem como meta a construção de novas centrais nucleares. A ampla aplicabilidade da metodologia se baseia na utilização de critérios pré-estabelecidos de acordo com a seleção que se quer efetuar e na análise de um banco de dados geográfico montado de acordo com os critérios a ser utilizados.

Outra questão a ser considerada é que se pensarmos que a vida útil remanescente de Angra 1 é de mais ou menos 20 anos e a de Angra 2 é de mais 40 anos e que, de acordo com a bibliografia pesquisada, os trabalhos de seleção de um sítio e posteriormente seu licenciamento, construção e operação levam em torno de 30 a 40 anos, percebemos que o Brasil está bastante defasado neste campo de estudos em comparação a outros países também detentores de usinas nucleares.

A construção de um banco de dados geográficos que possibilitará organizar em um só lugar todas as informações relevantes para a seleção de sítios para disposição final de rejeitos radioativos, além de facilitar o manuseio, análise e visualização destes dados com o objetivo de aperfeiçoar o processo de seleção, é uma contribuição importante para o estado da arte do assunto em questão.

Por último, mas não menos importante, o levantamento dos dados importantes para este tipo de análise, sua disponibilidade e a identificação do que necessita ainda ser providenciado torna possível a obtenção de um panorama da questão do gerenciamento deste material no Brasil.

1.3 Originalidade

Trabalhos de seleção de sítios para disposição de resíduos radioativos têm sido desenvolvidos nos últimos anos em diversos países que possuem usinas nucleares. Dentre estes se destacam a Suécia e a Finlândia que desenvolveram pesquisas em rochas cristalinas, a Bélgica e a França que vem desenvolvendo pesquisas em argila e os Estados Unidos com o trabalho em Yucca Mountain.

A originalidade se configura em primeiro lugar por não ter sido encontrada, durante a etapa de pesquisa bibliográfica, nenhuma publicação tratando da questão da seleção de um local para disposição final do combustível utilizado nas usinas nucleares brasileiras, assim como também não foram encontrados trabalhos referentes à destinação que deve ser dada a este material quando do descomissionamento da usina, excetuando-se notícias de jornais e revistas de circulação nacional.

Em segundo lugar, à complexidade da análise a ser feita no país. Países como a Suécia e a Finlândia possuem extensões territoriais bem menores que o Brasil, e suas características geológicas, hidrogeológicas, climáticas, topográficas e etc., variam pouco dentro do país. Sendo assim pode ser feita uma análise do território como um todo.

Neste trabalho, devido à grande extensão do país, propomos uma análise regional, iniciando-se pelo Estado do Rio de Janeiro (onde se encontram localizadas as usinas nucleares) e, após o desenvolvimento da metodologia, esta poderá ser aplicada a outras regiões do país, guardadas as devidas restrições quanto a qualidade e disponibilidade de dados.

Além disso, vários critérios tiveram de ser desenvolvidos ou adequados a fim de que a análise considerasse particularidades ambientais, econômicas, sociais e políticas do Brasil.

Outra inovação é a agregação de ferramentas de apoio à tomada de decisão à análise a ser realizada, de modo a torná-la mais transparente e confiável, possibilitando que a opinião dos diversos grupos envolvidos possa ser incorporada ao processo decisório.

2 Revisão Bibliográfica

A disposição geológica surgiu como uma opção para o gerenciamento seguro dos rejeitos radioativos de alta atividade em um relatório da *National Academy of Sciences* denominado *The Disposal of Radioactive Waste on Land* (US NATIONAL RESEARCH COUNCIL/NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1957). Este conceito trata do isolamento dos rejeitos radioativos de vida longa do ambiente humano através da sua colocação em repositórios subterrâneos profundos e localizados em rochas hospedeiras caracterizadas por sua alta estabilidade e nenhum ou um lento escoamento de água subterrânea, ou seja, disposição geológica. (IAEA, 2003a)

Atualmente este método é considerado um consenso internacional como mostram diversos documentos (OECD/NEA, 1995; IAEA, 2003a; IAEA, 1994b; SAVAGE, 1995)

A partir deste relatório da *National Academy Sciences*, vários estudos foram feitos com o objetivo de fundamentar, desenvolver e validar este método.

2.1 O Processo de Seleção de Sítios

Ao longo das últimas décadas, tem havido uma evolução nos métodos de seleção de potenciais sítios para a construção de instalações nucleares. Inicialmente, os sítios eram normalmente escolhidos por estarem localizados em locais remotos, em parte devido a questões de sigilo e de segurança militar e, em parte, devido à preocupação com a segurança pública, no caso de um acidente catastrófico, minimizando assim, o número de pessoas diretamente afetadas. A maior parte das decisões relativas à localização de instalações nucleares foi, no passado, feita geralmente de maneira centralizada, por órgãos executivos, não responsáveis oficialmente por esta tarefa (normalmente ligados à área de segurança) e, raramente identificados publicamente. Estas instalações foram muitas vezes justificadas em razão da "necessidade nacional", e nenhuma discussão foi permitida.

Essa era a tendência dos responsáveis pela seleção de locais para instalações do Projeto Manhattan entre 1942 e 1964 (DOE, 1987). Ao escolher áreas isoladas, no entanto, havia a dificuldade da instalação estar distante de habitações adequadas, serviços, e qualificação da força de trabalho. Ao invés disso, tinha de se construir e administrar novas comunidades e de convocar trabalhadores de outros lugares para trabalhar nestas instalações. Os responsáveis pela localização das instalações neste

período também destacaram a importância de que os recursos necessários como água, energia elétrica, trabalhadores, combustíveis, etc. deveriam estar disponíveis ou sua obtenção ser economicamente viável (DOE, 1987).

Outra abordagem era localizar estas instalações próximas a instalações existentes, onde já havia infraestrutura e a aceitação pública era facilitada pela familiaridade da população local com a tecnologia nuclear.

Com o tempo, instalações com exigências específicas surgiram, como por exemplo, os repositórios geológicos. Foi o período em que utilizou-se frequentemente a opinião de especialistas. Este tipo de abordagem é conhecido como “Decida-Anuncie-Defenda” – DAD (do inglês *Decide-Announce-Defend*) e parte do princípio de que profissionais técnicos conhecem melhor as necessidades da comunidade. Os profissionais definem o problema e os objetivos, identificam potenciais soluções e selecionam a melhor alternativa, sem envolvimento público, ou seja, os decisores técnicos decidem, informam o público da decisão tomada e então justificam essa decisão (ASANO *et al*, 2007). Todo o processo era feito longe da vista dos interessados, que eram apenas comunicados da decisão final sem ver os seus interesses considerados no processo.

Esta abordagem pode ser apropriada para projetos de engenharia dominados por restrições técnicas e regulatórias, mas é inadequada para se alcançar a aceitação pública de projetos controversos, particularmente os que envolvem impactos ambientais e sociais (WALESH, 1999). São vários os exemplos de tentativas de selecionar sítios utilizando esta abordagem que falharam no seu intento, atrasando projetos de construção de repositórios de rejeitos, além de aumentar os custos envolvidos no processo, principalmente devido ao retrabalho e adequação de todo o processo.

Devido à falta de sucesso da abordagem utilizada até então, buscou-se o desenvolvimento de um procedimento lógico e rastreável, cuja aplicação resultasse em escolhas reconhecidas por todos como opções lógicas. Este tipo de abordagem é a solução ideal para os decisores, que têm suas escolhas justificadas sem a necessidade de explicações ou justificativas adicionais. O problema desta abordagem é que ela esbarra no grau de subjetividade dos julgamentos dos envolvidos quanto à importância de determinados fatores em relação a outros. Esta subjetividade é alta o bastante para alimentar disputas mesmo entre especialistas, o que dificulta bastante a análise e a obtenção de um resultado final. Outro ponto importante é que este tipo de abordagem ainda não levava em consideração fatores sociais (ISSLER *et al*, 2005).

Este tipo de abordagem está descrito em documentos internacionais, como por exemplo, os publicados pela IAEA durante a década de 80.

Atualmente, as características que tornam um processo de seleção de sítios para construção de um repositório adequado são:

- O processo é realizado em etapas “adaptativas”, reconhecidamente com duração de vários anos, que irá evoluir na medida em que os implementadores levarem em consideração os comentários de todos os interessados;
- O processo é baseado em critérios objetivos, transparentes, pré-definidos e bem documentados;
- O objetivo do processo é identificar sítios que possam ter sua segurança comprovada, não se baseando em alegações de que se pode encontrar um sítio “completamente seguro” (melhor sítio);
- O processo inclui um diálogo verdadeiro entre todos os interessados, especialmente os potenciais hospedeiros, com o objetivo de garantir que seja considerado justo e igual por todos os envolvidos;
- O objetivo do processo é identificar e informar as comunidades dispostas a hospedar o repositório, que posteriormente elas serão parceiras com plenos direitos sobre o processo de implementação do repositório.

2.1.1 IAEA

A Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) tem atuado no campo do gerenciamento dos rejeitos radioativos há muitos anos. Em 1977, foi feita uma primeira tentativa de se compilar e revisar informações pertinentes à disposição dos rejeitos radioativos em formações geológicas (IAEA, 1977). Em 1974, a IAEA contratou dois consultores para auxiliar no desenvolvimento de critérios para a avaliação de sítios em formações geológicas para o armazenamento a longo prazo ou disposição de rejeitos de alto nível ou emissores alfa. Os consultores concluíram que, devido à complexidade do conceito global e às variações nas propriedades dos rejeitos radioativos e das formações geológicas, não foi possível desenvolver critérios específicos. Eles apontaram que cada sítio geológico provavelmente pode ser único e pode ter de ser avaliado individualmente, mesmo que critérios de avaliação estejam disponíveis para cada tipo particular de formação. Por outro lado, os consultores perceberam que uma lista de fatores poderia ser desenvolvida e descrita de forma a auxiliar os estados membros na

avaliação e seleção de sítios para o armazenamento ou disposição geológica dos rejeitos radioativos.

Foi então preparado um documento que posteriormente foi revisado e modificado por um grupo de vinte e um especialistas em gerenciamento de rejeitos radioativos e em ciências geológicas, dando origem ao documento *Site Selection Factors for Repositories of Solid High-Level and Alpha-Bearing Wastes in Geological Formations* (IAEA, 1977).

Este documento serviu como ponto de partida para diversos países desenvolverem seus programas de gerenciamento de rejeitos radioativos.

Nesse mesmo ano (1977), a IAEA esboçou um programa para a produção de um conjunto de documentos contendo diretrizes sobre a questão do gerenciamento dos rejeitos radioativos. Foi estabelecido um comitê revisor para estes documentos denominado *Technical Review Committee on Underground Disposal of Radioactive Waste*. Nessa época, já estava claro que a disposição subterrânea (geológica) era a abordagem internacionalmente aceita para a maioria dos tipos de rejeito sólido. Durante este período foi publicada uma coleção abrangente de relatórios sobre a disposição subterrânea (IAEA, 1981; IAEA, 1983a; IAEA, 1983b; IAEA, 1985; IAEA, 1989). Algumas delas estabelecem normas internacionais para o planejamento e construção de repositórios subterrâneos de rejeitos. No final da década de 80, a AIEA criou a RADWASS (IAEA, 2002) uma família de padrões de segurança, que pretendia estabelecer uma estrutura ordenada para os documentos de segurança do rejeito radioativo e garantir uma cobertura abrangente de todas as áreas relevantes. O documento mais importante deste programa foi *The Principles of Radioactive Waste Management* (IAEA, 1995). Até 2002 foram publicados 12 documentos, dentre os quais se destacam: (IAEA, 1994a; IAEA, 1994b, IAEA, 1995; IAEA, 2000;). Este último é a base dos diversos programas de gerenciamento de rejeitos radioativos, principalmente no que diz respeito à disposição geológica. Seu objetivo é fornecer um guia para a identificação e seleção de sítios adequados para a disposição geológica do rejeito radioativo. Ele fornece uma descrição dos estágios do processo de seleção e informação dos fatores a serem considerados no processo.

2.1.2 Programas de Seleção de Sítios em Alguns Países

Diversos países que possuem usinas nucleares iniciaram, a partir dos documentos da IAEA e da NEA, o desenvolvimento de seus programas de gerenciamento de rejeitos radioativos, principalmente a busca por locais, em seus territórios, onde pudesse ser construída uma instalação para disposição do combustível utilizado em suas usinas.

2.1.2.1 Finlândia

Iniciou seus planos para o gerenciamento do combustível irradiado já na fase de construção das usinas nucleares de Olkiluoto e Loviisa. O trabalho associado com a disposição geológica dos rejeitos de baixo e médio níveis começou em 1979 e resultou na construção de repositórios subterrâneos em ambas as plantas. Os estudos sobre as opções disponíveis para o gerenciamento do combustível irradiado de Olkiluoto² foram iniciados em meados da década de 70. A disposição geológica foi considerada uma das alternativas e estudos sistemáticos da viabilidade da disposição profunda foram iniciados em 1978. O primeiro estudo de viabilidade explorando um sistema de disposição baseado em barreiras múltiplas e sua segurança a longo prazo foi publicado por VUORELA (1982 *apud* POSIVA OY, 2000).

Um trabalho importante publicado por Niini, trata da questão dos fatores geológicos importantes para a disposição geológica do rejeito radioativo (NIINI *et al*, 1982 *apud* POSIVA OY, 2000).

Outro trabalho, publicado por VUORELA e ÄIKÄS (1984), trata da estrutura do processo de seleção de sítios no país. Eles descrevem este processo como sendo composto de três fases, iniciando com análises de reconhecimento regionais e prosseguindo com investigações de campo mais detalhadas, até a seleção de um sítio para a disposição final.

Nos estudos foram utilizadas imagens de satélite e mapas geológicos, aeromagnéticos, gravimétricos, sísmicos e topográficos, assim como mapas de densidade de fraturas, cobrindo todo o território da Finlândia. O principal objetivo da fase inicial do processo era encontrar blocos de rocha estáveis e homogêneos, cercados por zonas de fratura a uma distância segura da área planejada para a disposição onde seriam realizadas investigações de campo.

² Até então o combustível irradiado da usina de Loviisa era enviado para a antiga URSS.

Vários outros trabalhos foram publicados na Finlândia, tratando desde a questão da disposição de forma geral (TVO, 1982 *apud* POSIVA OY, 2000; TVO, 1985 *apud* POSIVA OY, 2000; TVO, 1990 *apud* POSIVA OY, 2000; ANON, 1992 e POSIVA OY, 1997 *apud* POSIVA OY, 2000) como também de questões relativas à seleção do sítio de disposição e dos critérios utilizados nesta seleção (KUIVAMÄKI, A. e VUORELA, P., 1985 *apud* POSIVA OY, 2000; SALMI, M., VUORELA, P. e KUIVAMÄKI, A., 1985 *apud* POSIVA OY, 2000; ÄIKÄS, T., 1985^a *apud* POSIVA OY, 2000; ÄIKÄS, T., 1985^b *apud* POSIVA OY, 2000; VUORELA, P. e PAULAMÄKI, S., 1988 *apud* POSIVA OY, 2000; VILJANEN, E., 1992 *apud* POSIVA OY, 2000, ANTTILA, P., 1995 *apud* POSIVA OY, 2000).

O programa de seleção de sítios desenvolvido pela Finlândia é comparável aos programas desenvolvidos por diversos outros países que lidam com o problema da disposição final de material altamente radioativo.

A responsabilidade pela gestão dos rejeitos radioativos cabe às companhias de geração de energia. Em 1996, as companhias operadoras das usinas nucleares finlandesas fundaram a *Posiva Oy*, responsável pela disposição final do combustível utilizado nas usinas bem como pela tarefa de conduzir as investigações associadas a esta disposição.

Seguindo a proposta de ser um processo de seleção claro e transparente, a Finlândia publicou em 2000 um documento onde descreve o seu programa para a seleção e caracterização de sítios potenciais para a disposição profunda do combustível irradiado e explica o processo pelo qual Olkiluoto foi selecionado e proposto como sítio para construção do repositório em 1999 (POSIVA OY, 2000).

Em 2001, o Parlamento ratificou a decisão da escolha de Olkiluoto que atualmente passa pelos estudos de caracterização do sítio e de impacto ambiental. A disposição final do combustível usado está planejada para ser iniciada em 2020 e irá continuar durante quase uma centena de anos.

2.1.2.2 Suécia

O objetivo do gerenciamento do rejeito radioativo na Suécia é dispor de todos os rejeitos radioativos gerados pelas plantas nucleares de maneira segura. O *Act on Nuclear Activities* (SFS, 1984) requer que os proprietários das plantas nucleares adotem as medidas necessárias para alcançar este objetivo. Os proprietários das usinas nucleares

suecas então fundaram a *Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company* (SKB).

O sistema de gerenciamento do rejeito tem sido desenvolvido e construído a partir de propostas feitas em meados da década de 70, e o trabalho de P & D foi iniciado com o Projeto KBS no final da década de 70 (SKB, 1992).

Propostas e opções alternativas vêm sendo revisadas e estudadas, tanto pelas autoridades reguladoras quanto pela indústria em extensivos projetos de P & D desde a década de 80. Deste modo, importantes questões relacionadas ao encapsulamento e à disposição final do combustível irradiado no solo sueco têm sido pesquisadas.

Devido às exigências rigorosas do governo sueco, o trabalho tem sido desenvolvido com grande determinação e amplos recursos. Isto dá às atividades desenvolvidas na Suécia, uma posição de reconhecimento internacional. O interesse de outros países se deve à maneira sistemática de se desenvolver o trabalho e relatá-lo e à qualidade das instalações que já foram construídas. Um exemplo da importância dos estudos realizados pela Suécia é a aprovação do método KBS-3 (SKBF/KBS, 1983) na Suécia e de outros estudos semelhantes na Finlândia (PELTONEN, 1986 *et. al apud* SKB, 1992) e na Suíça (PROJEKT GEWÄHR, 1985 *apud* SKB, 1992). Também são mencionadas opiniões coletivas expressas por grupos de especialistas internacionais dentro da OECD/NEA, da IAEA e do EC (OECD/NEA, 1985; OECD/NEA, 1991).

Uma das tarefas da SKB é compilar as bases para a seleção de um repositório profundo para o combustível irradiado e outros rejeitos nucleares de vida longa. O objetivo do trabalho de seleção é compilar a informação que será necessária para um sítio ser selecionado e para a obtenção de uma permissão para se iniciar a construção do repositório através da caracterização detalhada do sítio selecionado. A estrutura deste trabalho já foi previamente apresentada às autoridades reguladoras e ao governo nos documentos publicados pela SKB (SKB, 1992 e SKB, 1994).

O trabalho de seleção está baseado nos critérios que foram previamente especificados em conjunto com o *RD & D Programme 92 Supplement* (SKB, 1994). Posteriormente foi publicado um outro documento (SKB, 1995) que é uma descrição detalhada do trabalho realizado para selecionar um local para o repositório em um contexto nacional e regional. Neste documento, fatores de seleção importantes são descritos e aplicados em escala nacional. Ele faz uma compilação dos estudos de seleção gerais realizados em escala nacional de acordo com a decisão do governo.

O método de disposição geológica desenvolvido pela Suécia foi aceito em países como a Finlândia, Suíça, etc. e é denominado KBS-3. Ele está descrito em uma série de quatro documentos (SKBF/KBS, 1983), que demonstram como o combustível irradiado dos reatores suecos pode ser disposto de uma maneira que satisfaça às altas exigências sobre segurança, tanto a curto como a longo prazo.

2.1.3 Processos de Seleção de Sítios no Brasil

No Brasil, o combustível usado, retirado dos reatores a cada recarga, está armazenado em piscinas de elemento combustível no próprio sítio das usinas em Angra dos Reis (Figuras 2.1 a e b). Para a usina de Angra 2 foi construída uma piscina dentro do prédio do reator (diferente da de Angra 1, que fica fora) com capacidade para armazenar os rejeitos produzidos por metade de sua vida útil, 20 anos. A piscina de Angra 1 pode armazenar os resíduos de seus 40 anos de atividade previstos. Ambas mantêm os resíduos submersos a mais de dez metros de profundidade, sendo a água a blindagem utilizada (BUYS e EVANGELISTA, 2000).

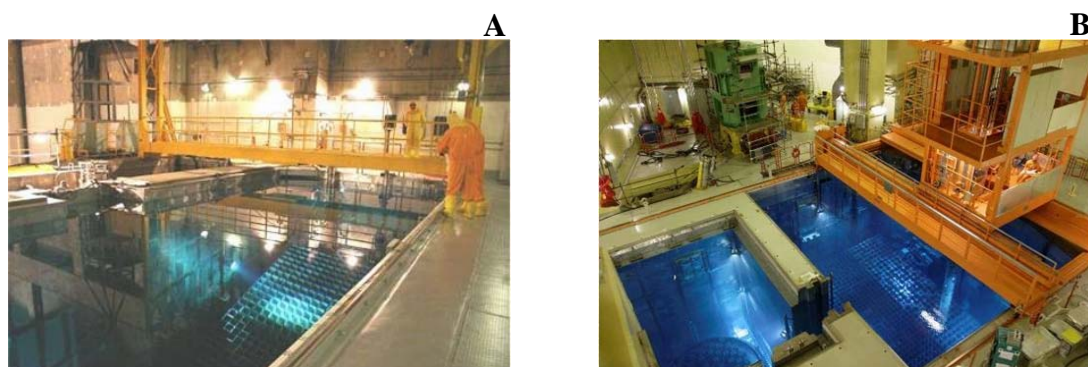


Figura 2.1: Piscina de elemento combustível de Angra I (a) e de Angra II (b).

Este combustível é considerado ainda material estratégico, com possibilidade de reutilização, o que faz com que o país não possua oficialmente rejeitos radioativos de alta atividade e vida longa. Devido a estas considerações, a norma da CNEN referente à “Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos” (CNEN, 1989) aplica-se “à localização de depósitos finais ou intermediários ou provisórios para rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação, gerados em decorrência de atividades desenvolvidas no território nacional.”

Além da norma da CNEN, existe a Lei nº. 10.308 20 de novembro de 2001 (BRASIL, 2001a), que “dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as

garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos.” Esta Lei estabelece normas para o destino final dos rejeitos radioativos produzidos em território nacional. De acordo com esta Lei:

Art. 5º - A seleção de locais para depósitos iniciais obedecerá aos critérios estabelecidos pela CNEN para a localização das atividades produtoras de rejeitos radioativos.

Art. 6º - A seleção de locais para a instalação de depósitos intermediários e finais obedecerá aos critérios, procedimentos e normas estabelecidas pela CNEN.

Parágrafo Único – Os terrenos selecionados para depósitos finais serão declarados de utilidade pública e desapropriados pela União, quando já não forem de sua propriedade;

Art. 7º - É proibido o depósito de rejeitos de quaisquer naturezas nas ilhas oceânicas, na plataforma continental e nas águas territoriais brasileiras.

Pode-se observar uma cronologia dos trabalhos realizados na Tabela 2.1 a seguir.

Tabela 2.1: Cronologia dos trabalhos realizados.³

ANO	TRABALHOS REALIZADOS
1978	Início de seleção sistemática para a localização de Regiões de Interesse no país.
1979	Selecionadas 4 Regiões de Interesse no nordeste e eliminadas as ilhas de Trindade e Martin Vaz.
1980	Selecionadas Áreas Preliminares nas 4 Regiões de Interesse no nordeste.
1981	Reconhecimento de Campo na Estação Ecológica do Raso da Catarina e selecionadas 8 Áreas Potenciais.
1984	Empresa de Sensoriamento Remoto faz detalhamento de duas Regiões de Interesse no nordeste.
1984	Concluído relatório sobre a região de São Fidélis (RJ) com seleção de Áreas Preliminares
1984	Selecionadas duas áreas no talude e sopé continental para lançamento e recuperação de containeres vazios.
1985	Selecionada uma área na bacia oceânica do Brasil para lançamento e teste de containeres.
1987	Selecionadas mais 12 Regiões de Interesse no nordeste dentro da isoietas de 1000mm.
1987	Início da Seleção de um Local Candidato no estado de Goiás.
1995	Estudos em duas Regiões de Interesse no RJ e uma em SP.

³ (extraído da apresentação de Dornelles)

Todos estes trabalhos de seleção foram realizados para construção de repositórios para rejeitos de baixa e média atividade, tendo em vista a indefinição política quanto ao combustível usado. O fato é que, ao combustível usado, armazenado nas piscinas, terá de ser dada uma solução definitiva ao final do período de operação das usinas nucleares. Mesmo que se decida pelo reprocessamento e reutilização deste material, o país ainda terá rejeitos de alta atividade e vida longa com os quais lidar.

Como o Brasil não possui uma definição quanto a esta questão, existe uma norma da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que trata apenas da localização de depósitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação (CNEN, 1989). Esta norma estabelece os requisitos mínimos aplicáveis ao processo de seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos.

De acordo com a norma da CNEN, as áreas analisadas no processo de seleção de um sítio devem seguir a hierarquia mostrada na Figura 2.2 a seguir (CNEN, 1989).



Figura 2.2 Etapas na seleção do local⁴.

1. Região de interesse – é o espaço territorial inicialmente identificado no processo de seleção e escolha de locais, a nível regional. A escala de trabalho será menor que 1:100.000, normalmente entre 1:250.000 e 1:1.000.000, podendo abranger uma região do país, um estado ou uma porção do mesmo.

⁴ (extraído de apresentação de Gerson Hovingh Dornelles)

2. Área Preliminar – é a área identificada dentro da Região de Interesse, não excluída pela análise regional e a ser investigada para identificação de áreas potenciais. A escala de trabalho será de semidetalhe, compreendida entre 1:10.000 e 1:100.000.

3. Área Potencial – é a área contida na Área Preliminar, identificada como potencialmente satisfatória para receber um depósito de rejeitos radioativos, através da aplicação de critérios técnicos restritivos e estudos técnicos específicos. A escala de trabalho é maior que 1:10.000.

4. Local candidato – é o local favorável selecionado dentre as Áreas Potenciais, através da aplicação de estudos técnicos de profundidade crescente em relação aos anteriormente aplicados. A escala de trabalho, normalmente utilizada é a de 1:1.000 ou maior.

A norma da CNEN considera como fatores de seleção e escolha do local:

- a) Fatores Ecológicos;
- b) Fatores Sócio-Econômicos;
- c) Fatores Geológicos;
- d) Fatores Fisiográficos.

Os principais objetivos dos fatores de seleção são:

- ❖ Reconhecer os parâmetros críticos que poderiam limitar ou impedir o uso de um local;
- ❖ Identificar locais merecedores de investigação na etapa seguinte;
- ❖ Indicar a necessidade de procedimentos especiais, incluindo a construção de barreiras de engenharia.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Disposição Geológica

O combustível usado, retirado do reator das usinas durante a recarga, é considerado rejeito caso não tenha outro uso planejado. Este material além de possuir altos níveis de radiação também possui grandes quantidades de radionuclídeos de vida longa produzidos durante a sua queima no reator. Devido a estas duas características, pode-se recomendar este material para a disposição em um repositório geológico.

Um repositório geológico é uma instalação para disposição do rejeito radioativo localizada no subsolo (geralmente em torno de 350 a 500 metros abaixo da superfície) em uma formação geológica estável, a fim de fornecer isolamento a longo prazo dos radionuclídeos da biosfera (IAEA, 2003b). O objetivo da disposição do rejeito radioativo é o isolamento passivo do rejeito, de modo que isto não resulte em exposição à radiação, dos seres humanos ou do meio ambiente, acima dos níveis definidos internacionalmente, agora ou no futuro (IAEA, 1994b).

A segurança deste conceito de disposição não depende de controles institucionais continuados após o fechamento do repositório (monitoramento, manutenção ou vigilância), minimizando assim a carga sobre as futuras gerações (princípio 5, IAEA, 1995).

Um sistema de disposição geológica pode ser definido como uma combinação dos rejeitos sólidos acondicionados e embalados, além de outras barreiras de engenharia, dentro de um repositório escavado ou perfurado em um ambiente geológico estável (IAEA, 2003a).

A formação geológica em que o rejeito é armazenado é denominada rocha hospedeira e, geralmente, se constitui na mais importante barreira de isolamento. As várias barreiras atuam em conjunto, inicialmente para conter os radionuclídeos, permitindo assim o seu decaimento e, então, para limitar suas liberações para a biosfera. Uma combinação de barreiras geológicas e de engenharia é geralmente denominada sistema multi-barreiras. Este sistema deve conter completamente os radionuclídeos de vida curta altamente radioativos. Quanto aos radionuclídeos de vida longa presentes no rejeito, há um consenso de que para a maioria dos conceitos de repositórios desenvolvidos atualmente não se pode demonstrar sua confiabilidade para deter completamente este tipo de radionuclídeo. Para se alcançar a contenção completa de tais radionuclídeos, o sistema terá de funcionar por um período de tempo extremamente

longo, e isto é difícil de demonstrar (IAEA, 2003a). Conseqüentemente, um sistema de disposição apresentará diferentes funções ao longo de seu período de funcionamento (IAEA, 2003a):

- isolamento de processos próximos à superfície;
- proteção da biosfera;
- isolamento de atividades humanas;
- contenção inicial;
- limitação das liberações;

As funções são alcançadas pela seleção de ambientes geológicos adequados à disposição e sua combinação com projetos de repositórios e barreiras de engenharia que tiram vantagem das principais características do ambiente. O ambiente geológico escolhido irá atuar como um casulo para o repositório e suas barreiras de engenharia, protegendo-o de flutuações extremas no estresse físico, escoamento de água e hidroquímica. Esta é uma função extremamente importante da barreira geológica: fornecer estabilidade a longo prazo das condições de contorno, permitindo que a única parte do sistema de disposição que possa realmente ser projetada e otimizada (as barreiras de engenharia) funcione por longos períodos de tempo.

Os principais componentes, naturais e de engenharia, de um sistema de disposição geológica podem ser divididos nos seguintes grupos como vemos na Figura 3.1:

1. o rejeito em si;
2. o embalado do rejeito;
3. o *overpack*, o material de preenchimento dos túneis e do repositório como um todo (*backfill*);
4. o repositório;
5. as barreiras naturais (a rocha hospedeira e as formações geológicas vizinhas);
6. a biosfera.

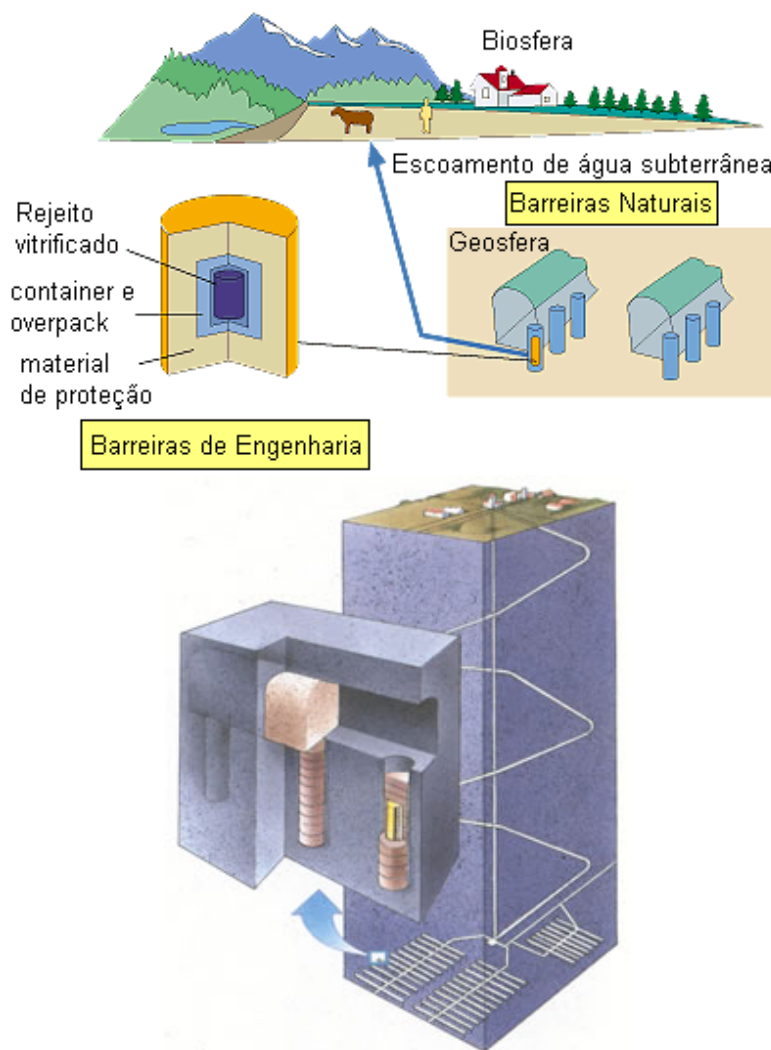


Figura 3.1: Exemplos de sistemas multi-barreiras na disposição geológica e sistema KBS-3.

A disposição do rejeito radioativo em um repositório geológico envolve uma confiança substancial no ambiente geológico e hidrogeológico para fornecer confinamento do rejeito pelo período de tempo desejado. Uma atividade muito importante relacionada à disposição do rejeito de alta atividade e vida longa é a seleção de um sítio apropriado para a disposição geológica. O objetivo básico é selecionar um local adequado à disposição e demonstrar que este local, em conjunto com o projeto do repositório e o pacote de rejeitos, tem propriedades que proporcionam o isolamento dos radionuclídeos do meio ambiente pelo período de tempo desejado. Este local selecionado deve apresentar características de confinamento favoráveis, fornecendo uma barreira natural que auxilie na manutenção do impacto radiológico dentro dos níveis aceitáveis estabelecidos pelos órgãos reguladores. Também deve se mostrar adequado à implementação de todas as barreiras de engenharia necessárias para prevenir ou retardar

o potencial movimento dos radionuclídeos do sistema de disposição para o meio ambiente (IAEA, 1994b).

Para avaliar a aceitabilidade do sítio e conseqüentemente de um dado sistema de disposição, os princípios de segurança adotados pelo órgão regulador são utilizados como base de julgamento.

Ao se proceder à seleção de um sítio deve-se levar em conta, (SAVAGE, 1995):

- segurança a longo prazo;
- segurança operacional do repositório (segurança a curto prazo);
- viabilidade técnica do sistema repositório;
- considerações ambientais;
- aceitabilidade pública;
- considerações de custo.

Um sítio adequado para a disposição pode ser identificado tanto através de um processo de varredura de grandes regiões, reduzindo-se o número de sítios candidatos até que seja feita a seleção, como também através da análise de um ou mais sítios designados como potenciais.

A seleção de um sítio adequado envolve um processo de otimização, com alguns fatores tendo mais importância que outros, em particular os fatores que dizem respeito à segurança a longo prazo do repositório. O objetivo do processo de seleção é identificar um sítio que seja aceitável com relação às exigências definidas (SAVAGE 1995).

Uma consideração importante é que o processo de seleção de um sítio para construção de um repositório deve ser realizado de modo a minimizar o impacto ambiental. A construção do repositório, sua operação e sua existência a longo prazo têm diferentes efeitos no meio ambiente. Alguns destes aspectos estão diretamente associados à aceitação pública da operação e podem variar substancialmente entre diferentes sítios.

Como visto no capítulo anterior, existe atualmente uma grande necessidade de se melhorar o processo de tomada de decisão com relação à seleção de locais e ao licenciamento de instalações relacionadas à geração de energia, que podem, potencialmente, afetar a qualidade de vida ou o meio ambiente. KEENEY e NAIR (1975) já alertavam há mais de 30 anos para esta necessidade, devido principalmente ao aumento da consciência pública e à crise energética.

Estes tipos de problema são excessivamente complexos, devido à sua natureza multicritério. Muitos destes critérios são relativamente objetivos, como por exemplo, critérios econômicos e relacionados à engenharia; já outros são mais subjetivos, envolvendo questões sociais, de segurança, e ambientais. Por isso, julgamentos profissionais e o conhecimento de especialistas nestas áreas devem ser utilizados durante o processo decisório.

Outro ponto de destaque é o grande número de variáveis espaciais envolvidas no problema, tais como a localização de áreas de preservação, a proximidade de rios, de estradas ou de populações, além de características espaciais da área, tais como geologia, declividade, recursos minerais, dentre outras. Estas variáveis necessitam de uma representação geográfica a mais próxima possível da realidade, de forma a assegurar a consistência de dados em sistemas de apoio à decisão.

Por último, outra questão relacionada à complexidade do problema são os diversos grupos de interesse (*stakeholders*) envolvidos no processo de tomada de decisão. Assim, deve-se ter em mente o desenvolvimento de um método que seja transparente e rastreável, considerando-se as opiniões dos diversos grupos interessados e permitindo que estes possam acompanhar e entender todas as decisões tomadas ao longo do processo.

De forma a atender a esta necessidade de melhora do processo decisório em questões deste tipo, diversas abordagens foram utilizadas nas últimas décadas, (KEENEY e NAIR, 1975; KEENEY, 1980; CHURCH, 2002).

Este trabalho utiliza de forma integrada, duas ferramentas que vêm sendo bastante usadas atualmente em processos de tomada de decisão envolvendo análises de adequabilidade do uso da terra para localização de instalações industriais: Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Análise de Decisão Multicritério. (CARVER, 1991; CARVER e OPENSHAW, 1992; PEREIRA e DUCKSTEIN, 1993; CARVER e OPENSHAW, 1995; JANKOWSKI, 1995; MALCZEWSKI, 1996; MALCZEWSKI, 1999; MALCZEWSKI, 2004). Estas duas ferramentas serão apresentadas detalhadamente.

3.1.1 O Repositório Geológico

Um repositório é uma indústria nuclear com instalações acima da superfície assim como abaixo da superfície, na rocha, em profundidades que variam de 350 a 700 m (SKB, 1995).

A atividade central do repositório será receber os embalados contendo o combustível nuclear usado e depositá-lo em posições selecionadas a cerca de 500m de profundidade na rocha.

De modo a apoiar a atividade central do repositório, um determinado número de sistemas de apoio técnico também necessitará ser construído na área do repositório. Dependendo do projeto, existirão prédios de ventilação, áreas para reuniões, instalações para o pessoal, galpões, áreas de descarga dos containeres, túneis para o transporte do combustível nuclear usado até o local de disposição, dentre outras áreas relacionadas à operação da instalação.

A Figura 3.2 a seguir apresenta um esquema da área industrial do projeto repositório da Suécia. Neste exemplo, assume-se que as instalações serão construídas em uma área plana. Na realidade, as instalações serão adaptadas às condições existentes na superfície do sítio. Este esquema é interessante pois dá uma idéia da área necessária para a construção do repositório.

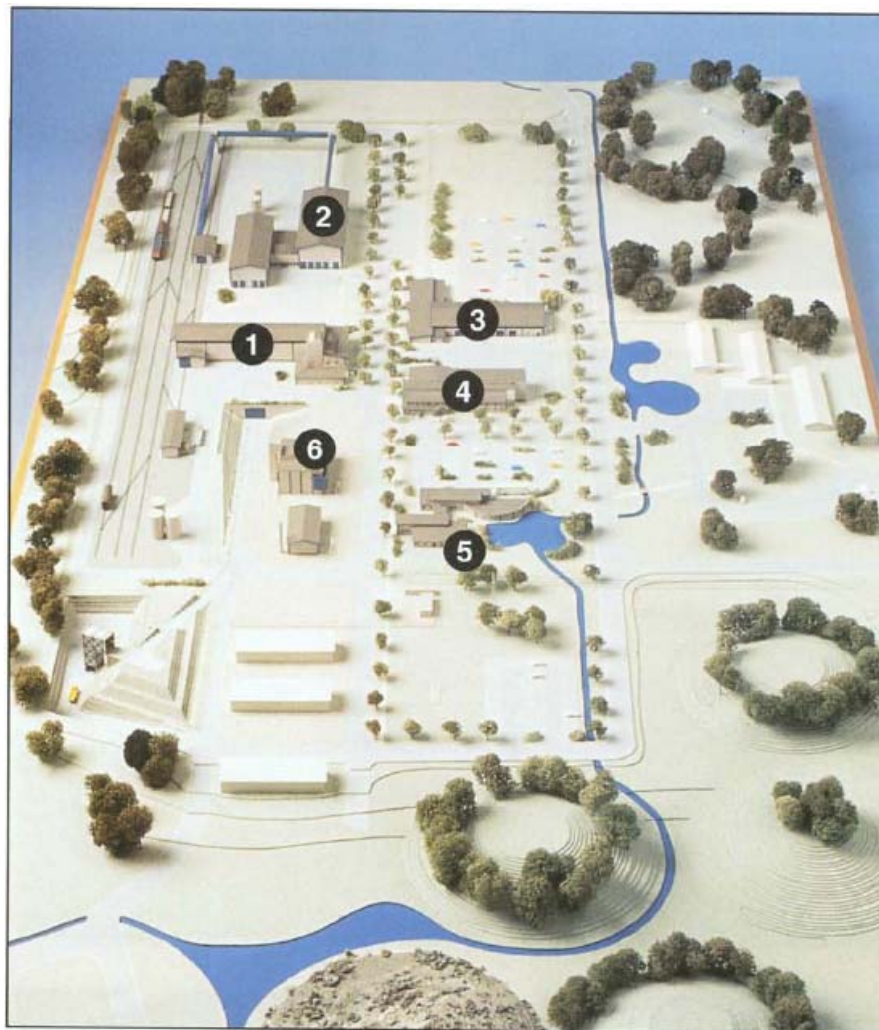


Figura 3.2 - Desenho esquemático da área industrial de um repositório (maquete)

1. Prédio Operacional
2. Galpões
3. Áreas de Pessoal
4. Escritórios
5. Informações, refeitório
6. Prédio de Ventilação

As instalações industriais cobrirão uma certa área na superfície. A área total necessária é de cerca de 600 x 300m, além de 500 x 300m de área necessária para a recuperação dos restos de rocha que não puderem ser utilizados para outros fins.

O *layout* da área do repositório com as instalações de superfície e subterrâneas pode ser observado na Figura 3.3 a seguir.

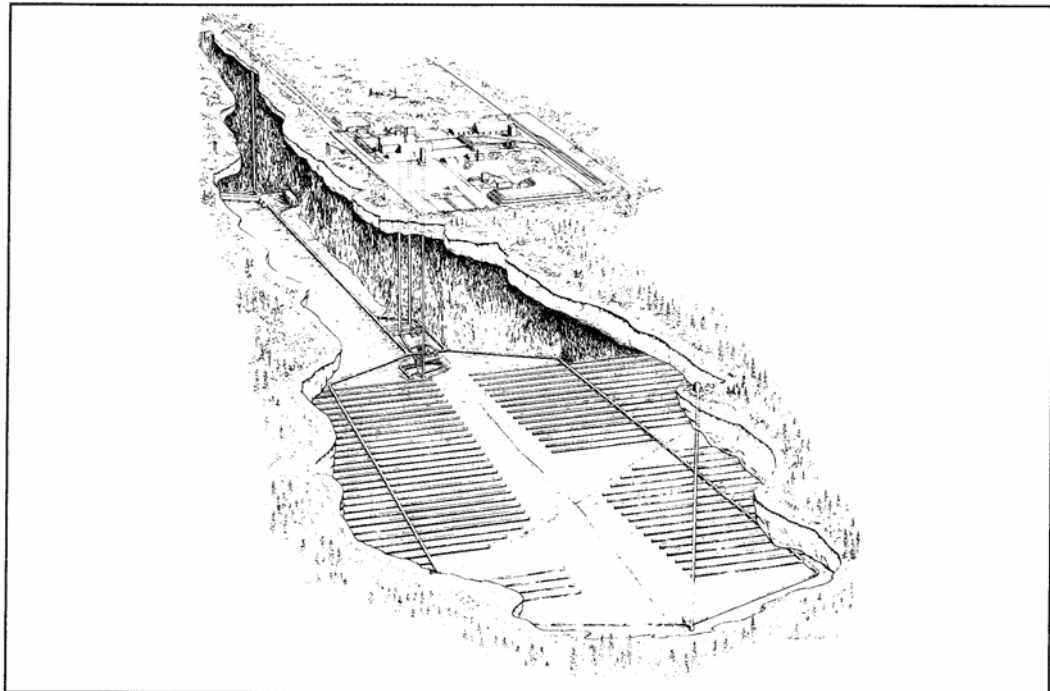


Figura 3.3 – Possível *layout* do repositório geológico

3.2 Sistemas de Informação Geográfica

A coleta de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foi uma parte importante das atividades das sociedades organizadas. No entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, o que impedia uma análise que combinasse diversos mapas e dados.

Um dos trabalhos mais importantes nesta área é o de McHARG (1969), um dos precursores dos procedimentos de sobreposição de mapas para análises de

adequabilidade de uso da terra, que propôs uma abordagem que lidava com a preparação de diversos mapas, cada um com um tema diferente. Cada unidade no mapa era colorida de branco (muito adequada) a preto (inadequada). Estes mapas foram elaborados por McHarg em folhas de acetato transparentes. Pela sobreposição destas folhas umas sobre as outras e a visão final do mapa composto com todas as cores e temas, McHarg observou as áreas que apareciam brancas poderiam ser consideradas adequadas para o problema em questão, e as áreas que se mostravam escuras poderiam ser consideradas inadequadas. McHarg argumentou então que este tipo de análise poderia ser utilizada para identificar a melhor localização para uma função específica.

Com o desenvolvimento da tecnologia de informática, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento.

O termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados.

Existem diversas tentativas de se definir um SIG. Apresentam-se a seguir algumas definições:

- “Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados” (ARONOFF, 1989);
- “Conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real” (BURROUGH, 1986);
- “Um sistema de suporte à decisão que integra dados referenciados espacialmente num ambiente de respostas a problemas” (COWEN, 1988);
- “Um banco de dados indexados espacialmente, sobre o qual opera um conjunto de procedimentos para responder a consultas sobre entidades espaciais” (SMITH *et al.*, 1987).

Estas definições de SIG refletem, cada uma à sua maneira, a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização.

Uma cuidadosa análise destas definições mostra que elas costumam focar dois aspectos: tecnologia e/ou solução de problemas (MALCZEWSKI, 1999). A abordagem tecnológica define o SIG como “um conjunto de ferramentas para entrada, armazenamento e recuperação, manipulação e análises e finalmente saída de dados espaciais” (MARBLE *et al*, 1984). Esta abordagem ignora os aspectos de solução de problemas do SIG. Ao final da descrição da ferramenta voltaremos a esta questão.

3.2.1 Componentes de um SIG

Numa visão abrangente, pode-se indicar que um SIG tem os seguintes componentes:

- ✓ Interface com o Usuário;
- ✓ Entrada de Dados;
- ✓ Armazenamento e Gerenciamento de Dados;
- ✓ Análise e Manipulação de Dados;
- ✓ Saída de Dados.

A Figura 3.4 a seguir, indica o relacionamento dos principais componentes ou subsistemas de um SIG.

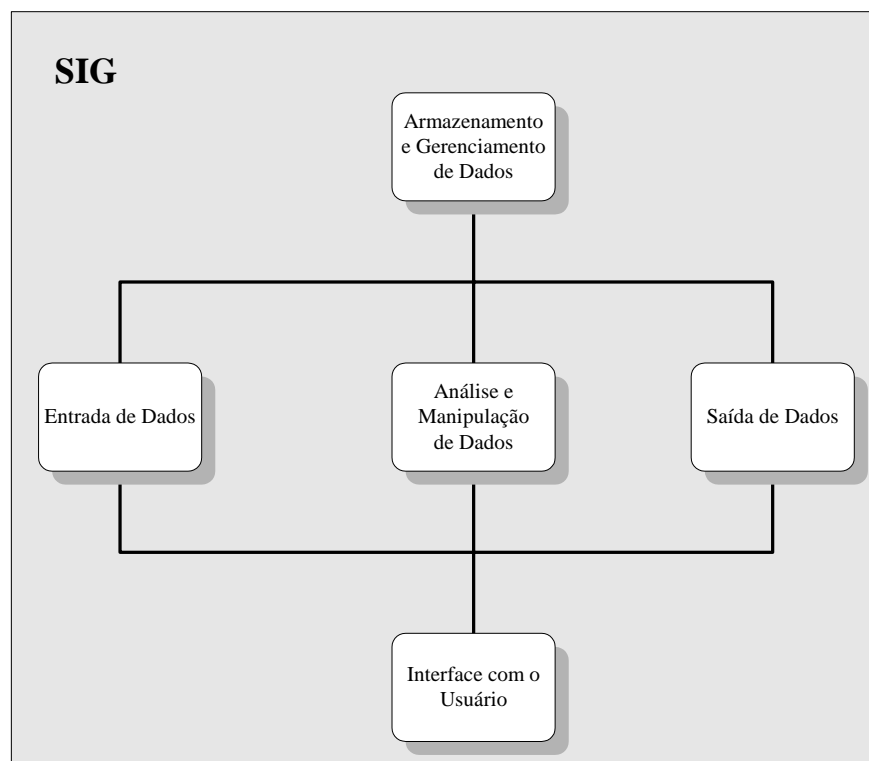


Figura 3.4 - Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica

3.2.1.1 Entrada de dados

Refere-se ao processo de identificação e obtenção dos dados necessários a uma aplicação específica. Este processo envolve a aquisição, reformulação, georreferenciamento, compilação e documentação dos dados. O componente de entrada de dados converte os dados de sua forma existente ou bruta para um formato que possa ser utilizado pelo SIG. Como os dados necessários para um dado projeto podem ser encontrados em diferentes formatos (mapas, tabelas, cartas, fotos aéreas, imagens de satélite e conjuntos de dados digitais), uma vantagem do SIG é a eficiência com que ele pode integrar esta ampla gama de dados e informações em um formato compatível para a análise.

Os dados podem ser inseridos em um SIG utilizando-se o teclado e o mouse de um computador, através de mesas digitalizadoras, *scanners* ou pela importação (através da Internet) ou obtenção (junto a órgãos públicos, universidades, etc.) de dados digitais.

3.2.1.2 Armazenamento e Gerenciamento de Dados

Este componente inclui as funções necessárias ao armazenamento e recuperação dos dados a partir de um banco de dados. Este banco de dados pode ser definido como uma coleção não redundante de dados organizados em um computador de modo que possam ser expandidos, atualizados, recuperados e compartilhados por vários usuários. De acordo com MALCZEWSKI (1999), o banco de dados de um SIG deve ser pensado como um modelo dos sistemas geográficos do mundo real. Neste tipo de modelo, deve-se fazer uma distinção entre entidade geográfica, que é um elemento do mundo real e um objeto, que é uma representação da entidade geográfica. Objetos geográficos são descritos por dois tipos de dados (componentes): dados de localização, que relacionam os objetos à sua localização no espaço geográfico (componente espacial ou gráfica) e dados de atributo, que descrevem outras propriedades do objeto além de sua localização (componente não gráfica ou atributos).

Por último, os dados em um SIG são normalmente organizados por mapas temáticos separados. Cada um destes mapas temáticos é denominado de Plano de Informação (*layer*). Um plano de informação é um conjunto de dados descrevendo uma única característica de cada local dentro de uma área geográfica delimitada. Apenas um item de informação está disponível para cada local em um plano de informação. A sequência de planos de informação normalmente se inicia com uma base cartográfica,

sobre a qual outros planos de informação, contendo dados específicos para o problema, vão sendo adicionados (p.ex. uso da terra, tipos de solo, hidrografia, distribuição populacional, etc.). Cada plano de informação contém informações de natureza diferente e pode ser considerado como uma variável, ou seja, ele captura a variação de um atributo sobre a superfície da Terra.

A Figura 3.5 a seguir apresenta a estrutura de planos de informação em um SIG.

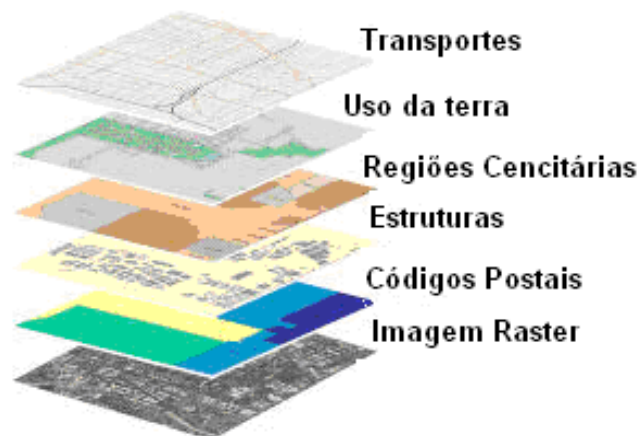


Figura 3.5 - Tipos de dados espaciais organizados em planos de informação⁵

A Figura 3.6 a seguir faz um resumo das informações apresentadas anteriormente, mostrando a forma como os dados são apresentados em um SIG.

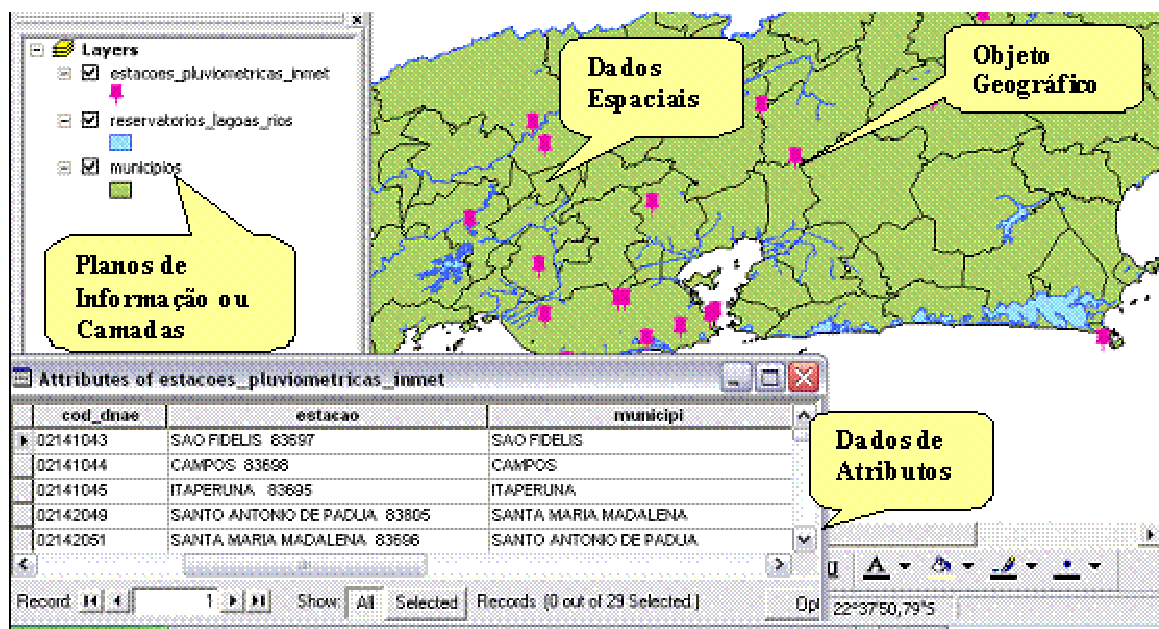


Figura 3.6 - Estrutura dos dados em um SIG

⁵ adaptado de:

http://www.fpa.nifc.gov/Library/Documentation/FPA_PM_Reference_Information/Output/GIS_overview.html#503035 – 06/11/2006
- FPA Project - Idaho State Office

3.2.1.2.1 Representação dos Dados Espaciais ou Gráficos

Os modelos geométricos para a representação da componente gráfica ou espacial no ambiente digital são o matricial, também denominado de raster, e o vetorial. As operações dos SIG, para serem eficientemente executadas, requerem que as camadas estejam representadas em um determinado modelo. Em geral, estes sistemas suportam os dois modelos.

Os dados espaciais podem ser representados de duas maneiras:

- ❖ Raster ou Matricial - (contínuo)– neste modelo o terreno é representado por uma matriz M_{ij} , composta por i colunas e j linhas, que definem células, denominadas como pixels, ao se cruzarem. Cada pixel apresenta um valor referente ao atributo, além dos valores que definem o número da coluna e o número da linha, correspondendo, quando o arquivo está georreferenciado, às coordenadas x e y, respectivamente. Neste tipo de representação, a superfície é concebida como contínua, onde cada pixel representa uma área no terreno, definindo a resolução espacial. Em dois documentos visualizados na mesma escala, o de maior resolução espacial apresentará pixels de menor tamanho, já que discrimina objetos de menor tamanho. A Figura 3.7 a seguir mostra uma representação matricial ou raster.

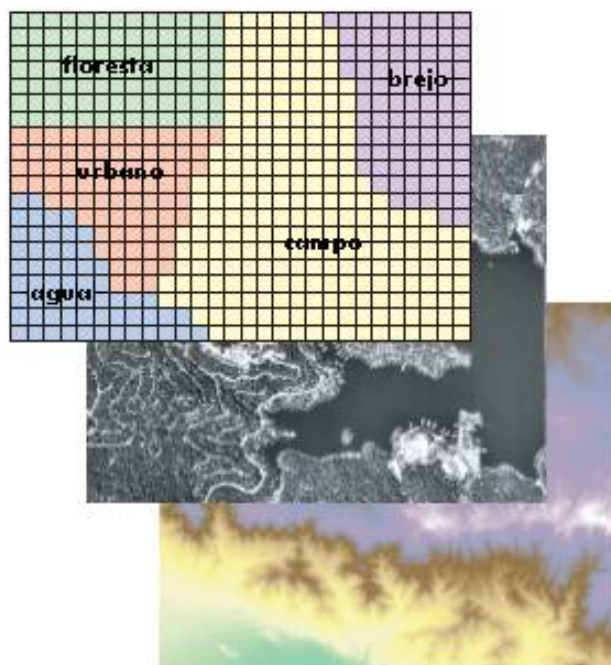


Figura 3.7 - Modelo de representação matricial ou raster.

❖ Vetorial (discreto) - a localização e a feição geométrica do elemento são armazenadas e representadas por vértices definidos por um par de coordenadas. Dependendo da sua forma e da escala cartográfica, os elementos podem ser expressos pelas seguintes feições geométricas:

a. Pontos – representados por um vértice, ou seja, por apenas um par de coordenadas, definindo a localização de objetos que não apresentam área nem comprimento. Exemplos: hospital representado em uma escala intermediária ou cidade em uma escala pequena, epicentro de um terremoto.

b. Linhas poligonais ou arcos – representados por, no mínimo, dois vértices conectados (ou pontos conectados), gerando polígonos abertos que expressam elementos que possuem comprimento ou extensão linear. Então uma linha é representada como um número de coordenadas ao longo de seu comprimento Exemplos: estradas, rios.

c. Polígonos - representados por, no mínimo, três vértices conectados, sendo que o primeiro

d. possui coordenadas idênticas ao do último, gerando, assim, polígonos fechados que definem elementos geográficos com área e perímetro. Sendo assim, um polígono é representado por um conjunto de coordenadas em seus cantos. Exemplos: limites políticos-administrativos (municípios, estados), classes de mapas temáticos (uso e cobertura do solo, pedologia).

A Figura 3.8 a seguir mostra como os dados podem ser apresentados no formato vetorial.

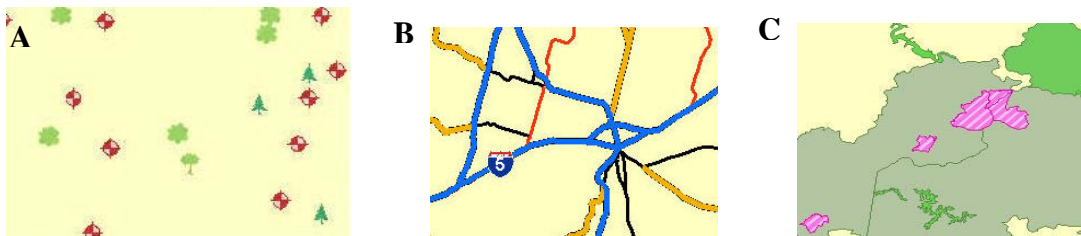


Figura 3.8: Modelo de representação vetorial: (a) pontos, (b) linhas e (c) polígonos.

Como observamos anteriormente, dados temáticos admitem tanto a representação matricial quanto a vetorial; deste modo, é relevante compará-las.

Para a produção de cartas e em operações onde se requer maior precisão, a representação vetorial é mais adequada. As operações de álgebra de mapas são mais facilmente realizadas no formato matricial.

CÂMARA e MONTEIRO (2004) apresentam uma comparação entre as vantagens e desvantagens de armazenamento matricial e vetorial para mapas temáticos (Tabela 3.1). Esta comparação leva em conta os vários aspectos: relacionamentos espaciais, análise, armazenamento. Nesta tabela, o formato mais vantajoso para cada caso é apresentado em destaque.

Tabela 3.1 - Comparação entre representações para mapas temáticos

<i>Aspecto</i>	<i>Representação Vetorial</i>	<i>Representação Matricial</i>
Relações espaciais entre objetos	Relacionamentos topológicos entre objetos disponíveis	Relacionamentos espaciais devem ser inferidos
Ligação com banco de dados	Facilita associar atributos a elementos gráficos	Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, Simulação e Modelagem	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representa melhor fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis
Escalas de trabalho	Adequado tanto a grandes quanto a pequenas escalas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25.000 e menores)
Algoritmos	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente.
Armazenamento	Por coordenadas (mais eficiente)	Por matrizes

3.2.1.3 Análise e Manipulação dos Dados

Segundo CÂMARA e MONTEIRO (2004) as funções de manipulação e análise de dados geográficos podem ser agrupadas de acordo com o tipo de dado tratado (correspondente a uma geometria distinta): análise geográfica, processamento de imagens, modelagem de terreno, redes, geodésia e fotogrametria, produção cartográfica. A Análise Geográfica por exemplo, permite a combinação de informações temáticas e pode ser realizada tanto no domínio vetorial como no matricial (raster). Um conjunto importante de procedimentos de análise geográfica foi definido por TOMLIN (1990) e

denominado “Álgebra de Mapas”, estes procedimentos são a base de implementações de operadores de análise em diferentes sistemas.

Estas funções incluem:

- ✧ Reclassificação;
- ✧ Intersecção (“overlay”);
- ✧ Operações, booleanas e matemáticas entre mapas; e
- ✧ Consulta ao banco de dados.

3.2.1.4 Saída de Dados

Este componente do SIG fornece uma maneira de ver os dados ou informações na forma de mapas, tabelas, diagramas, etc., ou seja, este componente mostra aos usuários os resultados do processamento e das análises em um SIG. O padrão de saída de dados mais freqüente é o uso de mapas acompanhados de tabelas. Os resultados apresentados na forma de mapas podem ser modificados ou melhorados interativamente, através de funções de composição de mapas cartográficos para a adição de elementos tais como legendas, títulos, rosa dos ventos, barras de escala, modificação de cores e ajuste de simbologia.

3.3 Análise de Decisão Multicritério

De um modo geral, problemas de tomada de decisão multicritério envolvem um conjunto de alternativas que são avaliadas com base em critérios conflitantes e incomensuráveis (YOON E HWANG, 1995; MALCZEWSKI, 1999).

Análise de Decisão é um conjunto de procedimentos sistemáticos para analisar problemas complexos de decisão. Estes procedimentos incluem a divisão dos problemas de decisão em partes menores porém mais compreensíveis, a análise de cada parte, e, por último, a integração das partes de forma lógica para produzir uma solução significativa. Em geral, problemas de decisão multicritério envolvem seis componentes (KEENEY *et al*, 1993; PITZ e McKILLIP, 1984):

- Uma meta ou um conjunto de metas que o decisor pretende alcançar;
- O decisor ou um grupo de decisores envolvidos no processo de tomada de decisão com suas preferências em relação aos critérios de avaliação;
- Um conjunto de critérios de avaliação (objetivos e/ou atributos físicos);
- O conjunto de alternativas de decisão;

- O conjunto de variáveis não-controláveis (independentes) ou “estados da natureza” (ambiente de decisão);
- O conjunto de resultados ou conseqüências associadas a cada par de alternativas e atributos.

As relações entre os elementos de um problema de decisão multicritério são mostrados na Figura 3.9 a seguir.

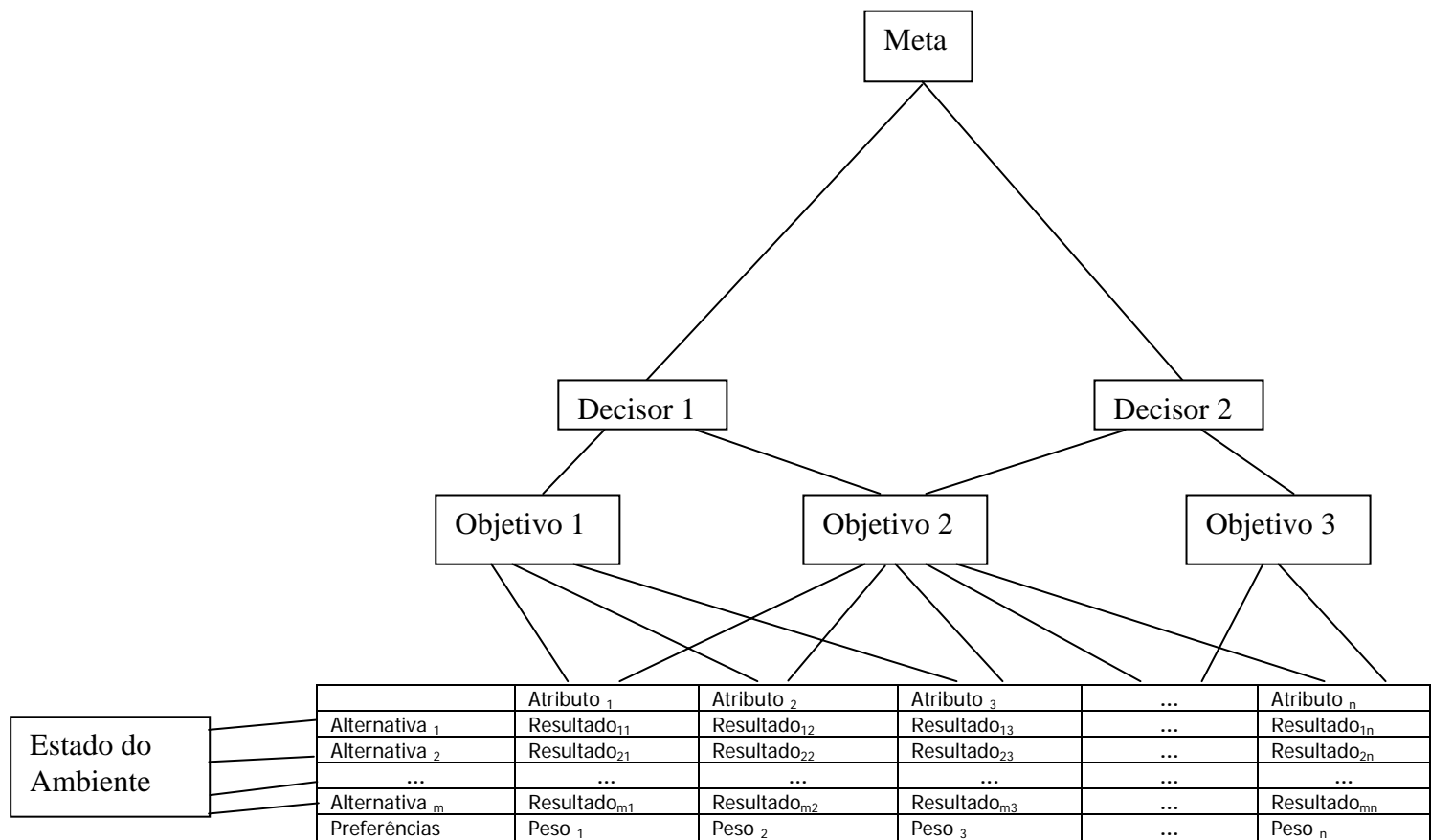


Figura 3.9 – Infraestrutura para problemas de decisão multicritério.

O elemento central desta estrutura é uma matriz de decisão, que consiste de um conjunto de colunas e linhas (PITZ e MCKILLIP, 1984). A matriz representa os resultados de decisão para um conjunto de alternativas e para um conjunto de critérios de avaliação.

A estrutura de colunas consiste de níveis representando os decisores, suas preferências e critérios de avaliação. Estes elementos são organizados em uma estrutura hierárquica. O nível mais geral é a meta que se deseja alcançar. Neste nível é especificado o estado final desejado como resultado da atividade de decisão.

As linhas da matriz de decisão representam as alternativas de decisão. Todas as decisões são tomadas em algum tipo de contexto ambiental e, portanto, envolvem muitos fatores além do controle do decisor. Estes fatores independentes (não-controláveis) são denominados estados da natureza ou estados do ambiente (p.ex. um estado da economia, condições climáticas, etc.). Neste contexto, o termo natureza refere-se à imprevisibilidade geral do ambiente de decisão. Os estados da natureza refletem o grau de incerteza acerca dos resultados da decisão (consequências).

Os resultados da decisão dependem de um conjunto de atributos para que se possam avaliar as alternativas. Conseqüentemente, uma entrada na interseção entre cada linha e coluna da matriz de decisão é o resultado associado com uma alternativa e um atributo particular. Então, os resultados (decisões) em cada linha da matriz são representados como níveis de atributos, os quais medem o grau de atendimento ou de desempenho de uma alternativa de decisão. O problema de decisão necessita que um conjunto de resultados seja ordenado de modo que a melhor alternativa possa ser identificada.

3.3.1 Abordagens para Problemas Multicritério

No contexto da decisão multicritério, o termo “critério” é aplicado tanto aos objetivos como aos atributos (YOON e HWANG, 1995; MALCZEWSKI, 1999; ZELENY, 2005). A seguir serão tratadas as duas abordagens (multi-objetivo e multi-atributo) utilizadas em problemas de decisão multicritério.

3.3.1.1 Abordagem Multi-objetivo

Um objetivo indica as direções de melhora de um ou mais atributos em direção ao estado desejado do sistema considerado. Existem apenas duas direções: mais ou menos, ou seja, maximizar ou minimizar os atributos considerados de modo a se

alcançar a solução que melhor corresponda ao estado desejado do sistema (ZELENY, 2005). Problemas multi-objetivo envolvem então projetar a melhor alternativa (maximizando ou minimizando atributos) dado um conjunto de objetivos conflitantes (YOON e HWANG, 1995). Esta categoria de abordagem multicritério envolve a elaboração de alternativas e a busca por melhores decisões dentre um conjunto infinito ou muito grande de alternativas viáveis (MALCZEWSKI, 1999). O papel de abordagens multi-objetivo no processo de decisão é fornecer uma infraestrutura para a concepção de um conjunto de alternativas. Por exemplo, uma fábrica de automóveis deseja conceber um automóvel que maximize o conforto e a economia de combustível e minimize o custo de produção. As alternativas são criadas pelo processo de projeto, e a quantidade de alternativas pode ser tantas quanto o projeto produzir.

3.3.1.2 Abordagem Multi-atributo

Problemas multi-atributo envolvem a ordenação das alternativas de acordo com seu grau de atendimento aos objetivos propostos e, então, a decisão quanto à alternativa preferida (p.ex. através de avaliação, priorização, seleção) a partir das alternativas disponíveis. Uma alternativa é normalmente descrita por um conjunto de atributos muitas vezes conflitantes, que representam propriedades das alternativas analisadas. Um atributo também pode ser definido como uma qualidade ou quantidade mensurável, cujo valor reflete o grau em que um determinado objetivo é alcançado (CHANKONG e HAIMES, 1983). Sendo assim, pode-se dizer que um atributo pode ser utilizado tanto como uma variável de decisão quanto como um critério de decisão.

Para que possa ser realizada a ordenação referida anteriormente, é necessário que se possa verificar o grau de atendimento dos objetivos pelas diversas alternativas disponíveis. Faz-se esta verificação através do uso de atributos como critérios de decisão, ou seja, um atributo é usado para medir o desempenho de uma alternativa em relação a um objetivo (MALCZEWSKI, 1999).

Resumindo, a solução de um problema multi-objetivo é um processo de projeto, enquanto a solução de um problema multi-atributo é um processo de seleção. Problemas multi-objetivo são contínuos, do ponto de vista que a melhor solução pode ser encontrada em qualquer local dentro da região de alternativas viáveis. Já problemas multi-atributo são considerados discretos, pois possuem um número pequeno de alternativas.

A Tabela 3.2 a seguir fornece uma comparação entre os dois tipos de abordagem para problemas multicritério.

Tabela 3.2 – Comparação entre as abordagens multi-atributo e multi-objetivo.

	MODM ⁶	MADM ⁷
Critérios definidos por:	Objetivos	Atributos
Objetivos definidos:	Explicitamente	Implicitamente
Atributos definidos	Implicitamente	Explicitamente
Restrições definidas:	Explicitamente	Implicitamente
Alternativas definidas:	Implicitamente	Explicitamente
Número de alternativas	Infinito (grande)	Finito (pequeno)
Controle do decisor	Significativo	Limitado
Paradigma da modelagem de decisão	Orientado ao processo	Orientado a resultados
Relevante para:	Projeto/Busca	Avaliação/Escolha
Relevância da estrutura de dados geográficos	Vetor	Raster

3.4 Análise de Decisão Multicritério Espacial

Problemas de decisão multicritério espacial envolvem um conjunto de alternativas geograficamente definidas, a partir das quais é feita a escolha de uma ou mais alternativas no que diz respeito a um dado conjunto de critérios de avaliação (CARVER, 1991; HEYWOOD *et al*, 1995; KELLER, 1996; MALCZEWSKI, 1996). As alternativas são definidas geograficamente no sentido em que os resultados das análises (decisões) dependem do seu arranjo espacial.

As técnicas convencionais de Análise de Decisão Multicritério são em sua grande maioria não-espaciais. Elas usam tipicamente uma média dos impactos ou os impactos totais, que são considerados apropriados para a área inteira sob consideração (TKACH e SIMONOVIC, 1997). Em outras palavras, abordagens convencionais assumem uma homogeneidade espacial dentro da área de estudo, o que não é a realidade em muitas situações de decisão porque os critérios de avaliação variam através do espaço. Análises Multicritério Espaciais representam um avanço significativo em relação às técnicas convencionais de Análise Multicritério devido ao seu componente geográfico explícito.

A Análise de Decisão Multicritério Espacial pode ser pensada como um processo que combina e transforma dados geográficos (entradas) em uma decisão

⁶ Multi Objective Decision Making

⁷ Multi Attribute Decision Making

resultante (saída). Os procedimentos da Análise Multicritério (ou regras de decisão) definem uma relação entre os mapas de entrada e o mapa de saída. Os procedimentos envolvem a utilização de dados geográficos, das preferências dos decisores e a manipulação destes dados e preferências de acordo com regras específicas de decisão. Elas agregam dados geográficos multidimensionais e informação em valores unidimensionais das alternativas de decisão. A Figura 3.10 a seguir apresenta como é realizado o tratamento dos dados na Análise de Decisão Multicritério Espacial.

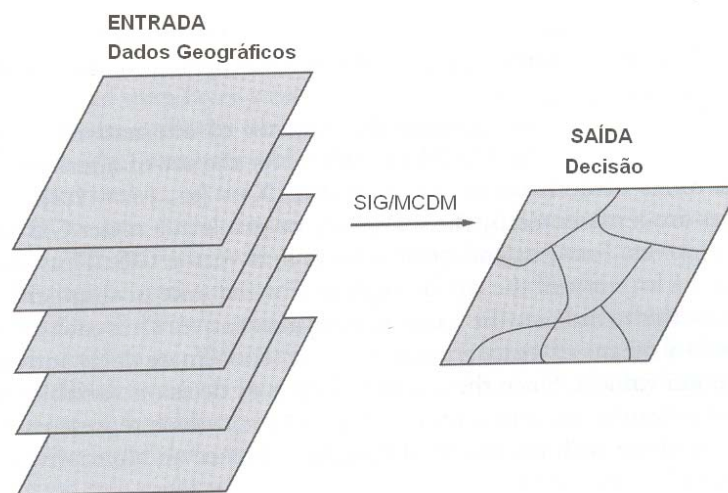


Figura 3.10 - Análise de Decisão Multicritério Espacial

3.4.1 Infraestrutura do Processo de Análise de Decisão Multicritério Espacial

A tomada de decisão é um processo. Ela envolve uma seqüência de atividades que se inicia com o reconhecimento do problema de decisão e termina com as recomendações. A Figura 3.11 a seguir, apresenta a seqüência de atividades envolvidas em análises de decisão multicritério espacial. A seguir, serão apresentadas as etapas envolvidas no Processo de Análise de Decisão Multicritério Espacial.

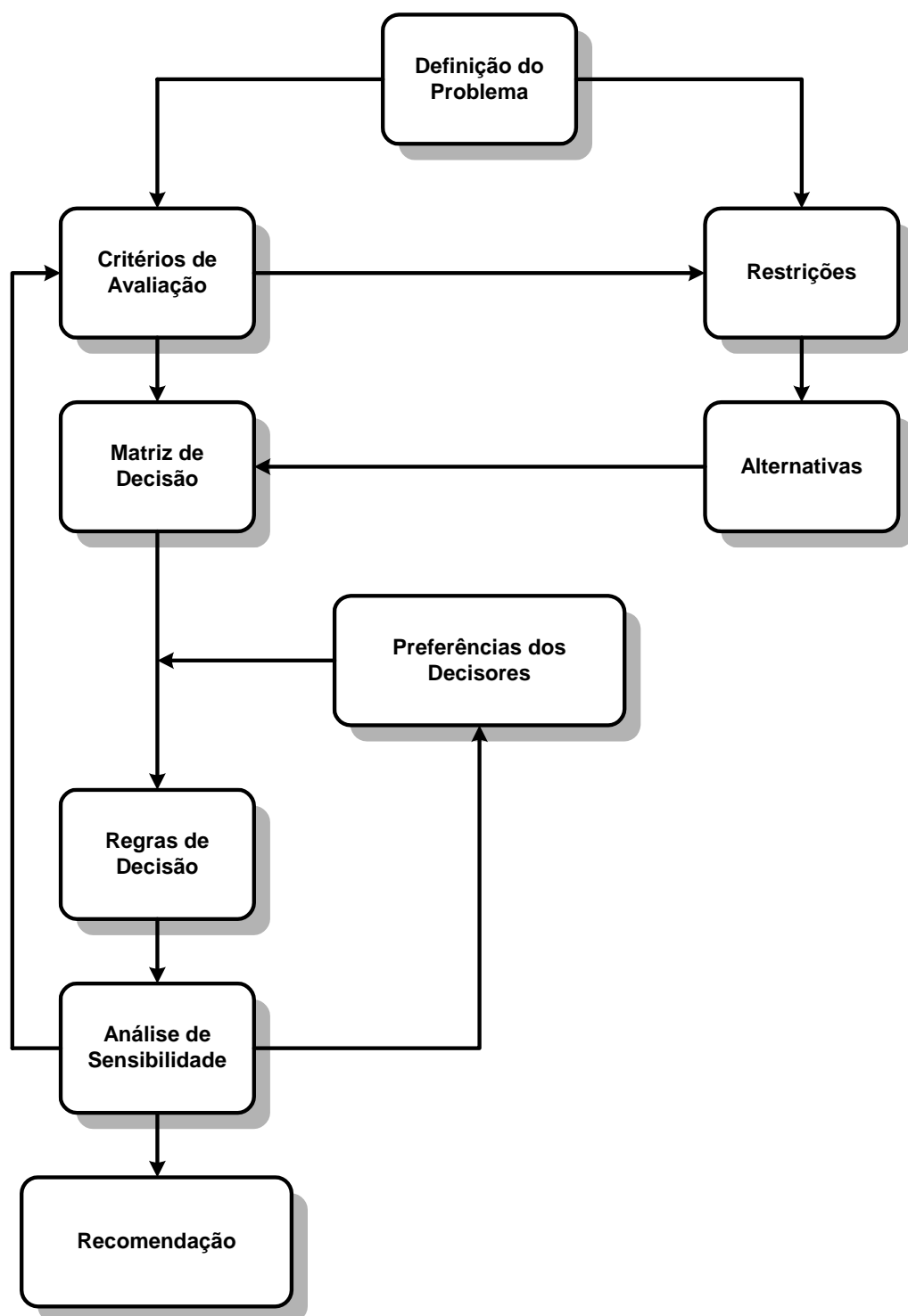


Figura 3.11 – Infraestrutura para Análise de Decisão Multicritério Espacial

3.4.1.1 Definição do Problema

Qualquer processo de tomada de decisão inicia-se com o reconhecimento e a definição do problema de decisão. O problema de decisão é a diferença percebida entre o estado existente e o desejado de um sistema (MALCZEWSKI, 1999). Nesta etapa, os dados brutos são obtidos, processados e examinados em busca de pistas que possam identificar oportunidades ou problemas. As habilidades do SIG para armazenar, gerir, manipular e analisar dados oferecem o principal suporte no estágio de definição do problema.

3.4.1.2 Critérios de Avaliação

Uma vez que o problema de decisão é identificado, a análise multicritério espacial foca o conjunto de critérios de avaliação (objetivos e atributos). Esta etapa envolve a especificação (1) de um conjunto abrangente de objetivos que reflitam todas as preocupações (questões) relevantes para o problema de decisão, e (2) medidas para se alcançar estes objetivos. Tais medidas são chamadas de atributos. Uma escala de medida deve ser definida para cada atributo. O grau em que os objetivos são atendidos, medido pelos atributos, é a base para comparação das alternativas. Os critérios de avaliação estão associados com as entidades geográficas e as relações entre elas e, portanto, podem ser representados na forma de mapas. Existem dois tipos de mapas de critério:

- *Mapa de critério de avaliação* – é composto por um único atributo geográfico das alternativas de decisão, que pode ser usado para avaliar o desempenho das alternativas.
- *Mapa de restrições* – exhibe as limitações sobre o valor que os atributos e as variáveis de decisão podem assumir.

Nesta etapa, as habilidades do SIG para manipular e analisar dados são utilizadas para gerar entradas para a Análise de Decisão Multicritério Espacial.

3.4.1.3 Alternativas

O processo de geração das alternativas deve estar baseado na estrutura de valores e estar relacionado ao conjunto de critérios de avaliação. Este tipo de abordagem é definido por KEENEY *et al* (1993) como uma abordagem focada no valor (*value-focused approach*) e usa os valores (critérios de avaliação) como o elemento fundamental da análise de decisão. Neste tipo de abordagem, as alternativas são

derivadas da estrutura de valores, ou seja, as alternativas de decisão devem ser geradas de modo que os valores especificados para a situação de decisão sejam mais bem alcançados (KEENEY *et al*, 1993). Isto implica que a ordem de raciocínio foca primeiro no que é desejado e então nas alternativas para obtê-lo. Argumenta-se que os valores são mais importantes do que as alternativas para o problema de decisão. Em outras palavras, as alternativas são os meios para se alcançar os valores mais fundamentais.

Para cada alternativa é atribuída uma variável de decisão. As variáveis são usadas pelo decisor para medir o desempenho das alternativas. O conjunto de variáveis de decisão define o espaço de decisão.

Além das variáveis de decisão, são definidas também restrições. Estas restrições representam limitações impostas ao espaço de decisão. Elas determinam o conjunto de alternativas viáveis. Em termos de SIG, as restrições são utilizadas para eliminar do processo pontos, linhas, polígonos e/ou rasters caracterizados por determinados atributos e/ou valores de atributos.

3.4.1.4 Pesos dos Critérios

Nesta etapa, as preferências dos decisores com relação aos critérios de avaliação são incorporadas ao modelo de decisão. As preferências são expressas em termos de pesos de importância relativa atribuídos aos critérios de avaliação considerados. Amplamente falando, o propósito do peso do critério (objetivo ou atributo) é expressar a importância de cada critério em relação aos outros. A derivação dos pesos é o passo central para se considerar adequadamente as preferências dos decisores. Dados o conjunto de alternativas, atributos e pesos associados, os dados de entrada podem ser organizados na forma de uma matriz de decisão.

3.4.1.5 Regras de Decisão

Esta etapa reúne os resultados das três etapas anteriores. As medidas unidimensionais (planos de informação geográficos) e os julgamentos (preferências) devem ser integrados para fornecer uma avaliação global das alternativas. Isto é realizado através de uma regra de decisão ou função de agregação apropriada. É esta regra de decisão que dita como melhor ordenar as alternativas ou que decide que alternativa é preferida em relação às demais.

3.4.1.6 Recomendação

O resultado final de um processo de decisão é uma recomendação para uma futura ação. A recomendação deve estar baseada na classificação das alternativas e na análise de sensibilidade. Ela pode incluir a descrição da melhor alternativa ou de um grupo de alternativas consideradas candidatas à implementação. Técnicas de visualização são de grande importância na apresentação e comunicação dos resultados para os decisores e grupos de interesse.

Embora cada etapa da análise multicritério espacial envolva tanto as metodologias SIG como Multicritério, as etapas diferem no grau em que estas duas metodologias são utilizadas. Nas etapas iniciais, as metodologias SIG têm maior importância, enquanto nas últimas etapas as metodologias Multicritério desempenham o papel principal. Desta maneira, duas considerações são importantes para a análise de decisão multicritério espacial:

1. as habilidades do SIG para aquisição, armazenamento, recuperação, manipulação e análise de dados e,
2. as habilidades das técnicas multicritério para agregar os dados geográficos e as preferências dos decisores em valores unidimensionais das alternativas de decisão.

4 Metodologia

4.1 Definição do Problema

A metodologia proposta aplica-se à seleção de áreas potencialmente adequadas à instalação de um repositório geológico para o combustível nuclear usado. A abordagem dada ao problema é prioritariamente técnica, buscando a avaliação das alternativas através de critérios técnicos relacionados à segurança a longo prazo, viabilidade sócio-econômica-ambiental e viabilidade técnica.

4.2 Critérios de Avaliação e Restrições

Pode-se distinguir duas tendências na definição dos critérios de avaliação (MALCZEWSKI, 1999): a situação problema pode ser descrita de maneira completa ou de maneira simplificada. A diferença entre estas duas tendências encontra-se basicamente no número de critérios envolvidos e na quantidade de informação disponível para a avaliação de cada critério.

Neste trabalho, optou-se por uma descrição simplificada, ou seja, descrita por um pequeno número de critérios. Esta simplificação está relacionada à disponibilidade e qualidade dos dados, ou seja, mesmo que conscientes de que alguns critérios de avaliação são importantes para o problema de decisão, os dados necessários não se encontram disponíveis ou são de baixa qualidade. Além disso, de acordo com KEENEY *et al* (1993), o conjunto de critérios de avaliação deve ser mínimo, ou seja, o número de atributos deve ser o menor possível. Uma descrição completa pode levar a um número formidável de critérios incluídos no modelo de decisão, o que aumenta o esforço, o custo e o tempo despendido no processo de decisão. Por outro lado, um conjunto mínimo de propriedades reduz o esforço necessário para coletar dados e quantificar as preferências dos decisores, otimizando o processo de decisão.

Ainda de acordo com KEENEY *et al* (1993), tanto os critérios (atributos) individuais como o conjunto de critérios (atributos) devem possuir algumas propriedades para representar adequadamente a natureza multicritério do problema de decisão.

Em relação aos critérios estes devem ser:

- Abrangentes e,
- Mensuráveis.

Já o conjunto de critérios deve ser:

- Completo
- Operacional
- Decomponível
- Não redundante e,
- Mínimo.

Embora as propriedades desejáveis dos critérios possam fornecer diretrizes para a sua seleção, não existem técnicas universais disponíveis para se determinar um conjunto de critérios. O conjunto de critérios de avaliação para um problema de decisão particular pode ser obtido através de um exame da literatura relevante, de um estudo analítico e também através do levantamento de opiniões (MacCRIMMON, 1969; KEENEY *et al*, 1993).

Estudos de casos relevantes e documentos de agências ou órgãos governamentais podem ser utilizados como um guia para a seleção de critérios de avaliação para um problema particular (MALCZEWSKI, 1999).

Neste trabalho, o conjunto de critérios foi construído principalmente através de um amplo exame da literatura disponível sobre o tema. A Agência Internacional de Energia Atômica publicou diversas diretrizes tratando do assunto e orientando a elaboração de critérios (IAEA, 1977; IAEA, 1994b; IAEA, 2003a).

Diversos países têm se debruçado sobre o tema da disposição geológica do combustível nuclear usado, tomando como base os documentos da IAEA e desenvolvendo critérios de avaliação próprios, que também serviram como base para a elaboração dos critérios utilizados neste trabalho. Dentre estes trabalhos devemos destacar os realizados pela Suécia (SKB, 1992; SKB, 1994; SKB, 1995; SKB, 2000a; SKB, 2000b), Finlândia (POSIVA OY, 2000), Alemanha (AKEND, 2002), Estados Unidos (NRC, 1983), Canadá (NWMO, 2003; NWMO, 2005), Espanha (ENRESA, 2001), Inglaterra (NIREX, 2001a).

Além dos documentos relacionados acima, também foram consultados, no contexto nacional a Norma NE-606 (CNEN, 1989), a Lei nº 10.308, de 20.11.2001 (BRASIL, 2001a), que dispõe sobre a seleção de locais referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências, Decreto nº 88.821, de 6 de outubro de 1983 (BRASIL, 1983) que regulamenta o transporte rodoviário de cargas ou produtos perigosos, e dá outras providências, a Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965

(BRASIL, 1965) que institui o Novo Código Florestal, a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001 (BRASIL, 2001b), que altera artigos do Código Florestal, a Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000 (BRASIL, 2000), que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza – SNUC, a Resolução do CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002 (BRASIL, 2002b), que dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente e a Resolução do CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006 (BRASIL, 2006) que dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Áreas de Preservação Permanente-APP.

Outro método utilizado para a formulação de critérios de avaliação foi o levantamento de opiniões de especialistas. De acordo com KEENEY *et al* (1993), pessoas afetadas por uma decisão ou um grupo de especialistas podem ser questionados acerca de critérios que devam ser incluídos na análise de decisão.

Foram consultados especialistas nas áreas de transportes, meio ambiente, recursos minerais, uso do solo, hidrogeologia, estruturas, dentre outros. Estes especialistas foram convidados a emitir suas opiniões a respeito de um levantamento preliminar de critérios, realizado com base na pesquisa bibliográfica. Com o auxílio de suas opiniões foram definidos os critérios passíveis de se aplicar ao estudo em questão e também foram definidos os critérios de exclusão e os valores limites a considerar como restrições, além dos critérios de classificação e suas classes.

O perigo do uso de opiniões é que os indivíduos podem deixar que seus sentimentos pessoais comandem o que eles conhecem como fatos. No entanto, opiniões pessoais não são necessariamente más fontes de aconselhamento. Mesmo quando fontes mais objetivas podem ser utilizadas, opiniões podem oferecer valiosos *insights* sobre o problema em questão. Pode-se argumentar que uma combinação desta abordagem com o exame da literatura relevante e/ou um estudo analítico deve ser usado para elaborar um conjunto de critérios de avaliação (MacCRIMMON, 1969; KEENEY *et al*, 1993). Além disso, quando não se dispõe de informação ou esta é secundária, ou seja, foi obtida para a análise de outros tipos de problemas e é a única disponível para auxiliar no tratamento do problema em questão, podemos dizer que a opinião de especialistas é fundamental para que se possa seguir em frente ou, de acordo com ROBERTS (2007), qualquer informação é “melhor do que nada” (*better than nothing*).

4.2.1 Mapas de Critérios

Definidos os critérios de avaliação, cada critério deve ser representado como um plano de informação no banco de dados SIG.

Existem dois tipos de mapas de critério: avaliação (fatores) e restrições (EASTMAN *et al*, 1995; EASTMAN, 2003).

Um mapa de avaliação representa a distribuição espacial de um atributo e é utilizado para avaliar o desempenho das alternativas em relação ao objetivo associado a este atributo. Já as restrições representam limitações impostas às variáveis de decisão (o conjunto de alternativas). Elas podem ser usadas para eliminar da análise alternativas caracterizadas por certos atributos e/ou certos valores de atributos. Então mapas de restrições mostram o conjunto de alternativas viáveis.

O processo de geração de mapas de critérios está baseado nas funções do SIG. Os dados relevantes são adquiridos e armazenados no SIG e então são manipulados e analisados de forma a obter informação sobre um critério de avaliação em particular.

Estes dois mapas de saída são os mapas de entrada para a análise de decisão multicritério. Os mapas de critério são incomensuráveis uma vez que os atributos são medidos em diferentes unidades. Desde que muitas regras de decisão multicritério necessitam que os mapas de critério sejam comensuráveis, estes devem ser padronizados antes de serem utilizados no processo de decisão.

Em problemas de localização, tais como a seleção de um local para uma determinada instalação, as alternativas de decisão podem ser modeladas tipicamente como características. Assim, deve-se permitir que os decisores selecionem os atributos do local que irão fundamentar sua decisão e esta abordagem executa cálculos nas tabelas de atributos.

Uma segunda questão com relação aos critérios de decisão está relacionada aos níveis de medição que podem ser utilizados nas análises de decisão. Deve-se permitir que os decisores trabalhem com critérios numéricos, ordinais assim como nominais. Contudo, a avaliação multicritério necessita de critérios numéricos comensuráveis, selecionados de modo que todos os critérios possam ser transformados em uma escala numérica comum.

4.2.1.1 Padronização dos Critérios

A padronização dos critérios é necessária para permitir um *trade-off* entre os critérios no cálculo dos valores da avaliação final. De modo a melhorar a usabilidade do sistema, trabalhou-se com uma escala qualitativa (RINNER e RAUBAL, 2004). De acordo com a regra de ordenamento, os valores qualitativos podem ser transformados em valores numéricos para um processamento posterior. A Tabela 4.1 a seguir mostra um exemplo de padronização dos critérios.

Tabela 4.1 – Padronização dos critérios de avaliação

Litologia (CPRM) – Segurança a Longo Prazo	Classificação	Notas
Rochas Sedimentares (Sedimentos Holocênicos e Terciários)	Muito Ruim	1
Rochas Metamórficas (Quartzitos e Mármore)	Ruim	2
Rochas Metamórficas (Gnaisses e Migmatitos)	Regular	3
Rochas Metamórficas (Granitóides e Granulitos)	Boa	4
Rochas Ígneas (Alcalinas, Graníticas e Básicas)	Muito Boa	5

Esta abordagem pode ser descrita como uma função de valor/utilidade (RUSSELL e NORVIG, 1995) em que o decisor transforma as classes de valores de atributos em um único valor de acordo com a sua preferência. Esta abordagem permite a transformação de intervalos de atributos (distâncias) e categorias de atributos (litologia) em valores úteis.

4.2.2 Alternativas de Decisão

Nesta etapa, de posse dos mapas de critérios de avaliação (fatores), são geradas as alternativas de decisão. Cada alternativa é caracterizada por um vetor. Para formalizar o problema de decisão multi-atributo, o conjunto de alternativas X pode ser definido em termos de variáveis de decisão, ou seja, $X = \{x_{i*} \mid i = 1, 2, \dots, m\}$. As alternativas são representadas por um conjunto de células ou pixels em um SIG raster ou por um conjunto de pontos, linhas e/ou polígonos em um SIG vetor. Então o índice i indica a localização da i –ésima alternativa. Sendo assim, cada alternativa é descrita por sua localização e por seus valores de critérios (atributos). Desde que os atributos servem como variáveis de decisão, pode-se designar o valor de um critério por x_{ij} que representa o nível do j –ésimo atributo em relação à alternativa i . Desta forma, uma alternativa i pode ser caracterizada por um vetor

$$x_{i*} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \text{ para } i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{Eq. 4.1})$$

e os níveis dos atributos através de uma alternativa são representados por um vetor

$$x_{j*} = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}) \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Os dados de entrada para a análise de decisão multicritério espacial (Eqs. 4.1 e 4.2) podem ser organizados em uma forma tabular (Tabela 4.2). A tabela, também denominada matriz de decisão, mostra as relações alternativa-atributo. As linhas da matriz representam as alternativas. Cada alternativa é descrita por sua localização e por seus dados de atributos. Cada atributo é contabilizado em uma coluna na matriz de decisão. As células da matriz contêm os valores medidos ou avaliados dos atributos com relação às alternativas.

Tabela 4.2 – Matriz relação alternativa-atributo

	Atributo 1	Atributo 2	...	Atributo n
Alternativa 1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}
Alternativa 2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}
...
Alternativa m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}

4.2.2.1 Restrições

Dado o conjunto de alternativas para o problema de decisão, este pode ser limitado através da imposição de restrições sobre os valores dos atributos (restrições não-espaciais) ou sobre os atributos de localização (restrições espaciais).

Como já dito anteriormente, restrições são limitações impostas, pela natureza ou pelos seres humanos (normas, leis, etc.), que não permitem que certas ações sejam tomadas (KEENEY, 1980). A especificação de restrições está baseada normalmente nos recursos e regulamentações disponíveis e envolve julgamentos profissionais ou de valor. No Brasil, assim como em muitos países, existe um número de normas, leis e padrões, impostos pelo planejamento urbano, de transportes, ambiental, dentre outros. Em geral, para o atendimento destes padrões é necessário que as alternativas atendam a valores específicos com relação a todos os critérios ou a algum critério de avaliação.

Quando a avaliação das alternativas com relação às restrições, não considera *trade-offs* entre os critérios de avaliação, diz-se que esta avaliação é não compensatória.

Por outro lado, se forem considerados *trade-offs* entre os diversos critérios diz-se que o processo de avaliação é compensatório.

O processo de avaliação não-compensatório pode ser ainda classificado em conjuntivo (quando uma alternativa é aceita se atender a padrões específicos ou valores limites para todas as restrições) ou disjuntivo (quando uma alternativa é aceita caso apresente valores bastante altos em pelo menos um dos critérios sob consideração).

Neste trabalho adotou-se o processo de análise das restrições através do método não compensatório conjuntivo que é mais restritivo.

Os passos para se fazer este tipo de análise são os seguintes:

1. Especificar os valores mínimos ou máximos aceitáveis para cada atributo, x_j^* para $j = 1, 2, \dots, n$;
2. Para um dado Plano de Informação (*layer*) de atributo j , gerar um novo Plano de Informação onde é atribuído o valor 0 ou 1 à i -ésima para $i = 1, 2, \dots, m$. Para o caso de valores mínimos, se $x_{ij} \leq x_j^*$, então é atribuído o valor 1, caso contrário o valor 0 é atribuído. Já para o caso de valores máximos, se $x_{ij} \geq x_j^*$ o valor 0 é atribuído, caso contrário o valor 1 é atribuído.
3. É feita a sobreposição dos n mapas usando a operação da multiplicação (lógica AND) a fim de se obter um novo Plano de Informação contendo 0 e 1. As alternativas que ao final do processo apresentarem a classificação 0 para pelo menos uma restrição são consideradas inviáveis. Já as alternativas que apresentarem classificação 1 para todas as restrições continuam a ser consideradas viáveis.

4.2.3 Atribuição de Pesos aos Critérios

Problemas de decisão multicritério envolvem tipicamente critérios que variam de importância para os decisores (MALCZEWSKI, 1999). Conseqüentemente, é necessário que se disponha de informação acerca da importância relativa de cada critério em relação a outro. Isto é obtido através da atribuição de um peso a cada critério. A obtenção dos pesos é um passo importante no entendimento e utilização das preferências dos decisores. Um peso pode ser definido como um valor, atribuído a um critério de avaliação, que indica sua importância com relação a outro critério de

avaliação considerado (MALCZEWSKI, 1999). Quanto maior o peso, maior a importância do critério para a avaliação global.

São propostos na literatura diversos métodos para a atribuição de pesos aos critérios, com base em julgamentos dos decisores, (ordenação, classificação, *trade-off* e comparação par a par). Estes métodos diferem no grau de dificuldade de aplicação, na precisão, no grau de entendimento por parte dos envolvidos e na fundamentação teórica por trás de cada método. Outra característica importante a ser avaliada na adoção de um método de atribuição de pesos é a maneira como o método pode ser incorporado à análise de decisão baseada em SIG. Levando-se em conta a precisão e a fundamentação teórica como critérios importantes na escolha do método, além da facilidade de aplicação e de importação dos resultados para o ambiente SIG, optou-se pelo método de Comparação Par a Par ou Comparação de Pares.

Este método foi desenvolvido por SAATY (1980) no contexto do Processo de Análise Hierárquica de Decisão (*Analytic Hierarchy Process* - AHP) e envolve a comparação dos critérios aos pares de modo a criar uma matriz de relação (proporção). Ele toma como entrada as comparações par a par e produz os pesos como saída. Especificamente, os pesos são determinados pela normalização do autovetor associado com o máximo autovalor da matriz de relação recíproca.

Para a aplicação deste método é importante a decomposição do problema em níveis ou hierarquias, que consistem dos elementos mais importantes do problema de decisão, de modo a facilitar a análise. Uma estrutura hierárquica é composta tipicamente por quatro níveis: metas, objetivos, atributos e alternativas. Esta hierarquização é importante nesta etapa, pois as comparações entre critérios devem ser feitas entre elementos do mesmo nível hierárquico e que correspondam ao mesmo objetivo.

Para este trabalho foi desenvolvida a seguinte hierarquia (Figura 4.1).

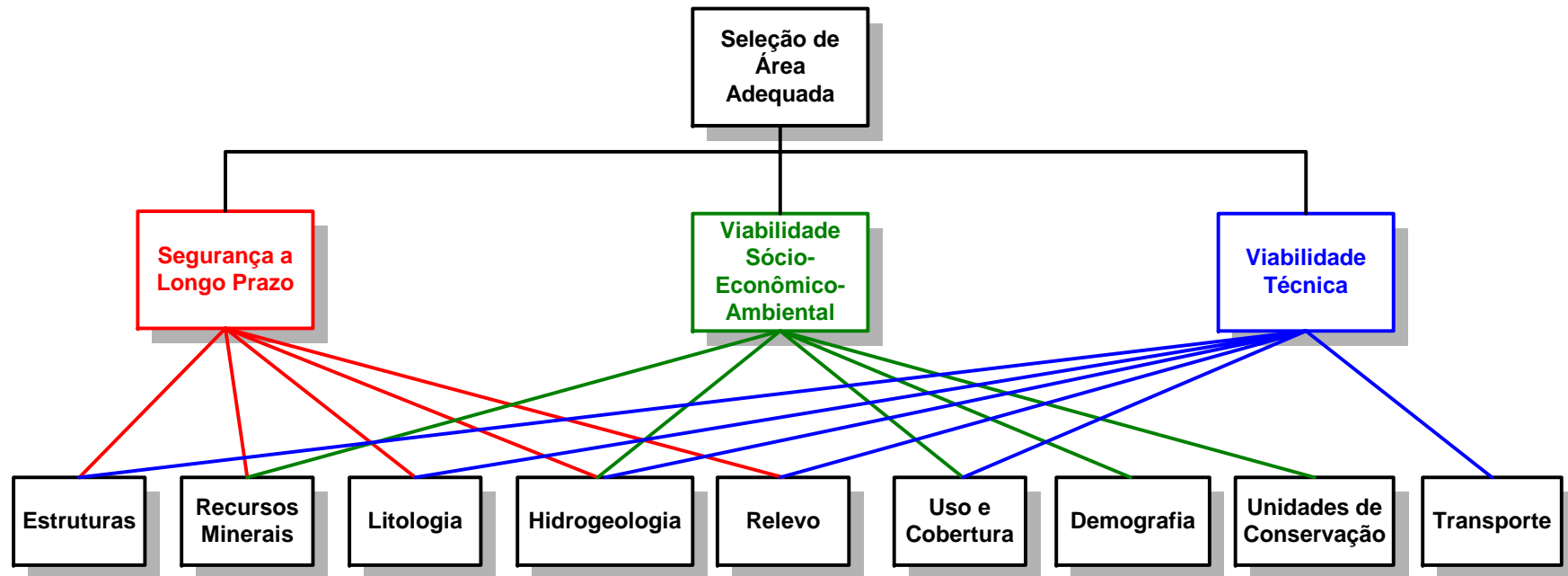


Figura 4.1 – Estrutura Hierárquica

A partir da hierarquização do problema de decisão, o método da comparação par a par consiste de três passos principais, descritos a seguir.

4.2.3.1 Geração da Matriz de Comparação

O método utiliza uma escala com valores de 1 a 9 (Tabela 4.3) para avaliar (relacionar) as preferências entre dois critérios.

Tabela 4.3 – Escala para comparação para a par.

Intensidade da Importância	Definição
1	Igualmente importante
3	Moderadamente mais importante
5	Fortemente mais importante
7	Muito fortemente mais importante
9	Extremamente mais importante
2, 4, 6, 8	Valores Intermediários (não utilizados neste trabalho)

A demonstração de como é construída a matriz de comparação é mais bem feita através da utilização de um exemplo.

Suponhamos que estamos comparando a importância dos atributos relacionados ao objetivo Segurança a Longo Prazo que estão apresentados na Figura 4.1. A primeira comparação a ser feita é entre a importância do atributo estruturas com relação ao atributo Recursos Minerais para o atendimento do objetivo Segurança a Longo Prazo. Suponhamos que o decisor considere que o atributo Estruturas tem forte importância em relação ao atributo Recursos Minerais para o atendimento do objetivo em questão. Desta forma, a célula referente a esta comparação recebe o valor 5. Continuando a análise, suponhamos que com relação ao atributo Litologia, o decisor considere o atributo Estruturas igualmente importante. A célula referente a esta comparação recebe então o valor 1. Já entre o atributo Estruturas e o atributo Hidrogeologia, o decisor considera que Estruturas é moderadamente importante com relação à Hidrogeologia e então a célula recebe o valor 3. Por último, nesta linha, é feita a comparação do atributo Estruturas com o atributo Relevo e o decisor considera que o Estruturas tem uma importância muito forte com relação ao Relevo para o atendimento do objetivo proposto. A célula então recebe o valor 7. A análise é feita então para cada linha da matriz de comparação. A diagonal que segue do canto superior esquerdo ao canto inferior direito da matriz é preenchida com o valor 1, representando que quando um atributo é comparado com ele mesmo a importância é a mesma (igual importância). Por último, a partir das primeiras comparações, supondo que a matriz de comparação é

recíproca, preenche-se o restante da matriz da seguinte maneira: se o critério Estruturas é preferido 5 vezes em relação ao critério Recursos Minerais, pode-se concluir que o critério Recursos Minerais deve receber o valor 1/5 com relação ao critério Estruturas. Os resultados deste exemplo encontram-se apresentados na Tabela 4.4 a seguir.

Tabela 4.4 – Matriz de comparação dos critérios de avaliação.

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo
Estruturas	1	5	1	3	7
Rec. Min.	1/5	1	1/5	1/5	3
Litologia	1	5	1	1	5
Hidrogeo	1/3	5	1	1	5
Relevo	1/7	1/3	1/5	1/5	1

4.2.3.2 Cálculo dos Pesos dos Critérios

De posse da matriz de comparação completa, inicia-se a etapa do cálculo dos pesos. Esta etapa envolve os seguintes passos: (I) soma dos valores em cada coluna da matriz de comparação; (II) divisão de cada elemento na coluna da matriz pelo total da sua coluna (a matriz resultante é denominada de matriz de comparação normalizada); e (III) calcular a média dos elementos em cada linha da matriz normalizada, ou seja, dividir a soma dos valores normalizados de cada linha pelo número de critérios. Estas médias fornecem uma estimativa dos pesos relativos dos critérios que foram comparados. Usando este método, os pesos são interpretados como a média de todas as possíveis formas de comparação dos critérios.

Tabela 4.5 – Passo I (Soma dos valores das colunas)

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo
Estruturas	1	5	1	3	7
Rec. Min.	1/5	1	1/5	1/5	3
Litologia	1	5	1	1	5
Hidrogeo	1/3	5	1	1	5
Relevo	1/7	1/3	1/5	1/5	1
Soma	2,676	16,333	3,400	5,400	21,000

Tabela 4.6 – Passo II (Matriz de Comparação Normalizada)

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo
Estruturas	0,374	0,306	0,294	0,556	0,333
Rec. Min.	0,075	0,061	0,059	0,037	0,143
Litologia	0,374	0,306	0,294	0,185	0,238
Hidrogeo	0,125	0,306	0,294	0,185	0,238
Relevo	0,053	0,020	0,059	0,037	0,048
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela 4.7 – Passo III (Cálculo dos pesos)

	Cálculo dos Pesos (Média)	Pesos
Estruturas	$(0,374+0,306+0,294+0,556+0,333)/5$	0,373
Rec. Min	$(0,075+0,061+0,059+0,03+0,143)/5$	0,075
Litologia	$(0,374+0,306+0,294+0,185+0,238)/5$	0,279
Hidrogeo	$(0,125+0,306+0,294+0,185+0,238)/5$	0,230
Relevo	$(0,053+0,020+0,059+0,037+0,048)/5$	0,043
Soma		1,000

4.2.3.3 Estimativa da Consistência das Relações

Neste passo determina-se se as comparações são consistentes. Isto envolve os seguintes passos: (IV) determinar o vetor soma ponderado através da multiplicação do peso do primeiro critério pelos valores da primeira coluna da matriz original. Depois, multiplica-se o peso do segundo critério pelos valores da segunda coluna da matriz original, e assim por diante. Por último, somam-se os valores das linhas e (V) determina-se o vetor de consistência pela divisão do vetor soma ponderado pelos pesos dos critérios determinados anteriormente.

Tabela 4.8 – Passo IV (Cálculo do vetor soma ponderado)

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Resultado
Estruturas	$(1) \cdot (0,373)$	$(5) \cdot (0,075)$	$(1) \cdot (0,279)$	$(3) \cdot (0,230)$	$(7) \cdot (0,043)$	2,020
Rec. Min	$(1/5) \cdot (0,373)$	$(1) \cdot (0,075)$	$(1/5) \cdot (0,279)$	$(1/5) \cdot (0,230)$	$(3) \cdot (0,043)$	0,382
Litologia	$(1) \cdot (0,373)$	$(5) \cdot (0,075)$	$(1) \cdot (0,279)$	$(1) \cdot (0,230)$	$(5) \cdot (0,043)$	1,474
Hidrogeo	$(1/3) \cdot (0,373)$	$(5) \cdot (0,075)$	$(1) \cdot (0,279)$	$(1) \cdot (0,230)$	$(5) \cdot (0,043)$	1,225
Relevo	$(1/7) \cdot (0,373)$	$(1/3) \cdot (0,075)$	$(1/5) \cdot (0,279)$	$(1/5) \cdot (0,230)$	$(1) \cdot (0,043)$	0,223

Tabela 4.9 – Passo V (Cálculo do vetor de consistência)

Resultado	Consistência
$2,020/(0,373)$	5,421
$0,382/(0,075)$	5,093
$1,474/(0,279)$	5,273
$1,225/(0,230)$	5,336
$0,223/(0,043)$	5,143

Com o vetor de consistência calculado, necessita-se ainda calcular dois termos: λ e o Índice de Consistência (IC). O valor de λ é o valor médio do vetor de consistência, ou seja,

$$\lambda = \frac{5,421 + 5,093 + 5,273 + 5,336 + 5,143}{5} = 5,253 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

O cálculo do IC é baseado na observação de que λ é sempre maior ou igual ao número de critérios considerados (n) para matrizes recíprocas positivas, e $\lambda = n$ se a matriz de comparação é uma matriz consistente. Desta forma, $\lambda - n$ pode ser considerada como uma medida do grau de inconsistência. Esta medida pode ser normalizada da seguinte maneira:

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{5,253 - 5}{5 - 1} = \frac{0,253}{4} = 0,063 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

O termo IC, denominado Índice de Consistência, fornece uma medida da consistência inicial. Após a obtenção do IC, deve-se calcular a Relação de Consistência (RC), que é definida por:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde IR é o índice randômico, ou seja, o índice de consistência de uma matriz gerado randomicamente. Pode-se mostrar que o IR depende do número de elementos comparados, conforme apresentado na Tabela 4.10 a seguir.

Tabela 4.10 – Índices de Consistência Randômica para $n=1, 2, \dots, 15$

n	IR	n	IR	n	IR
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

A relação de consistência é designada da seguinte maneira:

$RC < 0,10$ – Consistente

$RC \geq 0,10$ – Inconsistente

Nos casos de inconsistência, deve-se reconsiderar e revisar os valores originais da matriz de comparação.

4.2.4 Agregação do SIG a Análise Multicritério - Regras de Decisão

De posse dos critérios de avaliação, das alternativas viáveis e das preferências dos decisores, devem-se combinar estes elementos através das regras de decisão. As

regras de decisão fornecem a base para a ordenação das alternativas de decisão e para a escolha da alternativa mais adequada.

Uma regra de decisão é um procedimento que permite a ordenação das alternativas. É a regra de decisão que dita a melhor forma de ordenar as alternativas ou de decidir que alternativa é preferida em relação à outra. Ela integra os dados e as informações sobre as alternativas e preferência dos decisores em uma avaliação global.

O objetivo da análise de decisão multiatributo é escolher a alternativa preferida (melhor) ou ordenar alternativas em ordem decrescente de preferência. Existem numerosas regras de decisão que podem ser utilizadas para tratar este tipo de problema. As regras de decisão aditivas são as mais conhecidas e amplamente utilizadas no processo de decisão utilizando o SIG. Este trabalho utilizou para este fim o método da Análise Hierárquica de Decisão (AHP).

O método de análise hierárquica foi introduzido por Thomas Saaty em 1980 e busca reproduzir o que parece ser um método natural de funcionamento da mente humana (LOZANO, 2006), ou seja, ao se deparar com um grande número de elementos controláveis ou não, envolvidos em uma situação de decisão complexa, junta-os em grupos segundo propriedades comuns. Desta forma, o método AHP está baseado em três princípios: (1) decomposição, que requer que o problema de decisão seja decomposto em uma hierarquia que capture os elementos essenciais do problema; (2) julgamentos comparativos, que requerem a avaliação de comparações par a par (conforme a seção 4.2.3) dos elementos dentro de um dado nível da estrutura hierárquica e, por último, (3) síntese das prioridades, que considera cada uma das prioridades dos vários níveis hierárquicos e constrói um conjunto global de prioridades para os elementos no nível mais baixo da hierarquia (isto é, as alternativas). A seguir, serão apresentados os três passos principais do método AHP.

4.2.4.1 Desenvolvimento da Hierarquia

O primeiro passo no procedimento AHP é a decomposição do problema de decisão em uma hierarquia que consiste dos elementos mais importantes do problema de decisão. Nesta hierarquia, o nível no topo é a meta (objetivo final) do problema de decisão. A hierarquia segue então do geral para o mais específico até que o nível dos atributos é alcançado. Este é o nível a partir do qual as alternativas de decisão (que estão no nível mais baixo da hierarquia) são avaliadas. Cada nível deve estar ligado ao seu nível anterior. De um modo geral, uma estrutura hierárquica consiste de quatro níveis,

conforme a Figura 4.1: meta, objetivos, atributos e alternativas. As alternativas, no caso do processo de decisão espacial baseado em SIG, estão representadas em um banco de dados SIG. Cada Plano de Informação contém os valores dos atributos para cada uma das alternativas, e cada alternativa (célula ou polígono) está relacionada aos elementos do nível acima na hierarquia (os atributos). Este conceito de atributo relaciona o método AHP aos procedimentos baseados em SIG.

4.2.4.2 Comparação dos Elementos de Decisão

Comparações par a par são o modo básico de medida empregado no procedimento AHP. Este procedimento reduz em grande parte a complexidade conceitual da tomada de decisão, desde que somente dois componentes são considerados por vez. Conforme visto na seção 4.2.3, o processo envolve três etapas: o desenvolvimento de uma matriz de comparação para cada nível da hierarquia, o cálculo dos pesos para cada elemento da hierarquia e, por último, a estimativa da consistência das relações (comparações). Uma das suposições fundamentais do método AHP é que os decisores são inconsistentes em seus julgamentos de valor com relação aos critérios de decisão e alternativas. Desta forma, o método AHP emprega uma medida desta inconsistência que pode ajudar o decisor a aprender mais sobre a decisão em questão e sobre suas próprias tendências e inconsistências.

4.2.4.3 Construção do Índice de Adequabilidade

A última etapa do método é agregar os pesos dos diversos níveis obtidos na etapa anterior para produzir os pesos compostos. Isto é feito por uma seqüência de operações com as matrizes que representam os Planos de Informação envolvidos na análise e os pesos calculados através de comparações par a par.

No Processo de Análise Hierárquica (AHP) espacial, o Índice de Adequabilidade é construído utilizando-se uma Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination* – WLC) (MALCZEWSKI, 1999; MALCZEWSKI, 2000).

Cada atributo analisado está representado em um Plano de Informação (*layer*). Em termos matemáticos, estes Planos de Informação são representados por matrizes quadradas M_{ij} , de ordem m .

Os Planos de Informação que representam os diversos critérios envolvidos no problema que se quer analisar (Segurança a Longo Prazo, Viabilidade Sócio-

Econômica-Ambiental e Viabilidade Técnica) são representados matematicamente por uma matriz quadrada R_{ij} , de ordem m

A obtenção das matrizes R_{ij} é feita através de uma combinação linear entre as matrizes M_{ij} que representam os atributos relacionados ao critério em questão e os pesos w_k destes respectivos atributos, desta forma,

$$R_{ij} = \sum_{l=1}^l M_{ij}^l w_k^l, \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde l representa o número de Planos de Informação (atributos) envolvidos na análise.

Desta forma temos:

Para o critério Segurança a Longo Prazo

$$R_{ij}^1 = M_{ij}^1 w_k^1 + M_{ij}^2 w_k^2 + M_{ij}^3 w_k^3 + M_{ij}^4 w_k^4 + M_{ij}^5 w_k^5 \quad (\text{Eq. 4.7})$$

onde os atributos relacionados a este critério são:

1. Estruturas
2. Recursos Minerais
3. Litologia
4. Hidrogeologia
5. Relevo (declividade)

Para o critério Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental

$$R_{ij}^2 = M_{ij}^1 w_k^1 + M_{ij}^2 w_k^2 + M_{ij}^3 w_k^3 \quad (\text{Eq. 4.8})$$

1. Recursos Minerais
2. Uso e Cobertura do Solo
3. Hidrogeologia

E, por último, para o critério Viabilidade Técnica

$$R_{ij}^3 = M_{ij}^1 w_k^1 + M_{ij}^2 w_k^2 + M_{ij}^3 w_k^3 + M_{ij}^4 w_k^4 + M_{ij}^5 w_k^5 + M_{ij}^6 w_k^6 \quad (\text{Eq. 4.9})$$

1. Estruturas
2. Litologia
3. Transporte
4. Uso e Cobertura do Solo
5. Hidrogeologia
6. Relevo (declividade)

A matriz que representa o Índice de Adequabilidade A_{ij} , é obtida também a partir de uma combinação linear entre as matrizes R_{ij} obtidas na etapa anterior e que representam os critérios envolvidos na análise e seus respectivos pesos.

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^l R_{ij}^l \times w_k^l \quad (\text{Eq. 4.10})$$



onde l varia de 1 a 3, representando as matrizes Segurança a Longo Prazo, Viabilidade Sócio-Econômica Ambiental e Viabilidade Técnica obtidas na etapa anterior. Desta forma, temos:

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^3 R_{ij}^1 \times w_k^1 + R_{ij}^2 \times w_k^2 + R_{ij}^3 \times w_k^3 \quad (\text{Eq. 4.11})$$

4.2.4.4 Recomendação

A recomendação das áreas mais adequadas para futuros estudos é feita com base na classificação das alternativas. São recomendadas as alternativas que obtiveram melhor classificação com relação aos critérios analisados. A classificação final das alternativas quanto a sua adequabilidade segue as seguintes classes apresentadas na Tabela 4.11:

Tabela 4.11 – Classes de Adequabilidade

1	Muito Baixa	
2	Baixa	
3	Média	
4	Alta	
5	Muito Alta	
AI	Áreas Inadequadas	

5 Estudo de Caso

5.1 Considerações Iniciais.

O objetivo deste trabalho é propor um método para analisar e selecionar locais que apresentem determinadas características que os tornem potencialmente adequados a hospedar um depósito geológico para os rejeitos radioativos de alto nível ou para o combustível nuclear usado.

Para efeito deste trabalho, o combustível nuclear usado é considerado rejeito, devendo ser armazenado definitivamente, de modo a garantir a segurança dos seres humanos e do meio ambiente.

Na definição da região a ser analisada, levaram-se em consideração as seguintes preocupações:

1. Para se analisar uma área como o Brasil (com cerca de 8.547.403,5 km²), necessitaríamos trabalhar com escalas entre 1:1.000.000 e 1:5.000.000. Escalas desta ordem trazem o problema de ser pouco detalhadas, pois quanto maior é o espaço representado, mais genéricas são as informações. Isso nos mostra que houve uma grande redução na representação do real, ou seja, perdeu-se qualidade. Então, para um dado fator de seleção, podem existir regiões que parecem ser desfavoráveis em escala nacional, mas análises em uma escala maior (p.ex. regional ou local) podem mostrar áreas de interesse nestas regiões. O inverso também é verdadeiro (SKB, 1995). A Figura 5.1 abaixo exemplifica o problema.

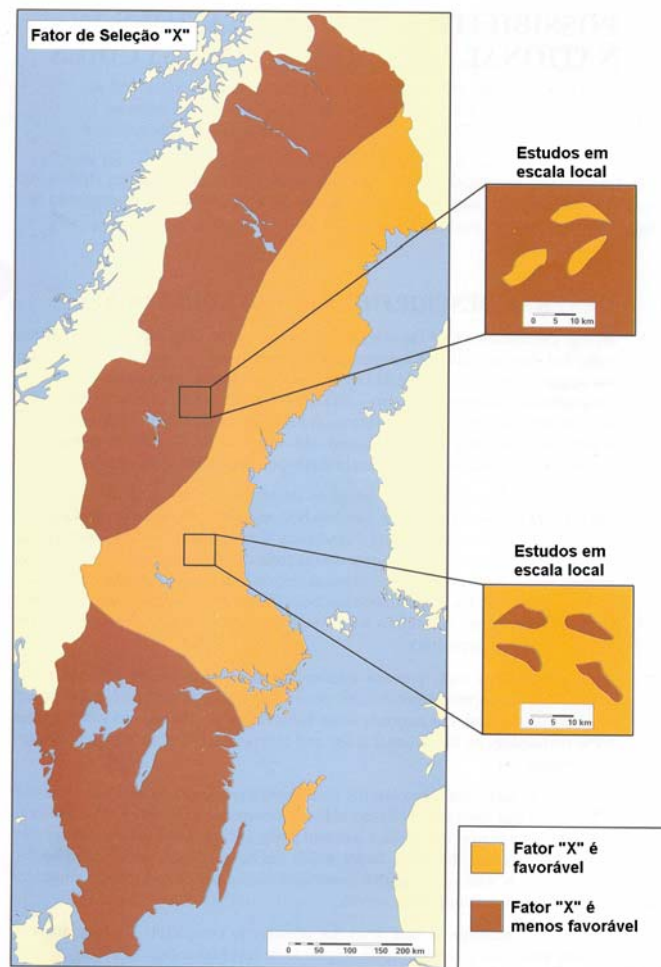


Figura 5.1: Exemplos que ilustram que um fator “X” pode ser favorável em certas regiões e menos favorável em outras, dependendo da escala utilizada. (SKB, 1995).

2. Um fator considerado limitante são as escalas em que os dados necessários para o estudo estavam disponíveis, ou seja, quanto menor a área a ser analisada, maior o detalhamento dos estudos realizados e, conseqüentemente, melhor a qualidade dos dados. Então, para áreas menores podem ser obtidos dados em escalas maiores, que são mais detalhadas, representando de maneira mais adequada os parâmetros e critérios que se quer analisar.

Sendo assim, para efeito deste trabalho, consideraremos como região de interesse a região Sudeste do Brasil, mais precisamente o Estado do Rio de Janeiro.

Pretende-se também, ao se iniciar a análise pelo Rio de Janeiro, considerar a questão que as usinas estão situadas no Estado e com isso, minimizar questões como o transporte deste material e a resistência de outros Estados. Além disso, esta escolha facilita a obtenção dos dados a serem utilizados, já que este trabalho se desenvolve em

uma universidade localizada no próprio Estado e, sendo assim, próxima dos principais centros de pesquisa e órgãos públicos responsáveis pela obtenção, tratamento e gerenciamento destes dados.

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver um método que poderá ser aplicado a qualquer processo de localização de instalações variando apenas os critérios envolvidos na análise e os julgamentos de valor dos especialistas (pesos) em relação a estes critérios, pode-se posteriormente analisar qualquer região do país. Desta forma, a escolha por limitar a área de busca não compromete a análise realizada.

5.2 Descrição da Área de Estudo.

O Rio de Janeiro situa-se na porção leste da região Sudeste (latitude 22° 55'S e longitude 34° 53'W), tendo como limites os estados de Minas Gerais (norte e noroeste), Espírito Santo (nordeste) e São Paulo (sudoeste), como também o Oceano Atlântico (leste e sul). Ocupa uma área de 43.696,054 km².

Quanto ao relevo, existem no Estado duas unidades: a Baixada Fluminense, que corresponde às terras situadas em geral abaixo de 200m de altitude, e o Planalto ou Serra Fluminense, acima de 200 metros.

A Baixada Fluminense acompanha todo o litoral e ocupa cerca de metade da superfície do Estado. Apresenta largura variável, bastante estreita entre as baías da Ilha Grande e de Sepetiba, alargando-se progressivamente no sentido leste, até o rio Macacu. Nesse trecho, no município da capital, erguem-se os maciços da Tijuca e da Pedra Branca, que atingem altitudes um pouco superiores a 1.000 metros. Da baía da Guanabara até Cabo Frio, a baixada volta a estreitar-se uma sucessão de pequenas elevações, de 200 a 500 metros de altura, os chamados maciços litorâneos fluminenses. A partir de Cabo Frio, alarga-se novamente, alcançando suas extensões máximas no delta do rio Paraíba do Sul.

O Planalto ou Serra Fluminense ocupa o interior do Estado, por isso está localizado entre a Baixada Fluminense, ao sul e o vale do rio Paraíba do Sul. A elevação da Serra do Mar, ao norte da baixada, forma o seu rebordo. A Serra da Mantiqueira cobre o noroeste do Estado, ao norte do vale do rio Paraíba do Sul, onde é paralela à Serra do Mar. O ponto mais alto do Rio de Janeiro, pico das Agulhas Negras (2.787 metros) localiza-se no maciço de Itatiaia, que se ergue da serra da Mantiqueira. Para o interior, o planalto vai diminuindo de altitude, até chegar ao vale do rio Paraíba do Sul,

onde a média cai para 250 metros. A nordeste observa-se uma série de colinas de baixas altitudes, conhecida como “mar de morros”.

Quanto à litologia e à hidrogeologia, fatores que podem ser considerados relacionados para o estudo em questão, o Estado do Rio de Janeiro é constituído predominantemente (cerca de 80%) por rochas cristalinas, sendo o restante do Estado (cerca de 20%) coberto pelas planícies litorâneas e bacias sedimentares.

As áreas sedimentares do Estado do Rio de Janeiro podem ser divididas em:

Sedimentos Quaternários (recentes): representados por lamas, turfa, areias, cascalhos e conglomerados depositados entre o presente e 2 milhões de anos atrás. Esses sedimentos se concentram principalmente próximo ao litoral, nos vales dos rios, nas bordas das lagoas e nos brejos.

Sedimentos Terciários: foram depositados entre 65 e 2 milhões de anos atrás. São rochas sedimentares ou sedimentos inconsolidados, depositados por processos fluviais e marinhos. No Estado são representados principalmente pela Formação Barreiras e pelas bacias sedimentares de Campos, Resende e Itaboraí. Uma bacia sedimentar é uma depressão do terreno onde os sedimentos se acumulam.

Estas bacias são compostas principalmente por areias finas, arenitos, argila e matéria orgânica. São meios bastante porosos, permitindo a infiltração de água e possuindo em seu interior aquíferos livres, confinados e semi-confinados utilizados para abastecimento de localidades próximas. São também em grande parte compostas por sedimentos não-consolidados, o que caracteriza regiões pouco estáveis e que apresentam dificuldades para a construção e operação do repositório.

Já as áreas cristalinas do Estado são compostas principalmente por rochas metamórficas e magmáticas (gnaisses, migmatitos, granitos, rochas alcalinas, entre outras).

As rochas metamórficas são as mais abundantes do Estado. Possuem idades desde 500 milhões de anos até superiores a 2 bilhões de anos. Estas rochas podem ser subdivididas em dois tipos: rochas ortoderivadas, que são formadas a partir do metamorfismo sobre rochas ígneas. As mais comuns no Estado são os chamados ortognaisses, que possuem uma composição semelhante ao granito, mas que mostram uma estrutura planar bem desenvolvida, que os geólogos chamam de foliação. Já as rochas paraderivadas são formadas a partir do metamorfismo das rochas sedimentares. As mais comuns no Estado são os paragnaisses, que possuem minerais como a

sillimanita e a granada (mineral vermelho ou rosa, com brilho de vidro). Os mármore de Cantagalo e Italva também são rochas metassedimentares.

As rochas cristalinas variam grandemente quanto à sua resistência, estabilidade, homogeneidade, composição química, dentre outros fatores, e por isso, nem todas as rochas classificadas desta forma são adequadas à construção de um repositório. Um dos maiores problemas que se apresenta ao considerarmos as rochas cristalinas é a presença de falhas e/ou fraturas, que formam zonas de fraqueza na rocha e podem representar caminhos de migração de radionuclídeos.

Os aquíferos formados nestas rochas são denominados de aquíferos fissurais, justamente por se formarem em zonas fissuradas (principalmente fraturas). Existe uma hierarquia quanto à resistência e conseqüentemente quanto à ocorrência de água subterrânea em rochas cristalinas, que leva em conta a presença de descontinuidades tais como bandeamento/xistosidade, facilidade de intemperização, maior suscetibilidade a fraturamento, grau metamórfico etc. Assim quartzitos e mármore são mais favoráveis que granitos e granulitos e assim por diante. Estas considerações foram levadas em conta ao se classificar a litologia do Estado quanto à sua adequabilidade para hospedar o repositório, conforme apresentado na Tabela 5.3.

Quanto à hidrologia, o rio Paraíba do Sul é o principal rio do Estado. Nasce em São Paulo e desemboca no oceano Atlântico. Além do Paraíba do Sul, destacam-se os rios Itabapoana, que marca fronteira com o Espírito Santo, o Macabu, que deságua na lagoa Feia, o Macaé, o São João, o Majé e o Guandu (principal fonte de abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro).

O litoral fluminense é pontilhado por numerosas lagoas, antigas baías fechadas por cordões de areia. As mais importantes são as lagoas Feia, a maior do Estado, Araruama, Saquarema, Maricá, Marapendi, Jacarepaguá e Rodrigo de Freitas, as três últimas no município do Rio de Janeiro.

Quanto aos Recursos Minerais, o Estado do Rio de Janeiro caracteriza-se pela disponibilidade de recursos minerais não-metálicos, especialmente material para construção civil e água mineral. Destaca-se, também, pelas grandes reservas de óleo e gás natural da Bacia de Campos, responsável pela maior produção de petróleo do país. No que diz respeito aos recursos minerais metálicos, destacam-se as areias portadoras de rutilo, ilmenita e zirconita.

No que diz respeito à questão ambiental, o Rio de Janeiro está totalmente inserido no bioma da Mata Atlântica. Estima-se que, anteriormente ao descobrimento, o

Estado do Rio de Janeiro possuía uma área florestada que cobria cerca de 97% do território. Em 500 anos, os diferentes ciclos econômicos, baseados essencialmente na exploração de recursos naturais, acarretaram enorme perda da área de Mata Atlântica. Hoje, esta se resume a fragmentos isolados, que, somados, perfazem 7.346,29 km², cerca de 17,10% da cobertura original (42.940 km²), o que corresponde a 16,73% dos 43.909,7 km² de superfície do Estado (CASTRO *et al*, 2001).

Do total remanescente, cerca de 5.700 km² estão protegidos legalmente pela criação de 66 Unidades de Conservação, que protegem mais de 10% do território do Estado. As Unidades de Conservação estaduais abrangem uma área de, aproximadamente, 1.400 km² e são administradas pelo Instituto Estadual do Ambiente – INEA, vinculado à Secretaria de Estado do Ambiente – SEA. Já as Unidades de Conservação federais se estendem por uma área de 4.300 km², estando todas sob tutela do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA (CASTRO *et al*, 2001).

Diferentes tipos de unidades de conservação estão presentes no Estado do Rio de Janeiro. Distribuídas entre parques, reservas ecológicas, áreas de proteção ambiental, etc., existem cerca de 109, sendo 42 sob gestão federal, 35 sob gestão estadual e 32 sob gestão municipal.

Como já dito, o Estado do Rio de Janeiro está totalmente inserido no bioma da Mata Atlântica. Considerado um dos biomas críticos para a conservação da biodiversidade global, a Mata Atlântica foi declarada Reserva da Biosfera em 1991 (CASTRO *et al*, 2001).

Além das Unidades de Conservação, o Estado do Rio de Janeiro conta com 59 Áreas Naturais Tombadas em nove municípios. Dentre estas destacam-se:

- Área Indígena Guarani-Bracuí, localizada no Parque Nacional da Bocaina, Angra dos Reis;
- Dunas de Cabo Frio, Cabo Frio;
- Morro Dois Irmãos, Rio de Janeiro e,
- Pão de Açúcar, Rio de Janeiro;

Quanto à questão dos transportes, o Estado possui uma ampla malha rodoviária, quase toda ela privatizada, que o liga com os demais estados da região sudeste e o restante do país. O Estado é cortado por três principais rodovias federais, sendo que a BR-101 e a BR-116 cortam o Estado no sentido norte-sul, ligando-o a

Santos, São Paulo, Vitória e Salvador e a BR-040 o liga a Juiz de Fora, Belo Horizonte e Brasília.

De acordo com o Anuário do CIDE (2003), o estado possui cerca de 26.009,96 km de malha rodoviária, dos quais 6.591 km são pavimentados e 16.329,65 km não. Do total pavimentado, 2.451,10 km são estradas federais, 5.822,60 km são estaduais e 17.736,25 km municipais.

A malha ferroviária do Estado, em bitola larga, serve nas ligações dos portos de Sepetiba e Rio de Janeiro e, aos estados de Minas Gerais e São Paulo no transporte de cargas. As concessionárias Ferrovia Centro-Atlântica S.A. – FCA e MRS Logística S.A. são as detentoras das linhas no Estado.

O Estado do Rio de Janeiro possui seis portos e terminais marítimos de grande porte e cinco bases de apoio *offshore*. Seus principais portos são: Rio de Janeiro, na Região Metropolitana, Sepetiba e Angra dos Reis na Região da Costa Verde, Arraial do Cabo na Região das Baixadas Litorâneas e Macaé – exclusivo da Petrobrás -, na Região Norte.

5.3 Critérios de Seleção

Os critérios de seleção utilizados neste trabalho foram selecionados através de uma ampla revisão da literatura internacional relacionada à seleção de locais para a construção de um repositório geológico. Após esta revisão, buscou-se informações na literatura nacional a respeito de critérios semelhantes, como a legislação nacional pertinente, normas técnicas e trabalhos relacionados ao planejamento urbano e seleção de locais para a construção de aterros sanitários (CUNHA e PARZANESE, 1993; SOUZA e ZUQUETTE, 1993; ZUQUETTE *et al*, 1993; LEITE e ZUQUETTE, 1996; GUIMARÃES, 2000) de forma a se obter valores limites que pudessem ser tomados como base para o desenvolvimento dos critérios e valores a serem utilizados neste trabalho. A literatura utilizada encontra-se listada na seção 4.2. Por último foram consultados especialistas, com o objetivo de melhor definir as classes de adequabilidade e os critérios importantes que poderiam ser considerados neste estudo e para os quais havia dados disponíveis para a análise.

Os critérios de seleção utilizados cobrem três requisitos importantes relacionados à adequabilidade de uma área para a construção de um repositório, segundo as diretrizes de segurança e proteção radiológica (IAEA, 1994b, SKB, 1995): segurança, viabilidade sócio-econômica-ambiental e viabilidade técnica.

- **Segurança** – são os critérios de seleção importantes para a segurança a longo prazo do repositório;
- **Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental** – são os critérios de seleção importantes com relação ao impacto ambiental e social do repositório e,
- **Viabilidade Técnica** – são os critérios de seleção importantes com relação a construção, desempenho e operação segura do repositório.

A área do Estado do Rio de Janeiro será analisada em busca de determinados atributos que medirão o grau de atendimento dos critérios de seleção. Para cada grupo de critérios de seleção foram definidos atributos, que têm a capacidade de medir (indicar) a adequabilidade da área em relação ao critério de seleção em análise (Figura 4.1). A Tabela 5.1 a seguir apresenta os atributos analisados com relação a cada grupo de critérios de seleção.

Tabela 5.1 – Critérios de seleção e atributos associados.

Segurança a Longo Prazo	Estruturas Recursos Minerais Litologia Hidrogeologia Relevo
Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental	Recursos Minerais Hidrogeologia Uso e Cobertura
Viabilidade Técnica	Estruturas Litologia Hidrogeologia Relevo Uso e Cobertura Transporte

Cada atributo analisado influencia de maneira particular a adequabilidade da área para a construção do repositório. Alguns atributos influenciam mais de um critério e por isso foram analisados mais de uma vez, mas em contextos diferentes. A seguir será feita uma breve descrição de como cada atributo influencia o critério ao qual está relacionado. Para uma descrição mais detalhada, devem ser consultadas as referências citadas na seção 4.2.

5.3.1 Estruturas

Neste trabalho, foram consideradas como estruturas as falhas (zonas de cisalhamento) e as fraturas. Na questão da Segurança a Longo Prazo, a importância destas estruturas diz respeito à manutenção da estabilidade do local onde o repositório está construído pelo período de tempo necessário para garantir a segurança dos seres humanos e do meio ambiente. Estas estruturas representam zonas de fraqueza na rocha hospedeira onde, ao longo de milhares de anos, podem surgir novas falhas e/ou fraturas, deixando o repositório vulnerável. Além disso, as estruturas formam caminhos por onde a água subterrânea passa e, desta forma, caso ocorra alguma falha nas barreiras de proteção do material radioativo, estas estruturas poderão fornecer um caminho de migração para os radionuclídeos permitindo que eles acabem por alcançar a biosfera.

Quanto à questão da Viabilidade Técnica, a presença de estruturas formando zonas de fraqueza afetam a construção do repositório, tornando arriscado o estabelecimento de obras de infraestrutura, principalmente subterrâneas, no local.

5.3.2 Recursos Minerais

No que diz respeito à Segurança a Longo Prazo, o maior problema da presença de recursos minerais exploráveis na região do repositório é a ocorrência, no futuro, de intrusão humana inadvertida (não intencional) no repositório devido à tentativa de exploração destes recursos. Este tipo de intrusão pode acarretar efeitos adversos ao isolamento dos rejeitos e provocar vazamentos e contaminações tanto dos seres humanos quanto do meio ambiente.

Quanto à questão da Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental, a principal consideração feita é quanto à explorabilidade do recurso mineral localizado em uma região cogitada para hospedar o repositório. Como o repositório é uma estrutura subterrânea e que não deve ser perturbada, a exploração do recurso mineral local é inviabilizada com a construção do repositório.

5.3.3 Litologia

As rochas ideais para serem utilizadas como um repositório geológico devem apresentar as seguintes características (ROXBURGH, 1987):

1. Propriedades hidrogeológicas que minimizem a exposição do material armazenado ao movimento da água subterrânea;

2. Propriedades geoquímicas e mineralógicas que possibilitem a retenção e/ou o retardamento da migração dos radionuclídeos liberados no caso de falha das barreiras de engenharia antes que estes alcancem a biosfera;
3. Propriedades termoquímicas, que possibilitem que a rocha suporte a carga térmica oriunda do material depositado sem sofrer danos estruturais que afetem sua capacidade de isolamento do material depositado;
4. Resistência estrutural e estabilidade suficientes para garantir que a integridade física do repositório não será comprometida durante o período operacional.

Estas características cobrem tanto o critério de Segurança a Longo Prazo (1, 2 e 3) quanto o Critério de Viabilidade Técnica (4).

Diversos tipos de rocha apresentam estas características em maior ou menor grau e, desta forma, os estudos internacionais consideram vários tipos de rocha como adequadas à disposição geológica conforme pode ser observado nas referências IAEA, (1977), IAEA, (2003a), ROXBURGH, (1987), SKB, (1995), SKB, (2000a) e AKEND, (2002).

5.3.4 Hidrogeologia

O atributo Hidrogeologia está em grande parte relacionado ao atributo Estruturas. O principal problema para a Segurança a Longo Prazo associado à presença de água subterrânea é o transporte de radionuclídeos presentes no material armazenado até a biosfera. Um outro problema a ser considerado é que a presença de água subterrânea pode afetar de maneira negativa os materiais constituintes das barreiras de engenharia provocando assim sua falha e conseqüente liberação de radionuclídeos.

Quanto ao critério Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental, a principal consideração é a proximidade de aquíferos utilizados para o abastecimento do local do repositório. Isto deve-se à possibilidade, no caso de falha das barreiras de engenharia, da liberação de radionuclídeos e conseqüente contaminação destes aquíferos e dos seres humanos que os utilizam.

Por último, quanto ao critério Viabilidade Técnica, a presença de água subterrânea na região do repositório torna difícil a construção do repositório, principalmente devido à preocupação de, durante a perfuração, ocorrer o transpasse de

um lençol freático ou de um aquífero e com isso formar um caminho para que esta água chegue ao repositório.

5.3.5 Relevô

O atributo Relevô, funciona para a Segurança a Longo Prazo como um indicativo das condições sub-superficiais. Relevos planos tendem a ser menos perturbados e, conseqüentemente apresentarem menos estruturas, do que relevos mais acidentados que sofreram ação de fatores endógenos (internos) como, por exemplo, tectonismo, o que pode acarretar o surgimento de fraturas nas rochas afetadas.

Quanto à Viabilidade Técnica, relevos acidentados dificultam não só o acesso ao local do repositório como também a sua construção, podendo, com o decorrer do tempo, se mostrar instáveis e sujeitos à ocorrência de movimentos de massa causados pelas obras de instalação do repositório.

5.3.6 Uso e Cobertura do Solo

O atributo Uso e Cobertura do Solo é importante do ponto de vista da Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental, pois deve-se considerar como o uso econômico, atual ou planejado, de determinadas parcelas do solo poderá ser afetado pela construção do repositório.

Quanto ao critério Viabilidade Técnica, a principal preocupação é a consideração de áreas que dificultam ou mesmo inviabilizam as obras para implantação do repositório, como por exemplo, áreas de dunas, restingas, manguezais, dentre outras.

5.3.7 Transporte

O atributo Transporte é considerado quando se analisa o critério Viabilidade Técnica. Isto porque, a ausência de vias de transporte até o local onde se pretende construir o repositório dificulta ou mesmo inviabiliza a construção do mesmo, pois não se consegue chegar com materiais nem mão-de-obra para a construção. Uma outra preocupação é que a necessidade de construir vias de acesso ao local pode tornar inviável, do ponto de vista econômico a construção de um repositório em um dado local.

Por último, deve-se levar em consideração que após a construção, durante o período operacional, haverá a necessidade de se transportar, até o repositório, o material radioativo a ser disposto e, para tanto, devem estar previstos aspectos logísticos (evitando-se principalmente o transporte multimodal), de segurança (buscando-se

minimizar a exposição do público a este material e otimizar o atendimento de situações emergenciais no caso de acidentes com os veículos de transporte) e políticas (dificuldades de traslado devido a proibições, leis, etc.).

Além dos atributos citados, mais dois atributos foram considerados na análise apenas como critérios de exclusão, são eles Unidades de Conservação e Demografia.

5.3.8 Unidades de Conservação

O Estado do Rio de Janeiro possui, como descrito na seção 5.2, mais de 10% de seu território protegido por Unidades de Conservação. Estas Unidades têm como objetivo proteger remanescentes de Mata Atlântica, espécies endêmicas do Estado ou ameaçadas de extinção, recursos hídricos, dentre outros fatores importantes para a proteção e conservação do meio ambiente. Desta forma são áreas extremamente importantes e sensíveis do ponto de vista ambiental, protegidas por lei e que não devem ser perturbadas ou afetadas adversamente por obras de infraestrutura.

Para efeito da aplicação da metodologia, consideram-se estas áreas excluídas do processo de seleção. Apenas no caso de não serem encontradas áreas adequadas após uma primeira varredura, pode-se fazer uma ressalva, incluindo-se as áreas de Uso Sustentável na análise e efetuando-se nova varredura.

5.3.9 Demografia – Áreas Urbanas

O atributo Demografia foi considerado na análise de forma a minimizar os riscos para os seres humanos. A princípio este atributo seria utilizado com o objetivo de classificar as áreas quanto a sua adequabilidade para hospedar o repositório, mas dada a dificuldade de se obter informações e dados acerca deste atributo, ele pôde ser utilizado apenas como critério de exclusão, visto que se dispunha apenas de dados sobre setores urbanos, ou seja, áreas densamente povoadas, as quais devem ser evitadas devido às dificuldades e riscos de se construir e operar um repositório nestas áreas.

Para a análise dos atributos apresentados na Tabela 5.1, foram utilizados os seguintes dados:

- Mapas de falhas (zonas de cisalhamento) e fraturas do Estado do Rio de Janeiro, na escala 1:500.000, produzidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), no âmbito do Projeto Rio de Janeiro, 2001.

- Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro, na escala 1:500.000, produzido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), no âmbito do Projeto Rio de Janeiro, 2001.
- Tema Litologia do Estado do Rio de Janeiro, na escala 1:500.000, produzido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), no âmbito do Projeto Rio de Janeiro, 2001.
- Unidades de conservação - uso direto (uso sustentável), na escala 1:50.000, produzido pelo Instituto Estadual de Florestas (atual Instituto Estadual do Ambiente – INEA), 2004.
- Unidades de conservação - uso indireto (proteção integral), na escala 1:50.000, produzido pelo Instituto Estadual de Florestas (atual Instituto Estadual do Ambiente – INEA), 2004.
- Mapa Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro, desenvolvido pelo Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM).
- Mapa de Uso e Cobertura do Solo, desenvolvido pela UFRJ, em escala 1:250.000, no âmbito do Projeto de Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Rio de Janeiro, 2008.
- Mapa de Setores Urbanos, desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em escala 1:450.000, no âmbito do Projeto Censo 2000.
- Mapa de Vias do Estado do Rio, extraído das cartas topográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do DSG/EB, em escala 1:50.000.
- Mapa de declividade do Estado do Rio de Janeiro, obtido de dados do SRTM baixados do site da EMBRAPA.

Os dados foram tratados de forma a poder ser utilizados na análise a ser feita. Para tanto, foram todos reprojetados para o Sistema de Coordenadas Datum SIRGAS 2000. Após este primeiro tratamento, foram separados os mapas referentes aos Critérios de Exclusão e os mapas referentes aos Fatores ou Critérios de Classificação. Os dados referentes aos Critérios de Classificação foram padronizados de forma a poder ser combinados na análise. A padronização foi feita utilizando-se um sistema de classes como descrito na seção 4.2.1.1. Todos os critérios foram classificados de acordo com a escala apresentada na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 – Classes utilizadas para padronização dos critérios.

Classificação	Notas
Muito Ruim	1
Ruim	2
Regular	3
Boa	4
Muito Boa	5

A seguir, as Tabelas 5.3 a 5.8 apresentam as classes para cada mapa de critérios de classificação utilizado.

Tabela 5.3 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Litologia.

Litologia (CPRM)	Classificação	Notas
Rochas Sedimentares (Sedimentos Holocênicos e Terciários)	Muito Ruim	1
Rochas Metamórficas (Quartzitos e Mármore)	Ruim	2
Rochas Metamórficas (Gnaisses e Migmatitos)	Regular	3
Rochas Metamórficas (Granitóides e Granulitos)	Boa	4
Rochas Ígneas (Alcalinas, Graníticas e Básicas)	Muito Boa	5

Tabela 5.4 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Uso e Cobertura

Uso e Cobertura (ZEE)	Classificação	Notas
Ocupação Urbana Baixa Densidade, Cordões Arenosos, Dunas e Restingas	Muito Ruim	1
Pastagem em Várzea	Ruim	2
Floresta e Vegetação Secundária em Estágio Inicial	Regular	3
Agricultura (Café, Cana, Cítricos e Coco), Reflorestamento, Pastagem e Solo Exposto	Boa	4
Afloramento Rochoso	Muito Boa	5

Tabela 5.5 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Favorabilidade Hidrogeológica

Favorabilidade Hidrogeológica (CPRM)	Classificação	Notas
Muito Alta	Muito Ruim	1
Alta a Muito Alta	Ruim	2
Mediana	Regular	3
Baixa a Muito Baixa	Boa	4
Desfavorável	Muito Boa	5

Tabela 5.6 – Classes utilizadas na padronização dos dados de Recursos Minerais⁸

Recursos Minerais (MME)	Classificação	Notas
Areia, Brita, Granito, Rocha Ornamental e Argila	Muito Ruim	1
Outros Recursos Minerais	Muito Boa	5

⁸ Esta classificação foi feita levando-se em consideração a exploração dos recursos. Os recursos mais explorados foram pior classificados (1) e os recursos menos explorados foram melhor classificados (5).

Tabela 5.7 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Transportes⁹

Transportes	Classificação	Notas
Estradas Estaduais e Municipais	Ruim	2
Estradas Federais	Muito Boa	5

Tabela 5.8 – Classes utilizadas na padronização do mapa de Declividade

Declividade	Classificação	Notas
Fortemente Ondulado	Muito Ruim	1
Ondulado	Ruim	2
Suavemente Ondulado	Regular	3
Plano	Boa	4

Os mapas gerados para os critérios de classificação encontram-se apresentados no Anexo I.

Quanto aos critérios de exclusão, foram utilizados os seguintes critérios:

- Falhas (zonas de cisalhamento) – *buffer* de 200m
- Fraturas – densidade
- Unidades de Conservação (Proteção Integral e Uso Sustentável)
- Recursos Minerais (Água Mineral) – *buffer* de 1 km
- Uso e Cobertura - áreas úmidas
- Setores Urbanos – áreas urbanas densamente povoadas
- Declividade – acima de 30% (relevo montanhoso)

Os mapas gerados para os critérios de exclusão encontram-se apresentados no Anexo II.

5.4 Atribuição de Pesos

Para a determinação dos pesos dos critérios foi utilizado o Processo de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process – AHP) conforme descrito na seção 4.2.3. Para esta análise foram consultados especialistas nas áreas de conhecimento relevantes para a análise, conforme listado no Anexo III.

Cada especialista analisou quatro tabelas: três relacionadas aos atributos importantes para atender aos critérios Segurança a Longo Prazo, Viabilidade Sócio-

⁹ Esta classificação foi feita levando-se em consideração a dependência de autorização, conforme a legislação estadual ou municipal, para transitar com o material por estradas Estaduais e Municipais.

Econômica-Ambiental e Viabilidade Técnica e uma relacionada ao atendimento da meta do estudo (Seleção de Áreas Adequadas). A seguir, são apresentados os quatro modelos de tabelas (matrizes) utilizadas na aferição da opinião dos especialistas com vistas à atribuição dos pesos.

Tabela 5.9 – Matriz de Comparação relacionada à Segurança a Longo Prazo

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo
Estruturas	1				
Rec. Min		1			
Litologia			1		
Hidrogeo				1	
Relevo					1

Tabela 5.10 – Matriz de Comparação relacionada a Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo
Rec. Min	1		
Uso e Cob		1	
Hidrogeo			1

Tabela 5.11 – Matriz de Comparação relacionada a Viabilidade Técnica

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo
Estruturas	1					
Litologia		1				
Transporte			1			
Uso e Cob				1		
Hidrogeo					1	
Relevo						1

Tabela 5.12 – Matriz de Comparação relacionada a Meta

	Segurança	Sociais	Viabilidade
Segurança	1		
Viabilidade S-E-A		1	
Viabilidade Técnica			1

Feita a coleta das opiniões dos especialistas, fez-se a análise dos dados e calculado o valor dos pesos conforme as seções 4.2.3.1 a 4.2.3.3 deste trabalho. Para a organização dos dados e realização dos cálculos foram elaboradas planilhas de Excel (RAGSDALE, 2004). Ao todo foram consultados oito especialistas e o peso final de cada critério foi obtido através do cálculo da média geométrica dos pesos atribuídos a cada critério pelos oito especialistas (SAATY, 2008).

$$MG_{\bar{P}} = \sqrt[8]{P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5 \times P_6 \times P_7 \times P_8}$$

Como resultado foram obtidos os seguintes pesos para os critérios:

Tabela 5.13 - Segurança a Longo Prazo

Crítérios	Pesos
Estruturas	0,321
Rec. Min	0,062
Litologia	0,200
Hidrogeo	0,255
Relevo	0,096

Tabela 5.14 - Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental

Crítérios	Pesos
Rec. Min	0,262
Uso e Cob	0,154
Hidrogeo	0,432

Tabela 5.15 - Viabilidade Técnica

Crítérios	Pesos
Estruturas	0,301
Litologia	0,182
Transporte	0,044
Uso e Cob	0,079
Hidrogeo	0,174
Relevo	0,108

Tabela 5.16 - Meta

Crítérios	Pesos
Segurança	0,578
Viabilidade Sócio-Econômica-Ambiental	0,224
Viabilidade Técnica	0,110

As tabelas preenchidas e os cálculos realizados encontram-se apresentados no Anexo IV.

5.5 Agregação do SIG à Análise Multicritério

Até este momento, foram produzidos os mapas de critérios classificados (SIG) e foram coletadas as opiniões dos especialistas, as quais foram tratadas para a obtenção dos pesos dos critérios (Análise Multicritério). Nesta etapa é necessário agregar estes dois componentes da Análise de Decisão de modo a obter um resultado final na forma de um Índice de Adequabilidade (conforme apresentado na seção 4.2.4.3).

Este procedimento foi realizado no software de SIG utilizado neste trabalho, o ArcGIS®, utilizando-se uma extensão denominada *Spatial Analyst*. Esta extensão oferece ferramentas para análises e modelagens espaciais abrangentes em modelos raster. Ela permite a obtenção de novas informações a partir de dados existentes, a

análise de relações espaciais, a construção de modelos espaciais, e a execução de operações complexas em raster. O *Spatial Analyst* inclui funções avançadas de álgebra de mapas para combinar múltiplos mapas, realizando análises de adequabilidade, atribuindo pesos, e identificando inter-relações. A álgebra de mapas possibilita a definição de análises geográficas através de expressões algébricas de maneira fácil e eficiente.

Como descrito anteriormente na seção 4.2.4.3, a agregação dos dados espaciais e da opinião dos especialistas é feita através da Combinação Linear Ponderada entre as matrizes que representam os Planos de Informação (dados espaciais) e os pesos calculados através de comparações par a par (opiniões). Isto é feito, aplicando-se no *Spatial Analyst*, com o auxílio da ferramenta *Raster Calculator*, as Equações 4.7 a 4.9 e, após o resultado desta primeira análise, efetua-se a mesma operação, aplicando-se a Equação 4.11. A Figura 5.2 ilustra a utilização desta ferramenta.

Os mapas gerados através deste procedimento e o mapa final que apresenta as áreas classificadas quanto a sua adequabilidade para hospedar o repositório encontram-se apresentados no Anexo V.

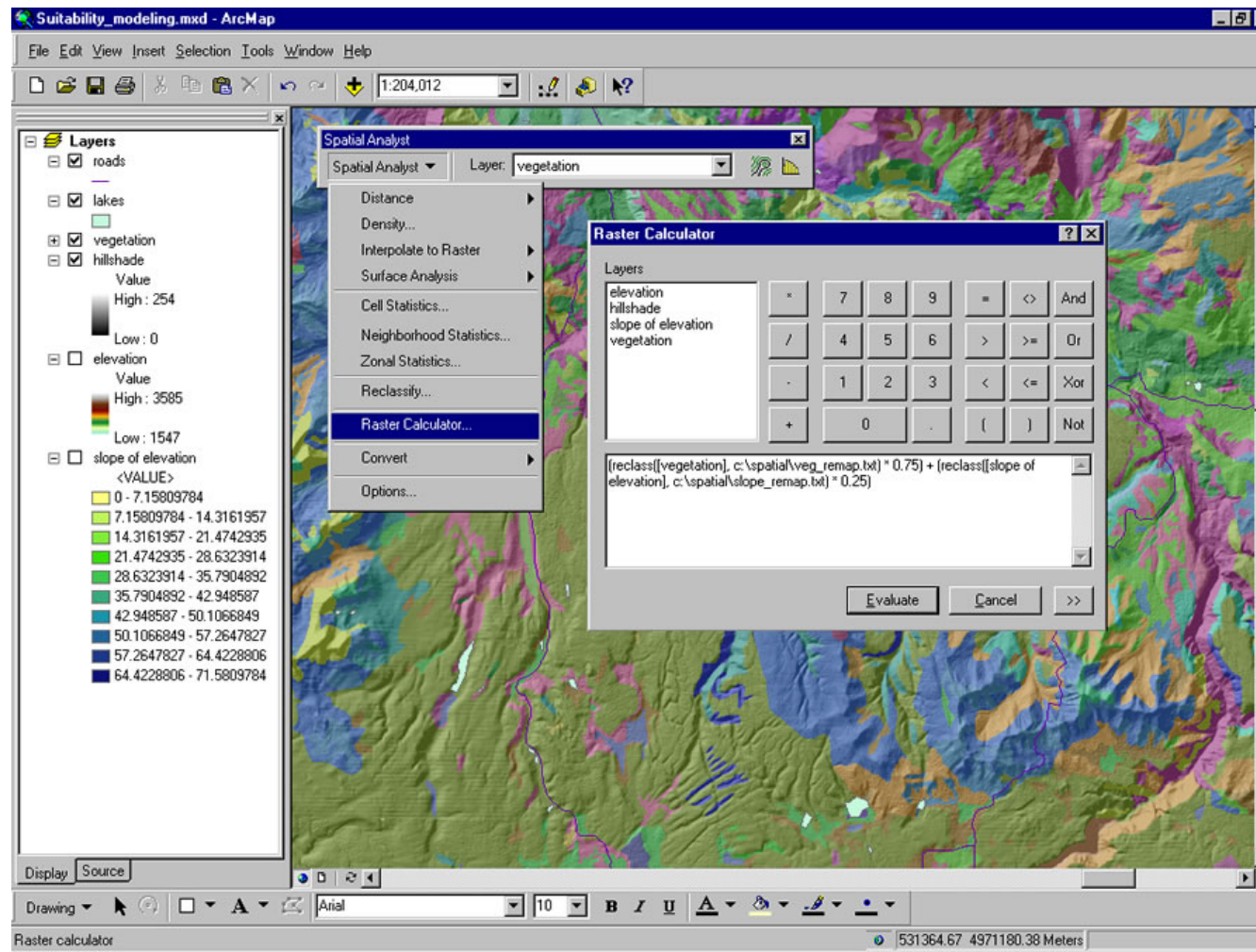


Figura 5.2 - Utilização dos operadores matemáticos e das funções no *Spatial Analyst*

6 Conclusões e Recomendações

6.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver uma metodologia capaz de auxiliar o processo de seleção de um local para construção de um repositório final para os rejeitos radioativos brasileiros, com ênfase no combustível nuclear usado. Decisões deste tipo são altamente complexas, pois devem levar em consideração atributos técnicos (geologia e estruturas, por exemplo) mas também devem considerar atributos não-técnicos, difíceis de mensurar, e que só podem ser avaliados quanto a sua importância no processo de seleção e no resultado final através da opinião dos diversos envolvidos. Muitas abordagens de localização parecem ter falhado no passado, quer porque foram baseadas apenas em critérios técnicos, sem levar em consideração aspectos econômicos, sociais, ambientais e políticos (não-técnicos), quer porque estes aspectos foram considerados sem transparência suficiente.

Tendo em vista este objetivo, pode-se afirmar que a aplicabilidade da metodologia para auxiliar na solução de problemas deste tipo é altamente viável visto que possibilitou uma análise integrada de todos os componentes envolvidos no processo decisório. Os atributos não-técnicos puderam ser integrados à análise utilizando-se pesos, aplicados a informações técnicas. Por exemplo, a maneira como um repositório pode afetar a exploração econômica de um dado recurso mineral foi analisada utilizando-se informações a respeito da localização destes recursos e de sua importância econômica. Locais que apresentavam recursos economicamente exploráveis foram penalizados atribuindo-se um peso menor, de forma a reduzir a sua classificação no resultado final. Critérios técnicos, que influenciam a segurança ou a viabilidade do repositório também foram ponderados, de modo a considerar a importância de cada atributo para o resultado final.

Este tipo de análise foi possível devido à integração entre as ferramentas disponíveis nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para análise espacial e as técnicas de Tomada de Decisão Multicritério. Problemas de localização têm uma forte componente espacial, dado que as alternativas são definidas geograficamente e, os resultados das análises (decisões) dependem de seu arranjo espacial (atributos). O SIG, permite que um grande número de dados espaciais seja adquirido, armazenado, tratado e analisado de maneira ágil, e as técnicas multicritério, por sua vez, possibilitam que sejam agregadas a esta análise as opiniões e preferências dos diversos envolvidos,

permitindo assim a consideração tanto dos critérios técnicos como dos não técnicos. Além disso, a visualização dos resultados das diversas etapas na forma de mapas facilita a compreensão do problema e aumenta a transparência e a rastreabilidade da análise.

O método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) mostrou-se fundamental para a compreensão e tratamento do problema dado que sua principal característica é a capacidade de analisar um problema de tomada de decisão, através da construção de níveis hierárquicos, onde o problema é decomposto em fatores e estes decompostos em um novo nível de fatores e assim por diante até um determinado nível, e organizados hierarquicamente em inúmeros níveis onde os objetivos finais devem estar no topo.

Este processo permite estruturar hierarquicamente qualquer problema complexo, com múltiplos critérios e com múltiplos decisores. É um processo flexível, que apela para a lógica e ao mesmo tempo, utiliza a intuição.

Além disto, a obtenção de pesos através de comparações par a par mostrou-se bastante adequada à análise em questão principalmente por permitir a tomada de decisão baseada em critérios qualitativos e quantitativos e, ao mesmo tempo, admitir pontos de vista diferenciados e contraditórios. O uso de uma escala de referência permite que julgamentos subjetivos quanto à importância relativa dos diversos critérios analisados possam ser transformados em valores (pesos) a serem incorporados ao processo decisório. Este método tem a vantagem de diminuir a complexidade da análise e a dificuldade dos julgamentos ao avaliar apenas dois elementos por vez. Outra qualidade importante do método é ser matematicamente simples, possibilitando que seja aplicado e entendido por todos os envolvidos no processo.

Os resultados obtidos demonstram a eficiência da metodologia na seleção e classificação das áreas quanto a sua aptidão para o objetivo proposto, permitindo uma escolha orientada das melhores alternativas. Além disso, a metodologia permite também a exclusão das áreas claramente inadequadas na etapa inicial do processo de seleção. Isto aumenta a segurança e otimiza o processo, reduzindo o espaço de busca e conseqüentemente minimizando os gastos envolvidos na procura por áreas adequadas e nos estudos *in situ* para confirmação da adequabilidade. Conseqüentemente, o tempo despendido no processo como um todo também é reduzido.

Quanto à aplicação, pode-se verificar que o método foi consistente, já que os resultados finais demonstram que as áreas classificadas no Estado são realmente as mais adequadas com relação aos critérios avaliados, apresentando-se em sua grande maioria,

em regiões de relevo plano a suavemente ondulado, entre zonas de falha, em áreas de baixa favorabilidade hidrogeológica e em rochas ígneas ou metamórficas. Além disso, ao se analisar os resultados, podemos notar que aproximadamente 45% do Estado não foi considerado adequado para a construção do repositório. Isto, como já foi dito, é importante pois trabalhos futuros podem tomar como ponto de partida as áreas consideradas adequadas à disposição.

6.2 Recomendações

No desenvolvimento do trabalho percebeu-se uma grande dificuldade na obtenção de dados representativos de atributos importantes para a análise. Isto foi bastante sentido na busca por dados do Estado do Rio de Janeiro. Muitas vezes os dados até foram produzidos, mas não estavam disponíveis por se tratar de dados para uso comercial ou cuja produção foi financiada por empresas que os utilizarão em projetos particulares.

Outras vezes os dados não estavam disponíveis nos formatos adequados (arquivos shape) ou nas escalas necessárias, o que dificulta, ou até mesmo impede, o seu uso.

Dados relacionados à água subterrânea, estruturas (falhas e fraturas), densidade demográfica, transporte (rodovias, ferrovias, portos e suas conexões) foram dados difíceis de se obter e que necessitam de mais informações a fim de melhorar a qualidade da análise.

Recomenda-se a elaboração de um banco de dados espaciais a partir dos critérios considerados importantes para a seleção de áreas adequadas para a construção do repositório. Os dados existentes podem ser tratados e melhorados e dados novos podem ser gerados de modo a se dispor de informação confiável e de qualidade quando for necessário utilizá-la.

Outro ponto importante percebido durante o desenvolvimento do trabalho foi a questão das inconsistências identificadas no julgamento dos especialistas. Concluiu-se que estas inconsistências estavam relacionadas a três fatores principais:

1. Falta de conhecimento prévio do problema em questão, ou seja, os especialistas consultados são especialistas em aspectos relacionados a disposição geológica e não tinham conhecimento prévio do problema como um todo. Esta falta de conhecimento anterior é positiva por um lado, pois evita que os especialistas tendenciem seus julgamentos e negativa por outro, pois a

ausência ou a pouca informação podem dificultar os julgamentos e levar a uma percepção errada da importância de determinados critérios.

2. A subjetividade dos julgamentos, aliada ao pouco conhecimento do problema e a delicadeza do assunto em questão também podem ser fonte de inconsistência.
3. Um ponto importante é que os especialistas não opinavam apenas acerca dos critérios de sua especialidade, mas sim acerca de todos os outros critérios. Isto foi feito buscando-se alcançar um equilíbrio entre a opinião do especialista e a opinião de não-especialistas de modo a não tendenciar os pesos dos critérios. Este tratamento também pode ter sido fonte de inconsistência nas análises.

Estas inconsistências não são graves e não afetam a qualidade da análise realizada. Elas foram identificadas, pois o método AHP tem como suposição fundamental que os decisores e especialistas são inconsistentes em seus julgamentos de valor. O método emprega então uma medida de inconsistência conforme descrito na seção 4.2.3.3. Esta medida é importante, pois auxilia o(s) decisor(es) a aprenderem mais sobre o problema de decisão em questão e sobre suas tendências e inconsistências.

Uma outra maneira de aproveitar este aprendizado, diminuir as inconsistências e buscar um consenso é através da utilização de metodologia Delphi (LINSTONE e TUROFF, 2002). Outras técnicas de apoio a tomada de decisão em grupo também podem ser utilizadas, tais como Técnica de Grupo Nominal (*Nominal Group Technique*) e *Brainstorming* (STEWART *et al*, 2006), dentre outras.

Por último, uma outra maneira seria através da consulta a pelo menos três especialistas em cada critério de modo a reduzir as divergências e tentar se chegar a valores médios entre os especialistas para um dado critério.

7 Referências Bibliográficas

AKEND (2002): Site Selection Procedure for Repository Sites. Recommendations of the AkEnd (Committee on a Site Selection Procedure for Repository Sites). Final Report for the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Cologne, Deutschland.

ANON, 1992. Disposal of high level radioactive waste — consideration of some basic criteria. Working Group of Nordic Radiation and Protection Nuclear Safety Authorities.

ARONOFF, S., 1989. **Geographic Information Systems: A Management Perspective**. Canada, WDL Publications.

ASANO, T., EDDY, M., LEVERENZ, H. L, *et al*, 2007. **Water reuse: issues, technologies, and applications**. McGraw-Hill Professional, 1ª edição.

BRASIL, 1965. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. Disponível em:< <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L4771.htm>> Acesso em 15/06/2004.

BRASIL, 1983. Decreto nº 88.821, de 6 de outubro de 1983. Aprova o Regulamento para a execução do serviço de transporte rodoviário de cargas ou produtos perigosos, e dá outras providências.

Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto/Antigos/D88821.htm> Acesso em 24/02/2008.

BRASIL, 2000. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L9985.htm>> Acesso em: 24/05/2007.

BRASIL, 2001a. Lei nº 10.308, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências. Brasília, DF, 21 de Novembro de 2001. Disponível em: <http://ftp.mct.gov.br/legis/leis/10308_2001.htm> Acesso em: 10/11/2004.

BRASIL, 2001b. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 1º, 4º, 14º, 16º e 44º, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/MPV/2166-67.htm>> Acesso em: 11/06/2009.

BRASIL, 2002a. Ministério de Minas e Energia, Resolução nº 8, de 17 de setembro de 2002. Estabelece condições para a retomada do empreendimento de Angra III pela Eletrobrás Termonuclear S.A. - ELETRONUCLEAR. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/download.do?attachmentId=484&download>> Acesso em: 10/11/2004.

BRASIL, 2002b. Resolução do CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30302.html>> Acesso em: 24/05/2007.

BRASIL, 2006. Resolução do CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006. Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP.

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res36906.xml>> Acesso em: 24/05/2007.

BURROUGH, P. A. ,1986. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford, 194 p.

BUYS, B. e EVANGELISTA, R., Energia nuclear: custos de uma alternativa. ComCiência, nº 12, ago.2000.

Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/nuclear/nuclear10.htm>>

Acesso em 21/05/2004.

CÂMARA, G., e MONTEIRO, A. M. V., 2004. Conceitos Básicos da Ciência da Geoinformação. In Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos, INPE. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>> Acesso em 30/03/2008.

CARVER S. J., 1991. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Science**, V. 5, nº 3, pp 321 – 339.

CARVER, S. e OPENSHAW, S., 1992. A geographic information systems approach to locating nuclear waste disposal sites. In: Waste location: spatial aspects of waste management, hazards, and disposal. Routledge, 1ª Edição.

CARVER, S. e OPENSHAW, S., 1995. Using GIS to explore the technical and social aspects of site selection. in Proceedings of Conference on the Geological Disposal of Radioactive Wastes. Royal Lancaster Hotel, London, Março 1995.

CASTRO, P.F. de; OLIVEIRA, R.F. de; ANJOS, G.R.F. dos; *et al.*, 2001. **Atlas das unidades de conservação da natureza do Estado do Rio de Janeiro**. DIVEA-FEEMA; IEF/RJ; SEMADS. São Paulo: Metalivros, 2001. 1 v.

CHANKONG, V. e HAIMES, Y.Y., 1983. **Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology**. Ed. North Holland.

CHURCH, R. L., 2002. Geographical information systems and location science **Computers & Operations Research**, V. 29, nº 6, pp. 541-562

CIDE (2003) Anuário Estatístico do Estado do Rio de Janeiro 1999-2003. Rio de Janeiro. Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CNEN, 1989, Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos, CNEN-NE-6.06, COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, RJ-Brasil

COWEN, D., 1988. GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, nº 11, pp.1551-1555.

CUNHA, M.A. e PARZANESE, G.A.C., 1993 - Proposta metodológica para definição de critérios geológico-geotécnicos para a escolha de locais de disposição de resíduos industriais. In: Anais do 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v.1, pp.161-167, Poços de Caldas, São Paulo, ABGE, set. 1993

DOE, 1987. History of the production complex: The methods of site selection. DOE/NV/10594-H1. U.S. Department of Energy, Washington, DC.

ENRESA, 2001. El almacenamiento geológico profundo de los residuos radiactivos de alta actividad Principios básicos y tecnología. Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. Madrid, Espanha.

EASTMAN, J.R, JIN, W, KYEM, P.A.K, e TOLEDANO, J.,1995. Raster Procedures for multi-criteria/multi-objective decisions. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 61, nº 5, pp. 539-547.

EASTMAN, J.R, 2003. IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing. Manual Version 14.00. Clark Labs, Clark University. Worcester – MA.

FISHER, B.S., N. NAKICENOVIC, K. ALFSEN, J. *et al*, 2007. Issues related to mitigation in the long term context, In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm> Acesso em 10/06/2008.

FOOTE, K.E e LYNCH, M., 1999. GIS as an Integrating Technology: Contexts, Concepts, and Definitions. In: The geographer's craft project. Department of

Geography, University of Texas at Austin. Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro_f.html> Acesso em 18/02/2009.

GELLER, H.S., 2003. **Revolução Energética. Políticas para um futuro sustentável.** Ed. Relume Dumará. Rio de Janeiro. R.J.

GUIMARÃES, L.T., 2000. Utilização do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para Identificação de Áreas Potenciais para Disposição de Resíduos na Bacia do Paquequer, Município de Teresópolis – RJ. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HEYWOOD, I., OLIVER, J. e TOMLINSON, S., 1995. Building an Exploratory Multi Criteria Modelling Environment for Spatial Decision Support. In: **Innovations in GIS 2**. pp. 127-136. Taylor & Francis, Londres.

IAEA, 1977, Site Selection Factors for Repositories of Solid High-Level and Alpha-Bearing Wastes in Geological Formations, Technical Report Series No. 177, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1981. Underground Disposal of Radioactive Waste: Basic Guidance. Safety Series n° 54. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1983a, Criteria for Underground Disposal of Solid Radioactive Wastes. Safety Series n° 60. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1983b Concepts and Examples of Safety Analyses for Radioactive Waste Repositories in Continental Geological Formations. Safety Series n° 58. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1985, Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Systems, Safety Series n° 68. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1989, Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes, Safety Series nº 99. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1994a, Classification of Radioactive Waste, Safety Series nº. 111-G-1.1, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1994b, Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Series nº. 111-G-4.1, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 1995, The Principles of Radioactive Waste Management, Safety Series nº. 111-F, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 2000, Safety Requirements - Safety Standards Series – Pre-disposal Management of Radioactive Waste, Including Decommissioning. nº. WS-R-2, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 2002, Issues relating to safety standards on the geological disposal of radioactive waste. TECDOC – 1282, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 2003a, Scientific and Technical Basis for Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series nº 413, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

IAEA, 2003b Radioactive Waste Management Glossary, 2003 Edition, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.

ISSLER, H., SCHNEIDER, J. e ZUIDEMA, P., 2005. The Siting of Radioactive Waste Disposal Facilities. In: **International Conference on the Safety of Radioactive Waste Disposal**, pp. 177-186. 3 – 7 de Outubro, Tóquio, Japão.

JANKOWSKI, P., 1995. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, nº 3, pp. 251-273.

JNC, 2000. *H12: Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan* (Second Progress Report H12). JAPAN NUCLEAR CYCLE DEVELOPMENT INSTITUTE, Japan.

Disponível em: <http://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/report/H12_report.html>
Acesso em 08/06/2009.

JNC, 2005. *H17: Development and management of the technical knowledge base for the geological disposal of HLW (H17 Report)*. JAPAN NUCLEAR CYCLE DEVELOPMENT INSTITUTE, Japan.

Disponível em: <http://www.jaea.go.jp/04/tisou/english/report/H17_report.html>
Acesso em 08/06/2009.

KEENEY, R.L., 1980. **Siting Energy Facilities**. San Diego, CA: Academic Press.

KEENEY, R.L. e NAIR, K., 1975. Decision Analysis for the Siting of Nuclear Power Plants-The Relevance of Multiattribute Utility Theory. In: Proceedings of the IEEE, v. 63, nº. 3, pp. 494-501. Março 1975.

KEENEY, R.L., RAIFFA, H. e MEYER, R.F., 1993. **Decisions with Multiple Objectives – Preferences and Value Tradeoffs**. Cambridge University Press. Cambridge, UK.

KELLER, C.P., 1996. Decision Making Using Multiple Criteria. NCGIA core curriculum, unit 57. Santa Barbara, Canadá: National Center for Geographic Information and Analysis.

Disponível em: <<http://www.geog.ubc.ca/courses/klink/gis.notes/ncgia/u57.html>> Acesso em 10/12/2007

LEITE, J.C. e ZUQUETTE, L.V., 1996. "Atributos fundamentais à elaboração da carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais". In: Anais do

8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v.2, pp.647-657, Rio de Janeiro, São Paulo, ABGE, set. 1996.

LINSTONE, H.A. e TUROFF, M., 2002. The Delphi Method: Techniques and Applications. Disponível em: < <http://is.njit.edu/pubs/delphibook/>> Acesso em: 05/12/2008.

LOZANO, F.A.E., 2006. Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica. Dissertação de M.Sc., Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

MARBLE, D.F., CALKINS, H.W. e PEUQUET, D.J., 1984. **Basic Readings in Geographic Information Systems**. Williamsville, NY: SPAD Systems Ltd.

McHARG, I.L. 1969. **Design with nature**. Ed. American Museum of Natural History [by] the Natural History Press, 1969.

MALCZEWSKI, J., 1996. A GIS-Based Approach to Multiple Criteria Group Decision-Making. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 10, nº 8, pp. 955-971.

MALCZEWSKI, J., 1999. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. Ed. John Wiley & Sons. New York.

MALCZEWSKI, J., 2000. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. **Transactions in GIS**, v. 4, nº 1, pp. 5-22.

MALCZEWSKI, J., 2004. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, v. 62, nº 1, pp. 3-65.

MacCRIMMON, K. R., 1969. Improving the system design and evaluation process by the use of trade-off information: an application to northeast corridor transportation planning. RM-5877-Dot, Santa Monica, CA: The Rand Corporation.

NIREX, 2001a. The Scientific Foundations of Deep Geological Disposal. Nirex Report No: N/016, United Kingdom Nirex Limited.

NIREX, 2001b. The Proposed Nirex Forward Programme. Nirex Report N/015, United Kingdom Nirex Limited.

NRC, 1983. U.S. Nuclear Regulatory Commission, “Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories”, 10 CFR Part 60, Washington, DC: GPO.

NUMO, 2004. Evaluating Site Suitability for a HLW Repository. Scientific Background and Practical Application of NUMO’s Siting Factors. NUMO-TR-04-04. Nuclear Waste Management Organization of Japan.

NWMO, 2003. Characterizing the Geosphere in High-Level in High-Level Radioactive Waste Management. NWMO Background Papers. Nuclear Waste Management Organization, Canadá.

NWMO, 2005. Choosing a Way Forward the Future Management of Canada’s Used Nuclear Fuel (Final Study). Nuclear Waste Management Organization, Canadá.

OECD/NEA, 1985. Technical Appraisal of the Current Situation in the Field of Radioactive Waste Management. A Collective Opinion by the Radioactive Waste Management Committee. Paris.

OECD/NEA, 1991. Disposal of Radioactive Waste: Can Long-term Safety be Evaluated? An International Collective Opinion. NEA – IAEA.CEC. Paris.

OECD/NEA, 1995. Environmental and Ethical Aspects of Long-Lived Radioactive Waste Disposal (Proc. Int. Workshop Paris, 1994), Organization for Economic Co-operation and Development, Paris

PEREIRA, J.M.C. e DUCKSTEIN, L., 1993. A multiple criteria decision-making approach to GIS-based land suitability evaluation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 7, nº 5, pp 407 – 424.

PITZ, G.F. e McKILLIP, J., 1984. **Decision analysis for program evaluators**. Ed. Sage, Thousand Oaks, CA.

POSIVA OY, 2000, The site selection process for a spent fuel repository in Finland – Summary Report (Tim Mc Ewen and Timo Äikäs). Posiva 2000-15.

RAGSDALE, C.T., 2004. **Spreadsheet Modeling & Decision Analysis: A practical Introduction to Management Science**. Ed. Thomson, Ohio, USA.

RINNER, C. e RAUBAL, M., 2004. Personalized Multi-Criteria Decision Strategies in Location-Based Decision Support. **Journal of Geographic Information Sciences**. v.10, n° 2, pp.149-156.

ROBERTS, S., 2007. Something is better than nothing. **Nutrition**, v. 23, n^{os} 11-12, pp. 911-912.

ROXBURGH, I.S., 1987. **Geology of High-Level Nuclear Waste Disposal. An Introduction**. Chapman and Hall, New York, USA.

RUSSELL, S. e NORVIG, P., 1995. **Artificial Intelligence: a modern approach**. Prentice-Hall.

SAATY, T. L., 1980. **The Analytic Hierarchy Process**. McGraw-Hill. New York.

SAATY, T. L., 2008. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**. v.1, n° 1, pp. 83-98.

SAVAGE, D. (Editor), 1995. **The Scientific and Regulatory Basis for the Geological Disposal of Radioactive Waste**. Ed. John Wiley & Sons. West Sussex. England.

SFS, 1984. Act on Nuclear Activities (SFS 1984:3).¹⁰

¹⁰ Todos os atos da Suécia são publicados no Swedish Statute Book (SFS).

SJÖBERG, L, 2004. "Local Acceptance of a High-Level Nuclear Waste Repository". **Risk Analysis**, V. 24, nº 3, pp:737-749.

SKB, 1992, Treatment and final disposal of nuclear waste – Programme for research, development, demonstration and other measures, (RD&D-Programme 92) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB, 1994. Programme 92 Supplement. Treatment and final disposal of nuclear waste. Supplement to the 1992 programme in response to the government decision of December 16, 1993. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB, 1995. General Siting Study 95 – Siting of a deep repository for spent nuclear fuel, (Technical Report 95-34) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB, 2000a. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. (Technical Report TR-00-12). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB, 2000b. Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository. (Technical Report TR-00-20). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBF/KBS, 1983. Final storage of spent nuclear fuel – KBS-3. Partes I – IV. Stockholm, Sweden.

SMITH, T., MENON, S., STAR, J., *et al.*, 1987. Requirements and Principles for the Implementation and Construction of Large-scale Geographic Information Systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, 1(1):13_31.

SOUZA, N.C.D.C. e ZUQUETTE, L.V. 1993. "Critérios de avaliação geotécnica de unidades de terreno no planejamento urbano", In: Anais do 7º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, v.2, pp.101-108, Poços de Caldas, São Paulo, ABGE, set. 1993

STEWART, D.W, SHAMDASANI, P.N e ROOK, D.W., 2006. **Focus Groups**. Ed. Sage. Thousand Oaks, CA.

TAYLOR, M., 1997. Greenhouse Gases & the Nuclear Fuel Cycle: What Emissions? In: IAEA Bulletin, v. 39, nº 2, pp. 34-36.

TKACH, R. e SIMONOVIC, S., 1997. A new approach to multicriteria decision making in water resources, **Journal of Geographical Information and Decision Analysis**, v.1, nº 1, pp. 25–43

Disponível em: <http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Tkach/Tkach.htm> Acesso em 03/05/2008.

TOMLIN, C.D., 1990. **Geographic Information Systems and Cartographic Modeling**. Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.

US NATIONAL RESEARCH COUNCIL/NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1957, The Disposal of Radioactive Waste on Land, Publication 519, National Research Council, Washington, DC.

Disponível em: <http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10294#toc> Acesso em 08/03/2004

VUORELA, P. e ÄIKÄS, T., 1984. Site Selection Studies for Final Disposal of Spent Fuel in Finland. In: IAEA/Seminar of the Site Investigation Techniques and Assessment Methods for Underground Disposal of Radioactive Wastes, Sophia, Bulgaria, 6 – 10 de Fevereiro. (IAEA-SR-104/5).

WALESH, S.G., 1999. Dad Is Out, Pop Is In. **Journal of the American Water Resources Association**. V. 35, nº.3, pp 535-544.

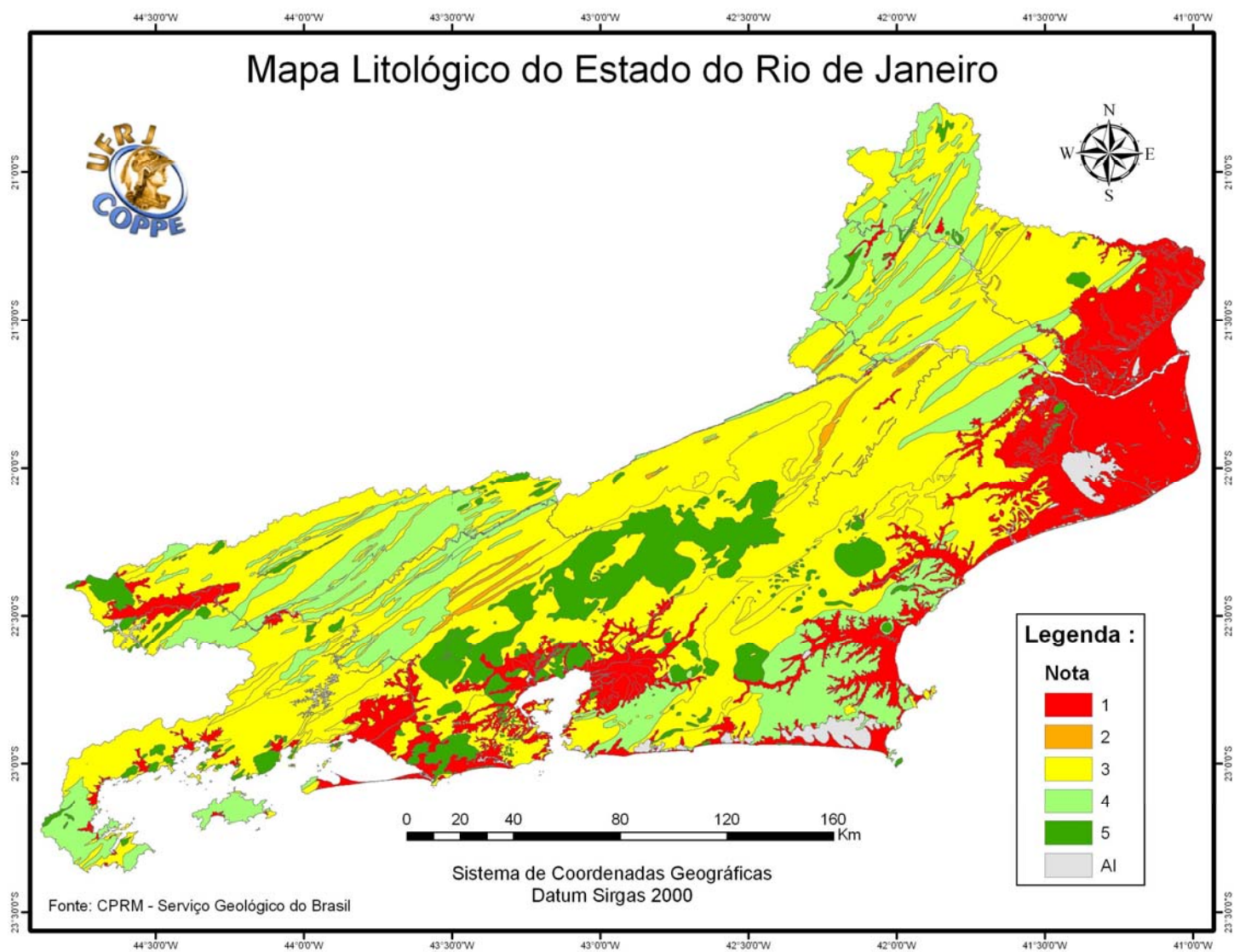
YOON, K.P. e HWANG, C.-L., 1995, **Multi Attribute Decision Making: An Introduction**, Thousand Oaks, CA.

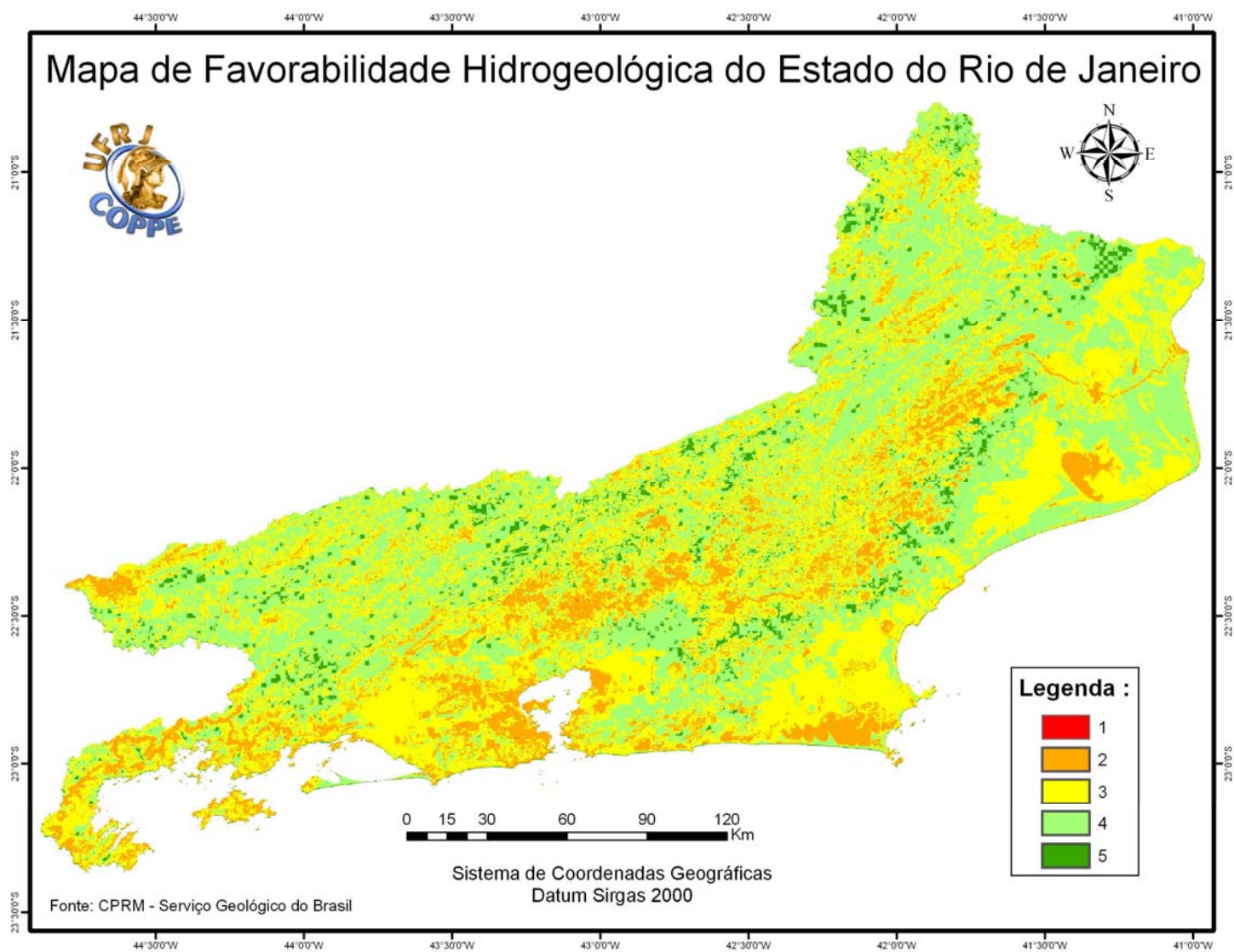
ZELENÝ, M., 2005. **Human systems management: integrating knowledge, management and systems**. Ed. World Scientific.

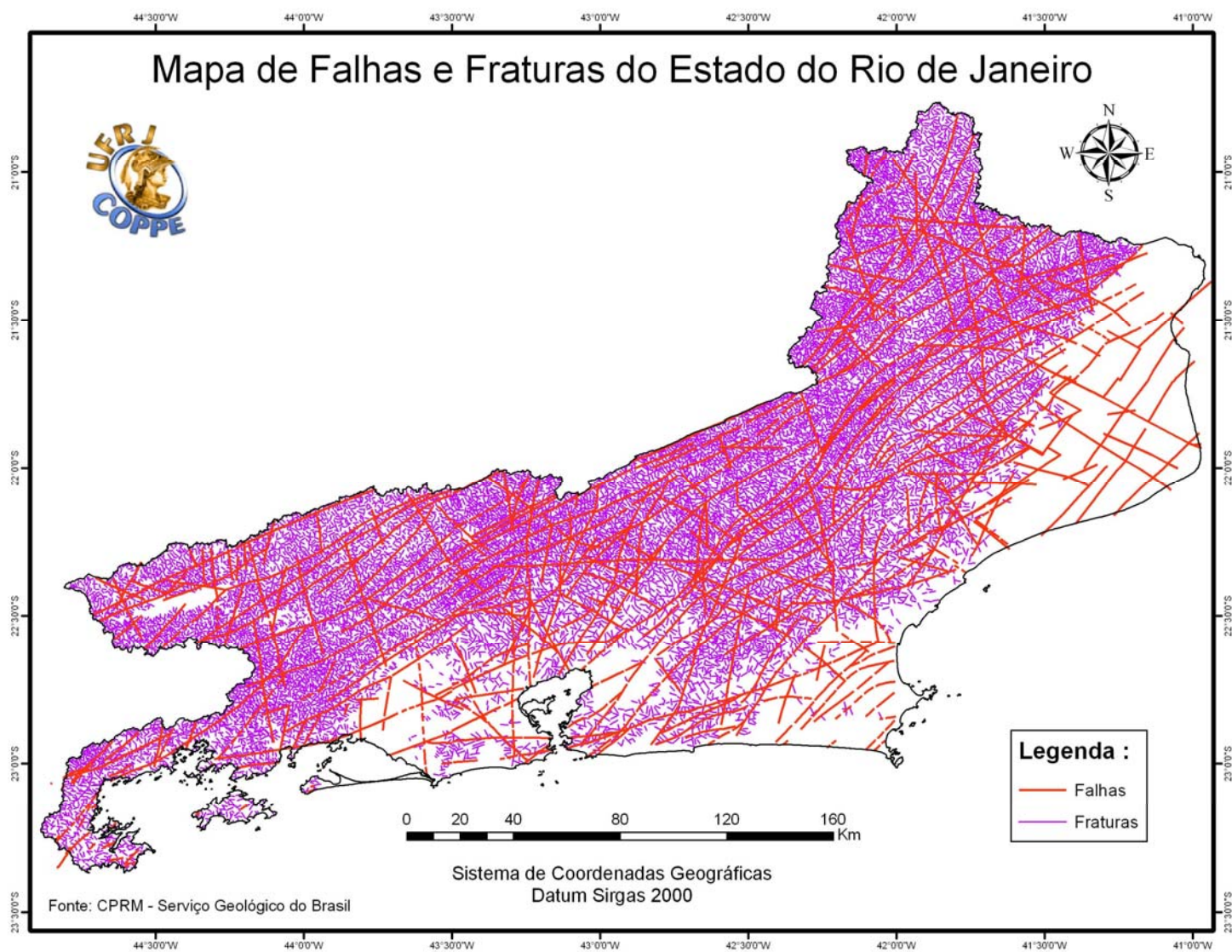
ZUQUETTE, L.V.; PEJON, O.J.; GANDOLFI, N. e SINELLI, O., 1993. "Carta do potencial de risco à contaminação das águas subterrâneas e do potencial agrícola, região de Ribeirão Preto, SP, Brasil", **Geociências**, v.12, no 2, pp.531-540, 1993

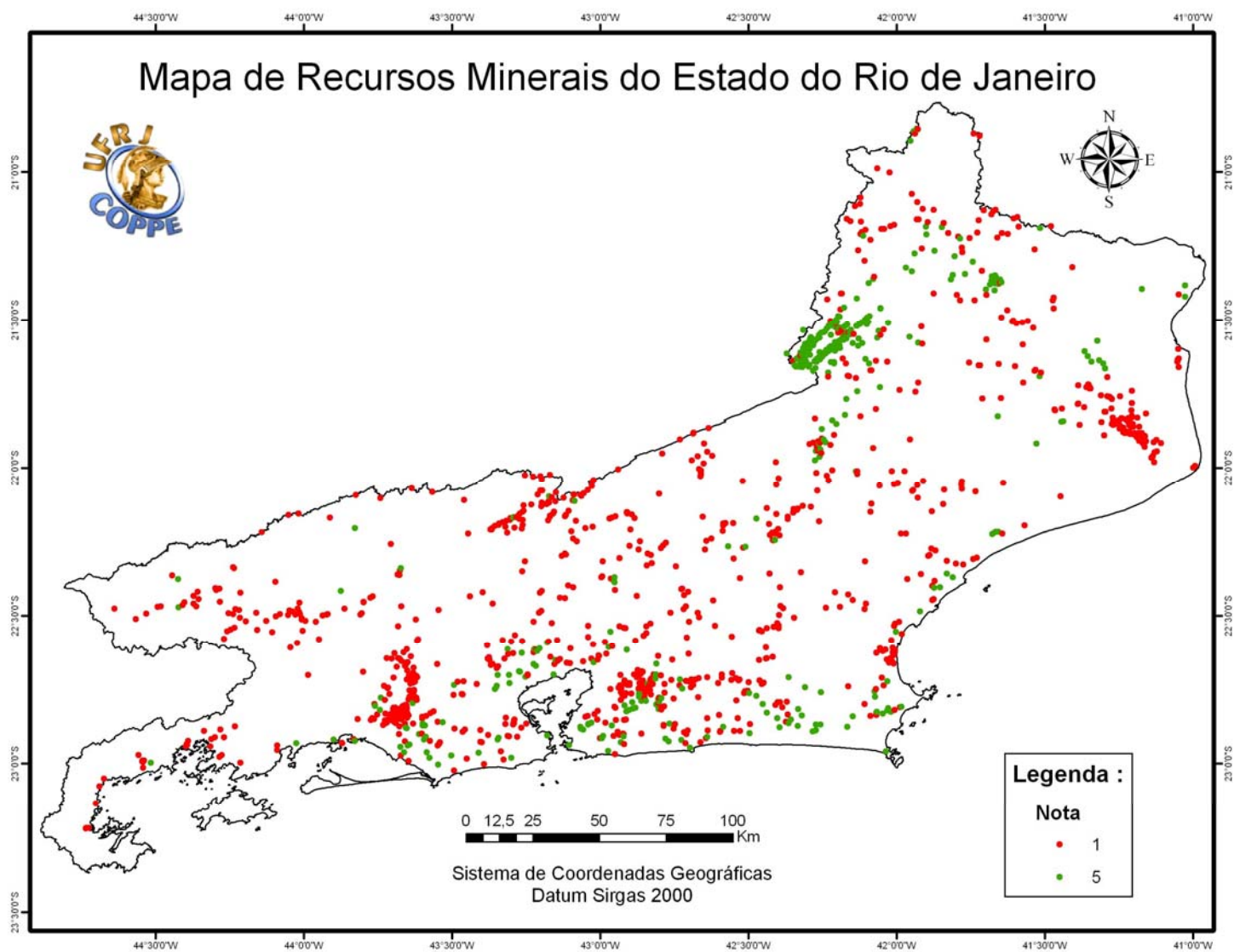
ANEXO I

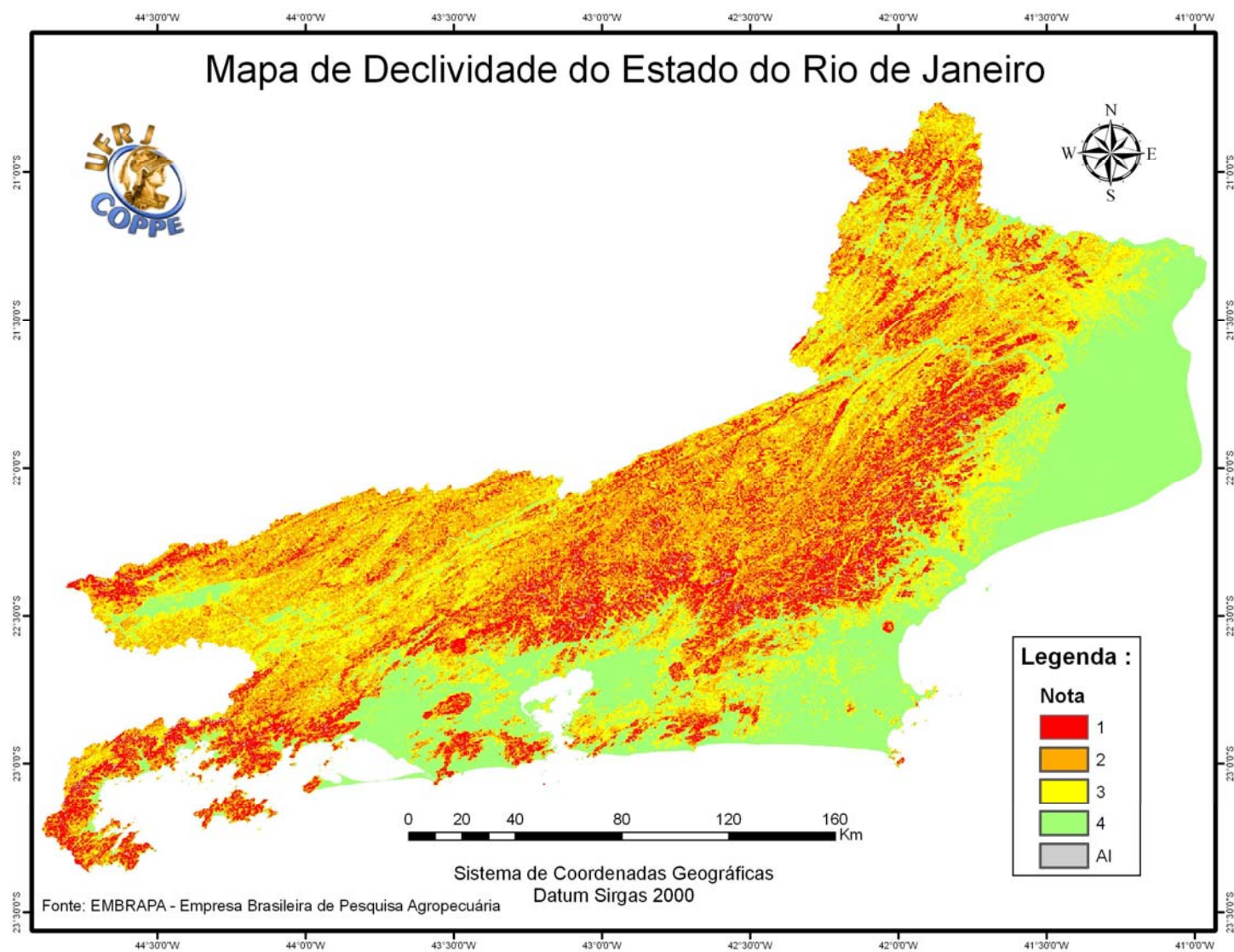
Mapas dos Critérios de Classificação

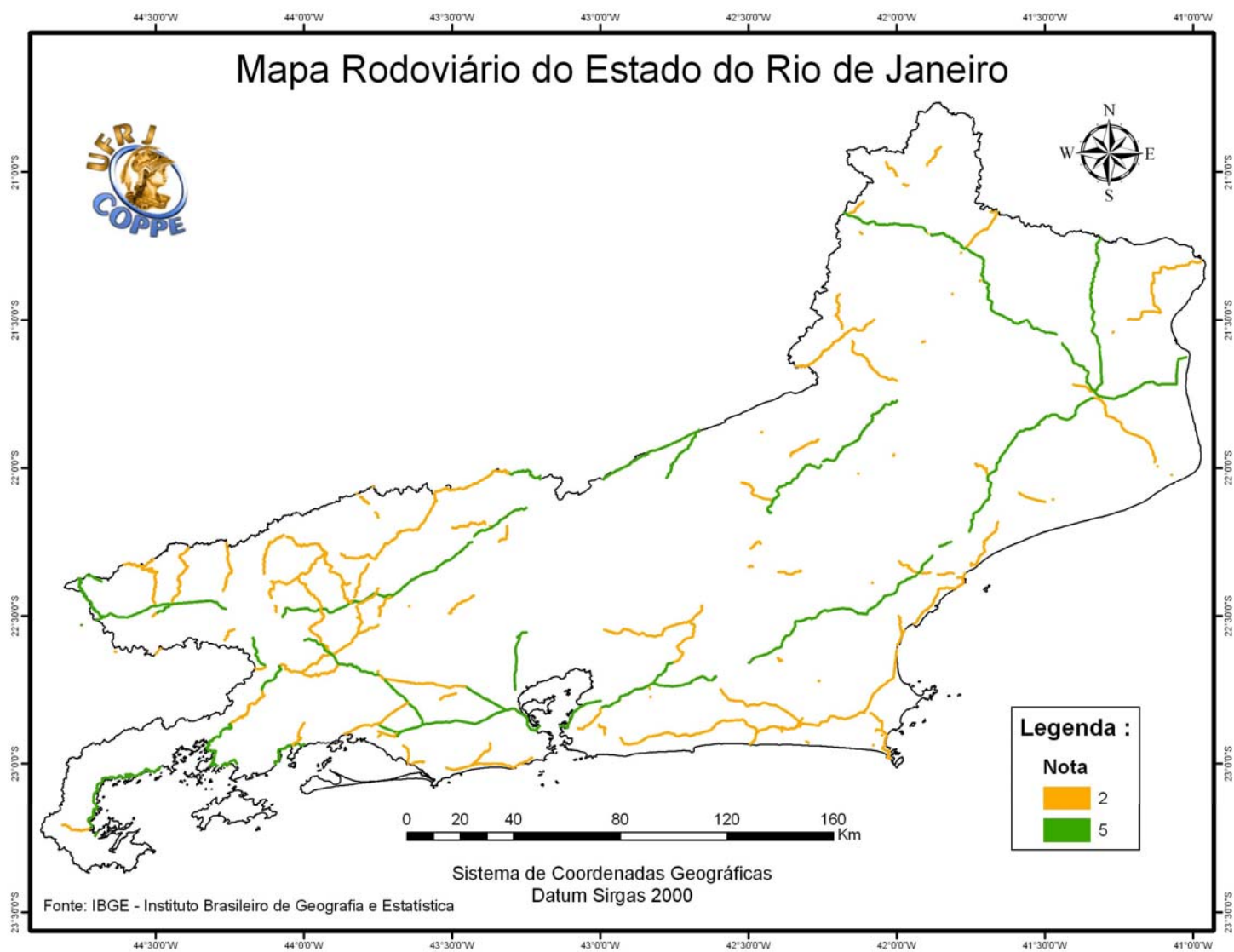


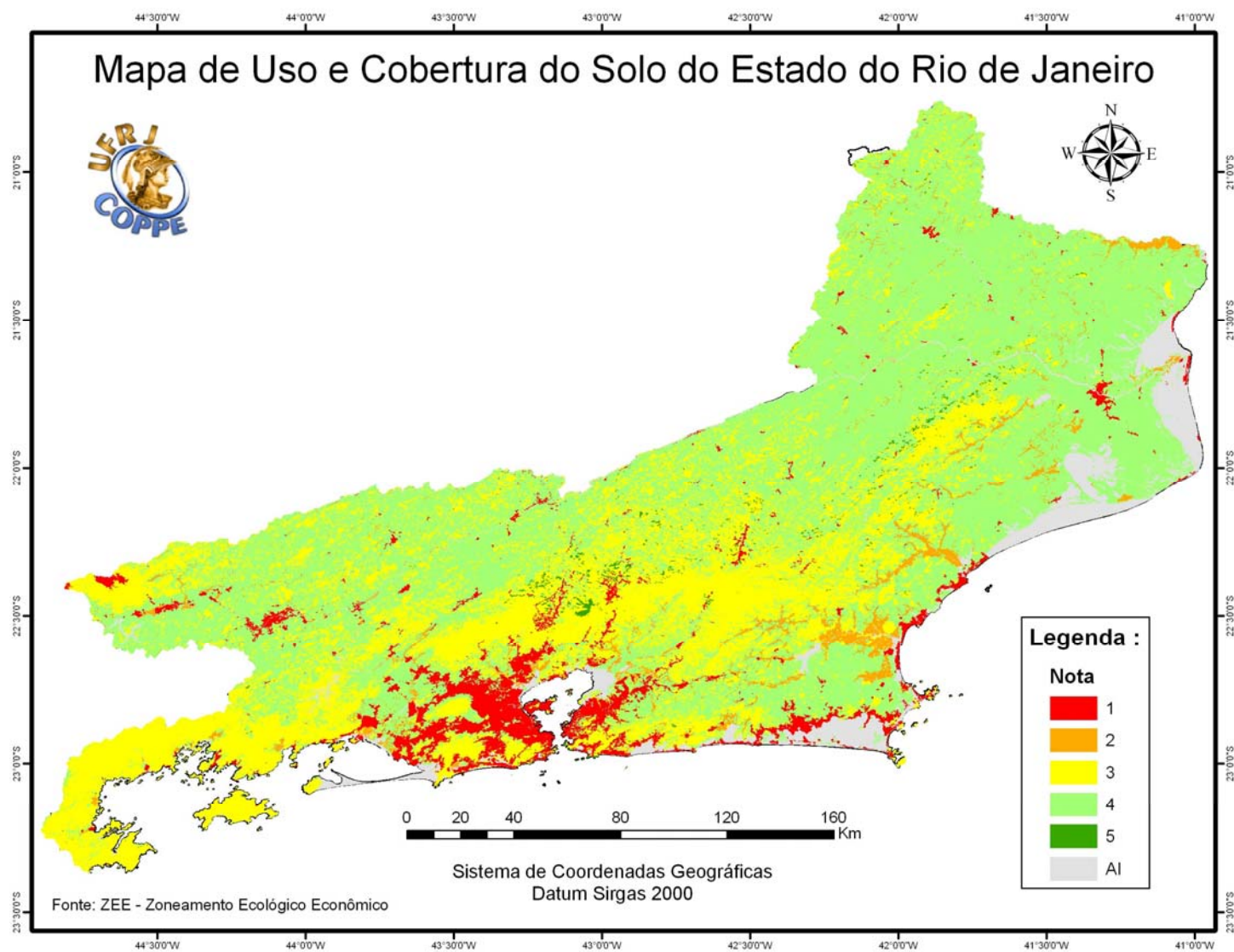






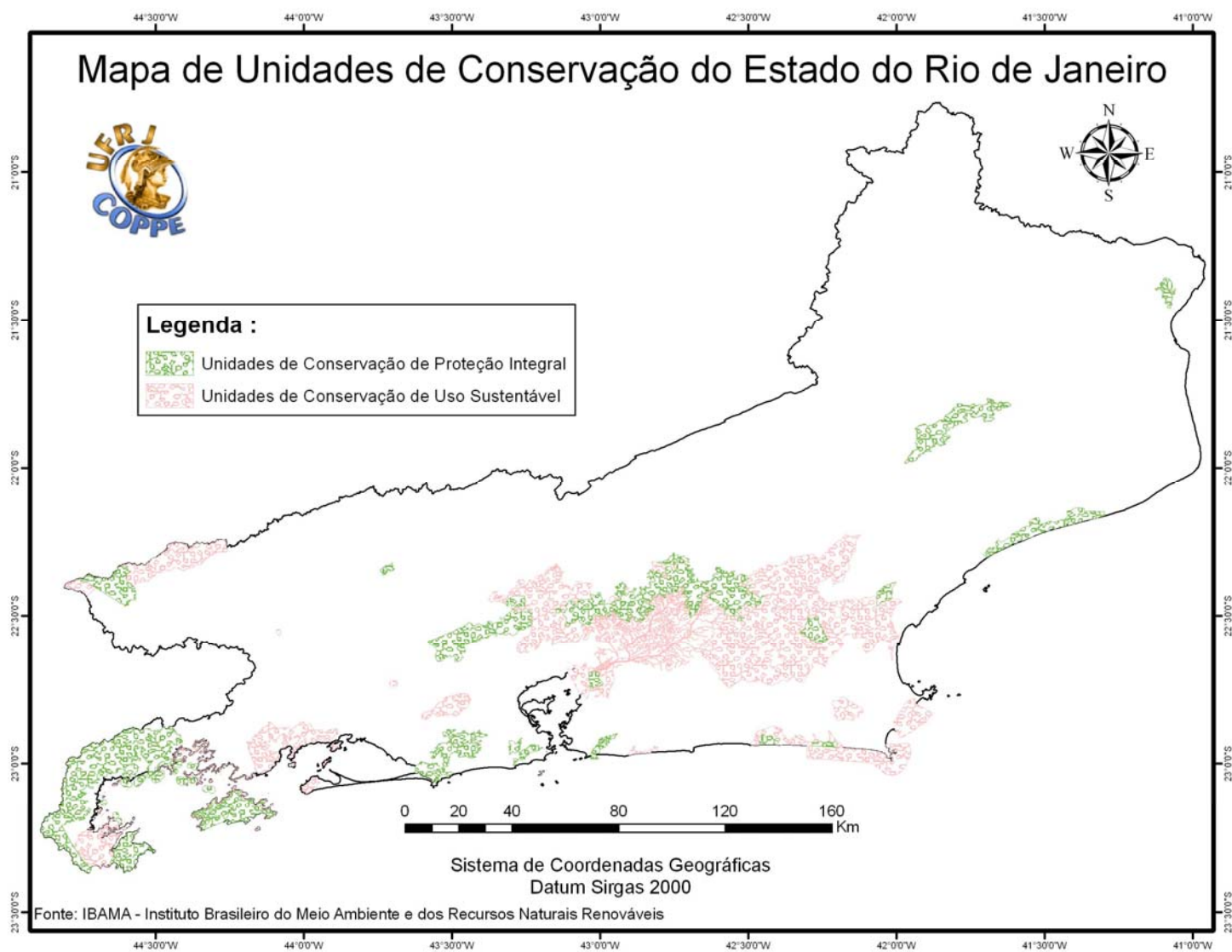


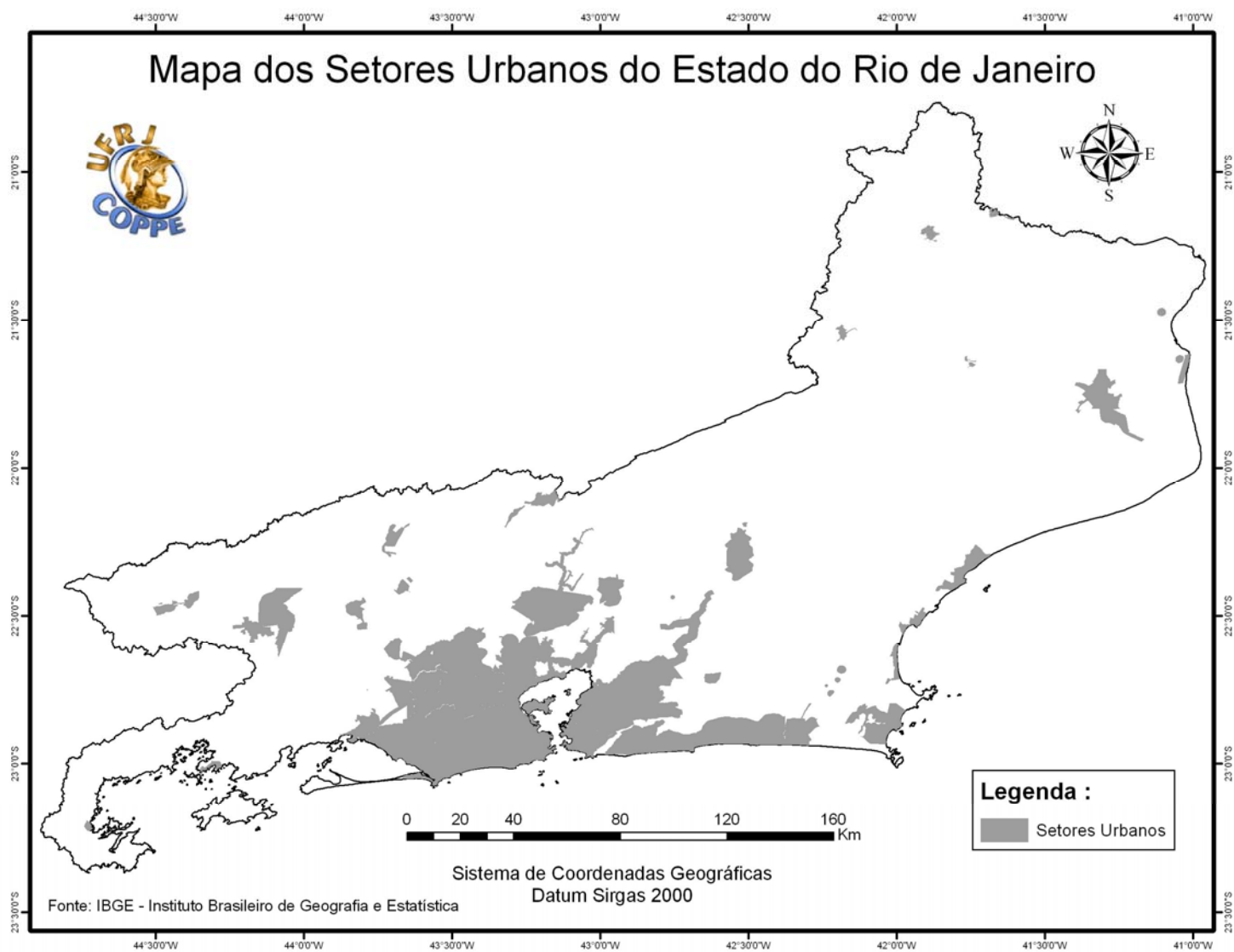




ANEXO II

Mapas dos Critérios de Exclusão





ANEXO III

Especialistas

- * André Luiz Ferrari – Universidade Federal Fluminense
- * Arnaldo Mezharí – Comissão Nacional de Energia Nuclear
- * Daniel Albert Skaba – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- * Francisco de Assis Dourado da Silva – Departamento de Recursos Minerais -
Diretoria de Geologia
- * Gerson Cardoso da Silva Júnior – Universidade Federal do Rio de Janeiro -
Instituto de Geociências, Departamento de Geologia
- * Gustavo de La Reza – HabTec Engenharia Ambiental
- * José Francisco Lumbreras – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
- * Julio Cesar Horta de Almeida – Universidade do Estado do Rio de Janeiro -
Faculdade de Geologia, Departamento de Geologia Regional e Geotectônica.

ANEXO IV

Tabelas de Cálculo dos Pesos

Especialista 1

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	5	9	5	1	3	0,352	0,640	0,265	0,379	0,263	0,268	0,361	6,961	6,363	0,073	0,059
Litologia	1/5	1	7	3	1	3	0,070	0,128	0,206	0,227	0,263	0,268	0,194	6,331			
Transporte	1/9	1/7	1	1/5	1/7	1/5	0,039	0,018	0,029	0,015	0,038	0,018	0,026	6,259			
Uso e Cob	1/5	1/3	5	1	1/3	1	0,070	0,043	0,147	0,076	0,088	0,089	0,085	6,165			
Hidrogeo	1	1	7	3	1	3	0,352	0,128	0,206	0,227	0,263	0,268	0,241	6,297			
Relevo	1/3	1/3	5	1	1/3	1	0,117	0,043	0,147	0,076	0,088	0,089	0,093	6,164			
Soma	2,844	7,810	34,000	13,200	3,810	11,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min.	1	1/3	1	0,200	0,053	0,455	0,236	3,442	3,903	0,452	0,779
Uso e Cob	3	1	1/5	0,600	0,158	0,091	0,283	3,840			
Hidrogeo	1	5	1	0,200	0,789	0,455	0,481	4,429			
Soma	5,000	6,333	2,200	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	9	3	1	9	0,391	0,310	0,322	0,413	0,360	0,359	5,315	5,246	0,061	0,055
Rec. Min.	1/9	1	1/9	1/9	1	0,043	0,034	0,012	0,046	0,040	0,035	4,987			
Litologia	1/3	9	1	1/5	5	0,130	0,310	0,107	0,083	0,200	0,166	5,225			
Hidrogeo	1	9	5	1	9	0,391	0,310	0,537	0,413	0,360	0,402	5,574			
Relevo	1/9	1	1/5	1/9	1	0,043	0,034	0,021	0,046	0,040	0,037	5,128			
Soma	2,556	29,000	9,311	2,422	25,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	9	9	0,818	0,600	0,882	0,767	3,736	3,318	0,159	0,274
Sociais	1/9	1	1/5	0,091	0,067	0,020	0,059	3,032			
Viabilidade	1/9	5	1	0,091	0,333	0,098	0,174	3,186			
Soma	1,222	15,000	10,200	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 2

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	1	7	7	1	5	0,287	0,287	0,233	0,269	0,285	0,305	0,278	6,536	6,327	0,065	0,053
Litologia	1	1	7	7	1	5	0,287	0,287	0,233	0,269	0,285	0,305	0,278	6,536			
Transporte	1/7	1/7	1	1	1/9	1/5	0,041	0,041	0,033	0,038	0,032	0,012	0,033	6,067			
Uso e Cob	1/7	1/7	1	1	1/5	1/5	0,041	0,041	0,033	0,038	0,057	0,012	0,037	6,038			
Hidrogeo	1	1	9	5	1	5	0,287	0,287	0,300	0,192	0,285	0,305	0,276	6,546			
Relevo	1/5	1/5	5	5	1/5	1	0,057	0,057	0,167	0,192	0,057	0,061	0,099	6,240			
Soma	3,486	3,486	30,000	26,000	3,511	16,400	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min.	1	3	1/7	0,120	0,273	0,111	0,168	3,080	3,140	0,070	0,121
Uso e Cob	1/3	1	1/7	0,040	0,091	0,111	0,081	3,024			
Hidrogeo	7	7	1	0,840	0,636	0,778	0,751	3,316			
Soma	8,333	11,000	1,286	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	7	1	1	5	0,299	0,259	0,299	0,299	0,309	0,293	5,303	5,214	0,054	0,048
Rec. Min	1/7	1	1/7	1/7	1/5	0,043	0,037	0,043	0,043	0,012	0,036	5,017			
Litologia	1	7	1	1	5	0,299	0,259	0,299	0,299	0,309	0,293	5,303			
Hidrogeo	1	7	1	1	5	0,299	0,259	0,299	0,299	0,309	0,293	5,303			
Relevo	1/5	5	1/5	1/5	1	0,060	0,185	0,060	0,060	0,062	0,085	5,144			
Soma	3,343	27,000	3,343	3,343	16,200	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	7	7	0,778	0,860	0,467	0,701	3,981	3,471	0,235	0,406
Sociais	1/7	1	7	0,111	0,123	0,467	0,234	3,381			
Viabilidade	1/7	1/7	1	0,111	0,018	0,067	0,065	3,051			
Soma	1,286	8,143	15,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 3

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	7	5	5	1/3	7	0,213	0,505	0,288	0,278	0,170	0,292	0,291	7,377	6,536	0,107	0,086
Litologia	1/7	1	3	3	1/5	5	0,030	0,072	0,173	0,167	0,102	0,208	0,125	6,256			
Transporte	1/5	1/3	1	1	1/7	3	0,043	0,024	0,058	0,056	0,073	0,125	0,063	6,209			
Uso e Cob	1/5	1/3	1	1	1/7	1	0,043	0,024	0,058	0,056	0,073	0,042	0,049	6,375			
Hidrogeo	3	5	7	7	1	7	0,640	0,361	0,404	0,389	0,510	0,292	0,432	6,914			
Relevo	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1	0,030	0,014	0,019	0,056	0,073	0,042	0,039	6,086			
Soma	4,686	13,867	17,333	18,000	1,962	24,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min	1	5	1/5	0,161	0,385	0,149	0,232	3,153	3,189	0,094	0,163
Uso e Cob	1/5	1	1/7	0,032	0,077	0,106	0,072	3,029			
Hidrogeo	5	7	1	0,806	0,538	0,745	0,697	3,385			
Soma	6,200	13,000	1,343	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	9	3	1	9	0,391	0,429	0,315	0,408	0,360	0,380	5,096	5,104	0,026	0,023
Rec. Min	1/9	1	1/3	1/7	1	0,043	0,048	0,035	0,058	0,040	0,045	5,087			
Litologia	1/3	3	1	1/5	5	0,130	0,143	0,105	0,082	0,200	0,132	5,088			
Hidrogeo	1	7	5	1	9	0,391	0,333	0,524	0,408	0,360	0,403	5,238			
Relevo	1/9	1	1/5	1/9	1	0,043	0,048	0,021	0,045	0,040	0,039	5,011			
Soma	2,556	21,000	9,533	2,454	25,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	5	3	0,652	0,714	0,600	0,655	3,058	3,029	0,015	0,025
Sociais	1/5	1	1	0,130	0,143	0,200	0,158	3,015			
Viabilidade	1/3	1	1	0,217	0,143	0,200	0,187	3,015			
Soma	1,533	7,000	5,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 4

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	5	9	3	3	3	0,433	0,346	0,196	0,229	0,603	0,386	0,365	7,154	6,848	0,170	0,137
Litologia	1/5	1	9	3	1/5	1/3	0,087	0,069	0,196	0,229	0,040	0,043	0,111	6,749			
Transporte	1/9	1/9	1	1/9	1/9	1/9	0,048	0,008	0,022	0,008	0,022	0,014	0,020	6,327			
Uso e Cob	1/3	1/3	9	1	1/3	1/3	0,144	0,023	0,196	0,076	0,067	0,043	0,092	6,244			
Hidrogeo	1/3	5	9	3	1	3	0,144	0,346	0,196	0,229	0,201	0,386	0,250	7,469			
Relevo	1/3	3	9	3	1/3	1	0,144	0,208	0,196	0,229	0,067	0,129	0,162	7,144			
Soma	2,311	14,444	46,000	13,111	4,978	7,778	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min	1	7	5	0,745	0,412	0,818	0,658	3,782	3,420	0,210	0,362
Uso e Cob	1/7	1	1/9	0,106	0,059	0,018	0,061	3,048			
Hidrogeo	1/5	9	1	0,149	0,529	0,164	0,281	3,429			
Soma	1,343	17,000	6,111	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	5	3	3	3	0,455	0,294	0,290	0,542	0,529	0,422	5,370	5,252	0,063	0,056
Rec. Min	1/5	1	1/3	1/5	1/3	0,091	0,059	0,032	0,036	0,059	0,055	5,142			
Litologia	1/3	3	1	1/3	1/3	0,152	0,176	0,097	0,060	0,059	0,109	5,089			
Hidrogeo	1/3	5	3	1	1	0,152	0,294	0,290	0,181	0,176	0,219	5,295			
Relevo	1/3	3	3	1	1	0,152	0,176	0,290	0,181	0,176	0,195	5,366			
Soma	2,200	17,000	10,333	5,533	5,667	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	5	9	0,763	0,806	0,600	0,723	3,254	3,120	0,060	0,103
Sociais	1/5	1	5	0,153	0,161	0,333	0,216	3,089			
Viabilidade	1/9	1/5	1	0,085	0,032	0,067	0,061	3,017			
Soma	1,311	6,200	15,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 5

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	1	7	3	3	1	0,263	0,263	0,292	0,265	0,265	0,250	0,266	6,135	6,120	0,024	0,019
Litologia	1	1	7	3	3	1	0,263	0,263	0,292	0,265	0,265	0,250	0,266	6,135			
Transporte	1/7	1/7	1	1/3	1/3	1/3	0,038	0,038	0,042	0,029	0,029	0,083	0,043	6,045			
Uso e Cob	1/3	1/3	3	1	1	1/3	0,088	0,088	0,125	0,088	0,088	0,083	0,093	6,139			
Hidrogeo	1/3	1/3	3	1	1	1/3	0,088	0,088	0,125	0,088	0,088	0,083	0,093	6,139			
Relevo	1	1	3	3	3	1	0,263	0,263	0,125	0,265	0,265	0,250	0,238	6,126			
Soma	3,810	3,810	24,000	11,333	11,333	4,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min.	1	1/3	1	0,200	0,077	0,429	0,235	3,332	3,568	0,284	0,490
Uso e Cob	3	1	1/3	0,600	0,231	0,143	0,325	3,626			
Hidrogeo	1	3	1	0,200	0,692	0,429	0,440	3,745			
Soma	5,000	4,333	2,333	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	3	1	3	1	0,273	0,243	0,238	0,474	0,143	0,274	5,945	6,010	0,253	0,226
Rec. Min.	1/3	1	1/5	1/3	3	0,091	0,081	0,048	0,053	0,429	0,140	6,004			
Litologia	1	5	1	1	1	0,273	0,405	0,238	0,158	0,143	0,243	6,412			
Hidrogeo	1/3	3	1	1	1	0,091	0,243	0,238	0,158	0,143	0,175	6,286			
Relevo	1	1/3	1	1	1	0,273	0,027	0,238	0,158	0,143	0,168	5,405			
Soma	3,667	12,333	4,200	6,333	7,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	7	5	0,745	0,840	0,556	0,713	3,532	3,245	0,122	0,211
Sociais	1/7	1	3	0,106	0,120	0,333	0,187	3,154			
Viabilidade	1/5	1/3	1	0,149	0,040	0,111	0,100	3,048			
Soma	1,343	8,333	9,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 6

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	3	9	9	5	3	0,479	0,537	0,321	0,281	0,341	0,550	0,418	6,444	6,205	0,041	0,033
Litologia	1/3	1	7	9	3	1	0,160	0,179	0,250	0,281	0,205	0,183	0,210	6,267			
Transporte	1/9	1/7	1	1	1/3	1/7	0,053	0,026	0,036	0,031	0,023	0,026	0,032	6,109			
Uso e Cob	1/9	1/9	1	1	1/3	1/9	0,053	0,020	0,036	0,031	0,023	0,020	0,031	6,033			
Hidrogeo	1/5	1/3	3	3	1	1/5	0,096	0,060	0,107	0,094	0,068	0,037	0,077	6,060			
Relevo	1/3	1	7	9	5	1	0,160	0,179	0,250	0,281	0,341	0,183	0,232	6,316			
Soma	2,089	5,587	28,000	32,000	14,667	5,454	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min.	1	3	1/3	0,231	0,333	0,217	0,260	3,033	3,039	0,019	0,033
Uso e Cob	1/3	1	1/5	0,077	0,111	0,130	0,106	3,011			
Hidrogeo	3	5	1	0,692	0,556	0,652	0,633	3,072			
Soma	4,333	9,000	1,533	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	7	1	1	5	0,299	0,280	0,299	0,299	0,306	0,297	5,106	5,072	0,018	0,016
Rec. Min	1/7	1	1/7	1/7	1/3	0,043	0,040	0,043	0,043	0,020	0,038	5,008			
Litologia	1	7	1	1	5	0,299	0,280	0,299	0,299	0,306	0,297	5,106			
Hidrogeo	1	7	1	1	5	0,299	0,280	0,299	0,299	0,306	0,297	5,106			
Relevo	1/5	3	1/5	1/5	1	0,060	0,120	0,060	0,060	0,061	0,072	5,036			
Soma	3,343	25,000	3,343	3,343	16,333	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	1	3	0,429	0,429	0,429	0,429	3,000	3,000	0,000	0,000
Sociais	1	1	3	0,429	0,429	0,429	0,429	3,000			
Viabilidade	1/3	1/3	1	0,143	0,143	0,143	0,143	3,000			
Soma	2,333	2,333	7,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 7

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	1	5	1/3	1	3	0,153	0,153	0,278	0,139	0,153	0,150	0,171	6,181	6,184	0,037	0,030
Litologia	1	1	3	1/3	1	5	0,153	0,153	0,167	0,139	0,153	0,250	0,169	6,208			
Transporte	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	0,031	0,051	0,056	0,083	0,051	0,050	0,054	6,123			
Uso e Cob	3	3	5	1	3	5	0,459	0,459	0,278	0,417	0,459	0,250	0,387	6,288			
Hidrogeo	1	1	3	1/3	1	5	0,153	0,153	0,167	0,139	0,153	0,250	0,169	6,208			
Relevo	1/3	1/5	1	1/5	1/5	1	0,051	0,031	0,056	0,083	0,031	0,050	0,050	6,093			
Soma	6,533	6,533	18,000	2,400	6,533	20,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min	1	1/5	1/5	0,091	0,091	0,091	0,091	3,000	3,000	0,000	0,000
Uso e Cob	5	1	1	0,455	0,455	0,455	0,455	3,000			
Hidrogeo	5	1	1	0,455	0,455	0,455	0,455	3,000			
Soma	11,000	2,200	2,200	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	3	1	1	3	0,158	0,273	0,283	0,283	0,200	0,239	6,089	6,490	0,372	0,332
Rec. Min	1/3	1	1/3	1/3	1	0,053	0,091	0,094	0,094	0,067	0,080	6,089			
Litologia	1	3	1	1	5	0,158	0,273	0,283	0,283	0,333	0,266	6,598			
Hidrogeo	1	3	1	1	5	0,158	0,273	0,283	0,283	0,333	0,266	6,598			
Relevo	3	1	1/5	1/5	1	0,474	0,091	0,057	0,057	0,067	0,149	7,073			
Soma	6,333	11,000	3,533	3,533	15,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	1/3	3	0,231	0,217	0,333	0,260	3,033	3,039	0,019	0,033
Sociais	3	1	5	0,692	0,652	0,556	0,633	3,072			
Viabilidade	1/3	1/5	1	0,077	0,130	0,111	0,106	3,011			
Soma	4,333	1,533	9,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Especialista 8

	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Estruturas	Litologia	Transporte	Uso e Cob	Hidrogeo	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	7	1	7	3	1	0,276	0,628	0,188	0,583	0,214	0,125	0,336	8,375	7,326	0,265	0,214
Litologia	1/7	1	1	1	7	1	0,039	0,090	0,188	0,083	0,500	0,125	0,171	7,518			
Transporte	1	1	1	1	1	3	0,276	0,090	0,188	0,083	0,071	0,375	0,181	6,846			
Uso e Cob	1/7	1	1	1	1	1	0,039	0,090	0,188	0,083	0,071	0,125	0,099	7,164			
Hidrogeo	1/3	1/7	1	1	1	1	0,092	0,013	0,188	0,083	0,071	0,125	0,095	6,603			
Relevo	1	1	1/3	1	1	1	0,276	0,090	0,063	0,083	0,071	0,125	0,118	7,451			
Soma	3,619	11,143	5,333	12,000	14,000	8,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Rec. Min.	Uso e Cob	Hidrogeo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Rec. Min.	1	9	3	0,692	0,871	0,429	0,664	4,333	3,617	0,309	0,532
Uso e Cob	1/9	1	3	0,077	0,097	0,429	0,201	3,389			
Hidrogeo	1/3	1/3	1	0,231	0,032	0,143	0,135	3,130			
Soma	1,444	10,333	7,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Estruturas	Rec. Min.	Litologia	Hidrogeo.	Relevo	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Estruturas	1	3	9	1	1	0,290	0,529	0,638	0,067	0,200	0,345	8,391	7,282	0,571	0,509
Rec. Min.	1/3	1	3	3	1	0,097	0,176	0,213	0,200	0,200	0,177	7,927			
Litologia	1/9	1/3	1	9	1	0,032	0,059	0,071	0,600	0,200	0,192	8,177			
Hidrogeo	1	1/3	1/9	1	1	0,290	0,059	0,008	0,067	0,200	0,125	5,699			
Relevo	1	1	1	1	1	0,290	0,176	0,071	0,067	0,200	0,161	6,216			
Soma	3,444	5,667	14,111	15,000	5,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

	Segurança	Sociais	Viabilidade	Segurança	Sociais	Viabilidade	Pesos	Consistência	λ	CI	CR
Segurança	1	9	3	0,692	0,887	0,273	0,617	5,488	4,274	0,637	1,098
Sociais	1/9	1	7	0,077	0,099	0,636	0,271	4,148			
Viabilidade	1/3	1/7	1	0,231	0,014	0,091	0,112	3,184			
Soma	1,444	10,143	11,000	1,000	1,000	1,000	1,000				

Pesos Finais

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Média Geométrica
Estruturas	0,361	0,278	0,291	0,365	0,266	0,418	0,171	0,336	0,301
Litologia	0,194	0,278	0,125	0,111	0,266	0,210	0,169	0,171	0,182
Transporte	0,026	0,033	0,063	0,020	0,043	0,032	0,054	0,181	0,044
Uso e Cob	0,085	0,037	0,049	0,092	0,093	0,031	0,387	0,099	0,079
Hidrogeo	0,241	0,276	0,432	0,250	0,093	0,077	0,169	0,095	0,174
Relevo	0,093	0,099	0,039	0,162	0,238	0,232	0,050	0,118	0,108
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Média Geométrica
Rec. Min	0,236	0,168	0,232	0,658	0,235	0,260	0,091	0,664	0,262
Uso e Cob	0,283	0,081	0,072	0,061	0,325	0,106	0,455	0,201	0,154
Hidrogeo	0,481	0,751	0,697	0,281	0,440	0,633	0,455	0,135	0,432
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Média Geométrica
Estruturas	0,359	0,293	0,380	0,422	0,274	0,297	0,239	0,345	0,321
Rec. Min	0,035	0,036	0,045	0,055	0,140	0,038	0,080	0,177	0,062
Litologia	0,166	0,293	0,132	0,109	0,243	0,297	0,266	0,192	0,200
Hidrogeo	0,402	0,293	0,403	0,219	0,175	0,297	0,266	0,125	0,255
Relevo	0,037	0,085	0,039	0,195	0,168	0,072	0,149	0,161	0,096
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Média Geométrica
Segurança	0,767	0,701	0,655	0,723	0,713	0,429	0,260	0,617	0,578
Sociais	0,059	0,234	0,158	0,216	0,187	0,429	0,633	0,271	0,224
Viabilidade	0,174	0,065	0,187	0,061	0,100	0,143	0,106	0,112	0,110
Soma	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

ANEXO V

Mapas Finais

