

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA DE MELO

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE ATERRO
SANITÁRIO UTILIZANDO *LÓGICA FUZZY* E *ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO*:
UMA PROPOSTA METODOLÓGICA. APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM - ES.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para a obtenção do título de “Magister Scientiae”.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2001**

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA DE MELO

**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE ÁREAS PARA IMPLANTAÇÃO DE ATERRO
SANITÁRIO UTILIZANDO *LÓGICA FUZZY* E *ANÁLISE MULTI-CRITÉRIO*:
UMA PROPOSTA METODOLÓGICA. APLICAÇÃO AO MUNICÍPIO DE
CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM - ES**

Tese apresentada à
Universidade Federal de
Viçosa, como parte das
exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Civil, para obtenção do título de
“Magister Scientiae”.

DEFESA: 21 de setembro de 2001.

Prof. Roberto Francisco de Azevedo
Conselheiro

Prof. Eduardo Antônio G. Marques

Prof^a . Izabel C. D. Azevedo
Conselheira

Prof^a . Maria do Carmo Calijuri

Prof^a . Maria Lúcia Calijuri
Orientadora

*Dedico essa tese a minha Mãe,
Adailza, e a minha namorada,
Juliana.*

Agradecimentos

À Professora Maria Lúcia Calijuri, pela orientação, apoio, confiança e grande incentivo durante a elaboração deste trabalho.

Aos Professores Roberto Azevedo e Izabel Azevedo, pela amizade, apoio e orientação incondicionais.

Aos Professores Dario Cardoso de Lima, Carlos Alexandre Bráz de Carvalho e Eduardo Marques, pelo apoio e confiança.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa – UFV, representado pelos professores e funcionário, em especial, Cristina e Jorge, pelo atenção e apoio.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

À minha Mãe Adailza, que batalhou muito para que um dia pudesse ver seu filho realizar um sonho tão almejado.

À minha irmã, Andréa, aos meus avós, Amada, Jaci e Cezídio e aos familiares, pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Juliana, pela paciência e compreensão e, sobretudo, pelo amor e carinho constantes.

Ao meu casal de amigos, Rogério e Silvania, pelo apoio e amizade.

Aos amigos, Edgard, Alberto e Fausto, pelos risos, incentivos e amizade.

Aos amigos e colegas do Mestrado, Heraldo, Marcelo, André L. e Rejane, pela amizade.

Aos colegas do LabSigGeo, Eduardo, Anderson, Juliana, Luciano M. e Pedro, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Programa de Capacitação de Juniores – PCJ/2001, da

Companhia Vale do Rio Doce - CVRD, pelo incentivo, apoio e sugestões.

Ao meu bom Deus, por tudo e sempre presente.

Biografia

ANDRÉ LUIS OLIVEIRA DE MELO, filho de Pedro Correia de Melo e Adailza Oliveira de Melo, nasceu em 26 de maio de 1976, em Salvador, Bahia.

Em janeiro de 2000, concluiu o Curso de Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais.

Iniciou, em fevereiro de 2000, o Curso de Mestrado em Engenharia Civil, área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa.

Índice

Lista de Quadros	ix
Lista de Figuras	xi
Resumo	xv
Abstract	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Justificativas.....	5
1.3. Organização da Tese	5
2. Revisão de Literatura.....	7
2.1. Aterro Sanitário.....	7
2.1.1. Histórico.....	7
2.1.2. Definição.....	8
2.1.3. Tipos de Aterros Sanitários	9
2.1.3.1. Aterro Sem Confinamento	10
2.1.3.4. Aterro Confinado	11
2.1.3.4.1. Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos.....	13
2.1.3.4.2. Aterros para Resíduos Perigosos	19
2.1.4. Sistemas de Proteção Ambiental	20
2.1.4.1. Sistema de Impermeabilização de Base e Laterais	20
2.1.4.2. Sistema de Cobertura.....	23
2.1.4.3. Sistema Drenagem de Líquidos Percolados	24
2.1.4.4. Sistema de Coleta e Tratamento de Líquidos Percolados	26

2.1.4.5. Sistema de Coleta e Tratamento de Gás	27
2.1.4.6. Sistema de Drenagem Superficial	28
2.1.4.7. Sistema de Monitoramento	28
2.1.5. Aspectos Técnicos e Ambientais para Implantação de um Aterro Sanitário	30
2.2. Principais Metodologias para Avaliação e Seleção de Áreas	35
2.2.1. Introdução	35
2.2.2. Metodologias para avaliação e seleção de áreas	37
2.2.2.1. Mc BEAN et. al.	37
2.2.2.2. CANSONI et. al.	38
2.2.2.3. LIMA	40
2.2.2.4. ANDRADE	44
2.2.2.5. MASSUNARI et. al.	45
2.2.2.6. KATAOKA	47
2.2.2.7. COELHO	48
2.2.2.8. Outras Propostas	49
2.2.3. Discussão das metodologias	50
3. Materiais e Métodos	54
3.1. Descrição do Material	54
3.1.1. Materiais Cartográficos Digitais	54
3.1.2. Equipamentos	55
3.1.3. Programas	55
3.2. Descrição da Metodologia	55
3.2.1. Introdução	55
3.2.2. Avaliação Multi-Critério	56
3.2.3. Padronização dos Critérios	58
3.2.4. Avaliação de Pesos para os Critérios	64
3.2.5. Combinação dos Critérios	65
3.2.5.1. Combinação Linear Ponderada – WLC	66
3.2.5.2. Média Ponderada Ordenada – OWA	67
3.2.5.3. Seleção de Técnicas Associadas à Avaliação Multi-Critério	69
3.2.5.4. Implementação da Avaliação Multi-Critério em Ambiente SIG	70
3.2.5.5. Estrutura do Modelo de Avaliação Multi-Critério	71
4. Estudo de Caso: Avaliação e Seleção de Áreas para Implantação de Aterro Sanitário no Município de Cachoeiro de Itapemirim-ES	72
4.1. Descrição da Área em Estudo	72
4.1.1. Localização e Acesso	72
4.1.2. Aspectos Hidrográficos	74
4.1.3. Aspectos Pedológicos	78
4.1.4. Aspectos Geológicos	81
4.1.4.1. Complexo Paraíba do Sul	81
4.1.4.2. Granitóides Sin a Tardi-tangenciais	82
4.1.4.3. Intrusivas Ácidas, Intermediárias e Básicas Tardi a Pós-Transcorrentes	82
4.1.4.4. Intrusivas Ácidas, Pós-Transcorrentes	82
4.1.4.5. Intrusivas Básicas	83
4.1.4.6. Depósitos Quaternários	83
4.1.5. Aspectos Geomorfológicos	85

4.1.6. Unidades Naturais	88
4.1.7. Núcleos Urbanos	90
4.2. Estabelecimento dos Critérios	92
4.2.1. Critérios Restritivos (restrições)	92
4.2.2. Critérios Escalonados (fatores)	93
4.2.3. Descrição e Justificativa dos Critérios (Restrições e Fatores)	95
4.2.3.1. Critérios Restritivos Ambientais (RA)	95
4.2.3.2. Critérios Restritivos Operacionais (RO)	95
4.2.3.3. Critérios Restritivos Sócio-Econômicos (RS)	96
4.2.3.4. Critérios Escalonados Ambientais (FA)	96
4.2.3.5. Critérios Escalonados Operacionais (FO)	98
4.2.3.6. Critérios Escalonados Sócio-Econômicos (FS)	99
4.3. Padronização dos Fatores para uma Escala Contínua	100
4.3.1. Fatores Ambientais (FA)	101
4.3.1.1. Fator Distância dos Cursos D'água (FA1)	101
4.3.1.2. Fator Distância das Falhas Geológicas (FA3)	103
4.3.1.3. Fator Pedológico (FA3)	105
4.3.1.4. Fator Geológico (FA4)	107
4.3.1.5. Fator Geomorfológico (FA5)	109
4.3.1.6. Fator Unidades Naturais (FA6)	111
4.3.2. Fatores Operacionais (FO)	113
4.3.2.1. Fator Declividade (FO1)	113
4.3.2.2. Fator Distância do Sistema Viário (FO2)	115
4.3.2.3. Fator Distância de Custo do Perímetro Urbano (FO3)	117
4.3.3. Fatores Sócio-Econômicos	119
4.3.3.1. Fator Distância dos Distritos (FS1)	119
4.3.3.2. Fator Distância da Cidade Sede (FS2)	121
4.3.3.3. Fator Distância das Fazendas (FS3)	123
4.4. Ponderação das Variáveis	125
4.4.1. Comparação Par-a-Par	125
4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Ambiental	125
4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Operacional	127
4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Sócio-Econômico	128
4.4.2. Justificativa das Ponderações Adotadas	129
4.4.2.1. Fatores Ambientais	129
4.4.2.2. Fatores Operacionais	132
4.4.2.3. Fatores Sócio-Econômicos	133
4.5. Fluxograma de Análise	134
4.6. Cenários de Avaliação	136
4.6.1. Introdução	136
4.6.2. Combinação dos Critérios Escalonados no 2o nível (MCE-WLC)	136
4.6.3. Combinação dos Critérios no 1o nível (MCE-OWA)	137
5. Resultados e Discussão	142
5.1. Cálculo da Área Mínima	151
5.2. Seleção das Áreas com Maior Adequabilidade	152
5.3. Avaliação do Uso e Cobertura do Solo	155
6. Conclusões e Sugestões	158
7. Referências Bibliográficas	162

Lista de Quadros

Quadro 1	- Função e aspecto técnico relacionado. Fonte: Adaptado de LIMA (1999).....	42
Quadro 2	- Resumo dos aspectos positivos e negativos das metodologias.....	53
Quadro 3	- Características das zonas naturais de Cachoeiro de Itapemirim.....	88
Quadro 4	- Restrições associadas aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico. Fonte: Adaptado da NBR 13896/, MENEZES (1995), Mc BEAN (1995), ANDRADE (1999), LIMA (1999), MASSUNARI (2000) e MARQUES (2001).....	93
Quadro 5	- Fatores associados aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico. Funções fuzzy adotadas e seus respectivos pontos de controle. Fonte: Adaptado da NBR 13896/97, MENEZES (1995), Mc BEAN (1995), ANDRADE (1999), LIMA (1999), MASSUNARI (2000) e MARQUES (2001).....	94
Quadro 6	- Critérios escalonados (fatores) por níveis.....	134
Quadro 7	- Combinação dos critérios no 2º nível.....	137
Quadro 8	- Conjunto de pesos ponderados referentes à importância relativa dos critérios escalonados (ambiental, operacional e sócio-econômico) na avaliação do 1º nível.....	138

Quadro 9	- Conjuntos de pesos ordenados na avaliação do 1º nível.....	139
----------	--	-----

Lista de Figuras

Figura 1	- Disposição de lixo a céu aberto.....	11
Figura 2	- Modelo de aterro sanitário. Adaptado de IPT (2000).....	12
Figura 3a	- Abertura de trincheira. Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).....	14
Figura 3b	- Descarga dos resíduos no interior da trincheira. Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).....	15
Figura 4	- Compactação dos resíduos contra uma encosta. Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).....	16
Figura 5	- Célula de aterro tronco-pirâmida executada em área. Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).....	17
Figura 6	- Métodos de operação e disposição de resíduos.....	18
Figura 7	Coleta e tratamento de efluentes líquidos. Adaptado de IPT (2000).....	25
Figura 8	- Aplicação de objetos orientados fuzzy.....	60
Figura 9	- Funções sigmoidal.....	61
Figura 10	- Funções J.....	62
Figura 11	- Funções linear.....	63
Figura 12	- Funções definida pelo usuário.....	63
Figura 13	- Espaço estratégico de decisão (OWA).....	68

Figura 14	- Modelo de avaliação multi-critério.....	71
Figura 15	- Localização do município de Cachoeiro de Itapemirim- ES. Fonte: IBGE (1997).....	73
Figura 16	- Mapa hidrográfico e modelo de sombreamento analítico.....	75
Figura 17	- Modelo digital de elevação.....	76
Figura 18	- Classes de declividade.....	77
Figura 19	- Mapa pedológico.....	80
Figura 20	- Mapa geológico.....	84
Figura 21	- Mapa geomorfológico.....	87
Figura 22	- Mapa das unidades naturais.....	89
Figura 23	- Mapa dos núcleos populacionais.....	91
Figura 24	- Mapa do fator distância dos cursos d'água.....	102
Figura 25	- Mapa do fator distância das falhas geológicas.....	104
Figura 26	- Mapa do fator pedológico.....	106
Figura 27	- Mapa do fator geológico.....	108
Figura 28	- Mapa do fator geomorfológico.....	110
Figura 29	- Mapa do fator unidades naturais.....	112
Figura 30	- Mapa do fator declividade.....	114
Figura 31	- Mapa do fator distância do sistema viário.....	116
Figura 32	- Mapa do fator distância de custo do perímetro urbano.....	118
Figura 33	- Mapa do fator distância dos distritos.....	120
Figura 34	- Mapa do fator distância da sede.....	122

Figura 35	- Mapa do fator distância das fazendas.....	124
Figura 36	- Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) ambientais.....	126
Figura 37	- Resultado final dos pesos calculados para os fatores ambientais.....	126
Figura 38	- Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) operacionais.....	127
Figura 39	- Resultado final dos pesos calculados para os fatores operacionais.....	127
Figura 40	- Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) sócio-econômicos.....	128
Figura 41	- Resultado final dos pesos calculados para os fatores sócio-econômicos.....	128
Figura 42	- Fluxograma da combinação dos fatores e restrições adotados.....	135
Figura 43	- Mapa de adequabilidade do critério ambiental.....	143
Figura 44	- Mapa de adequabilidade do critério operacional.....	144
Figura 45	- Mapa de adequabilidade do critério sócio-econômico.....	145
Figura 46	- Mapas dos cenários f_i & $aosr_m$	147
Figura 47	- Mapas dos cenários f_{ij} & $aosr_m$	148
Figura 48	- Mapas dos cenários f_{iii} & $aosr_m$	149
Figura 49	- Planilha Produção de Lixo.....	151
Figura 50	- Mapas do cenários f_i & $aosr_{vij}$ reclassificados.....	153
Figura 51	- Áreas adequadas e imagem do satélite LANDSAT 7.....	155
Figura 52	- Áreas finais e imagem do satélite LANDSAT 7.....	156

Resumo

MELO, André Luis Oliveira de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2001. **Avaliação e Seleção de Área para Implantação de Aterro Sanitário Utilizando *Lógica Fuzzy* e *Análise Multi-Critério*: Uma Proposta Metodológica. Aplicação ao Município de Cachoeiro de Itapemirim- ES.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri. Conselheiros: Roberto F. de Azevedo e Izabel C. D. D. de Azevedo.

Um dos maiores problemas urbanos enfrentados pela sociedade contemporânea é a disposição adequada dos resíduos sólidos, a qual se agrava pelo crescimento populacional e pelo incremento da produção de lixo *per capita*, devido, principalmente, ao consumo excessivo de produtos industrializados. Resolver adequadamente a disposição final dos resíduos sólidos é de fundamental importância para o meio ambiente e saúde pública, mas não é o suficiente. Estes resíduos devem ser gerenciados de forma integrada, o que pressupõe a redução da quantidade gerada, reutilização ou reciclagem e disposição dos resíduos finais em áreas apropriadas, como os aterros sanitários. Estes últimos, além de envolverem projetos tecnicamente corretos, devem estar situados em locais ambiental, operacional e sócio-economicamente adequados. É nesse contexto que as técnicas de geoprocessamento, em especial, os sistemas de informação geográfica (SIG), podem auxiliar na realização de avaliações complexas em grandes extensões territoriais. O presente trabalho compreende uma proposta metodológica de avaliação e seleção de áreas para implantação de aterros sanitários utilizando

lógica fuzzy e análise multi-critério, que aumentam consideravelmente o potencial analítico do SIG. Os procedimentos adotados envolvem manipulação de dados cartográficos e temáticos, definição de critérios (ambiental, operacional e sócio-econômico), análises espaciais e seleção das áreas mais adequadas. O resultado final demonstra a potencialidade do SIG como apoio à tomada de decisão quanto à instalação do empreendimento impactante.

Abstract

MELO, André Luis Oliveira de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, september,2001. **Evaluation and Selection of Area for Implantation of Sanitary Landfill Using Logical Fuzzy and Analysis Multi-Criterion: an Proposal Methodology. Application to the City of Cachoeiro de Itapemirim, State of Espírito Santo, Brazil.** Advisor: Maria Lúcia Calijuri. Committee Members: Roberto F. de Azevedo e Izabel C. D. D. de Azevedo.

One of the majors urban problems faced by the contemporary society is the adequate disposal of the solid wastes, which aggravates for the population growth and the increment of the *per capita* waste production, in result of, mainly, to the extreme consumption of industrialized products. Adjusting adequately the final disposal of the solid wastes is of basic importance for the environment and public health, but it is not the sufficient. These wastes must be managed of integrated form, what it estimates the reduction of the generated amount, reusing or recycling and disposal of the final wastes in appropriate areas, as the sanitary landfill. These last ones, besides involving technical correct designs, must be situated in adequate places ambient, operational and partner-economic. It is in this context that the geoprocessing techniques, in special, the geographic information systems (GIS), can assist in the accomplishment of complex evaluations in great territorial extensions. The present work understands a proposal methodology of evaluation and selection of areas for implantation of sanitary landfill using logical fuzzy and analysis multi-criterion, that considerably magnifies the analytical potential of the GIS.

The adopted procedures involve manipulation of cartographic and thematic data, space definition of criteria (ambient, operational and partner-economic), analyses and selection of the more adjusted areas. The final result demonstrates the potentiality of the GIS as bracket to the taking of decision in relation the installation of the enterprise.

1. Introdução

O Homem surgiu na face da terra há três milhões de anos. Até a descoberta da agricultura, por volta de 8.000 a.C., a população mundial era de menos de dez milhões de pessoas. Em razão da maior disponibilidade de alimentos, a população mundial foi gradualmente aumentando até chegar próximo de 800 milhões em 1750 d.C. (CORSON *apud* ANDRADE, 1999).

Com o desenvolvimento da medicina e a melhoria nas condições de saneamento básico, os índices de mortalidade infantil e a expectativa de vida melhoraram consideravelmente nos últimos quarenta anos, contribuindo para o crescimento populacional acelerado, muitas vezes de forma desordenada.

A população atingiu a marca de 5,2 bilhões de habitantes no início da década de 90 e hoje ultrapassa 6 bilhões de pessoas. Caso esta tendência seja mantida, chegará a dez bilhões por volta de 2025 d.C. (CORSON *apud* ANDRADE, 1999).

Segundo IBGE (1991), as pessoas vivendo em áreas urbanas representavam 29% dos habitantes do planeta em 1950. Este valor aumentou para 42% em 1985 e deve chegar próximo de 60% em 2020. No Brasil, os fluxos migratórios também foram responsáveis pelo inchaço das regiões metropolitanas. Dados do IBGE (1991) mostraram que 75% da população brasileira morava em centros urbanos, no início dos anos 90.

Desde início de sua existência, o Homem tem gerado resíduos que são característicos dos diferentes costumes, atividades de época e de suas várias fases de evolução social, intelectual e tecnológica. Durante séculos, a principal atividade econômica concentrava-se no campo, com a produção agrícola, e os principais resíduos gerados, provenientes essencialmente de restos de comida, eram facilmente assimiláveis ao meio ambiente.

Segundo KATAOKA (2000), a revolução industrial trouxe mudanças drásticas nos costumes e atividades do Homem para os tempos atuais. A principal delas foi a mudança de suas atividades antes baseadas na produção agrícola e a vida do campo, para uma vida mais concentrada nos grandes centros urbanos e a dependência cada vez maior de produtos industrializados e descartáveis. Como consequência, o volume e a variedade de resíduos vem aumentando a cada dia.

A humanidade gera diariamente milhões de toneladas de resíduos de todas as naturezas (sólidos, líquidos e gasosos), em decorrência dos avanços tecnológicos e das mais variadas atividades antrópicas desenvolvidas para sustentar a vida na Terra. Essa tendência é observada com maior ênfase a partir da segunda metade do século XIX.

Estes resíduos, durante séculos, foram tratados de maneira inadequada, dispostos diretamente no solo ou em cursos de água, sem nenhuma preocupação com o meio físico e com a qualidade ambiental, ou seja, com o meio ambiente.

Os resíduos sólidos gerados pela atividade cotidiana dos cidadãos, pelos seus hábitos de consumo e pela produção industrial é um dos principais problemas presentes nos centros urbanos (DUNCKLEY *apud* CONRAD, 2000). O problema tende a se agravar à medida que a população urbana e a quantidade de resíduos *per capita* gerada diariamente ainda aumenta a taxas significativas, enquanto diminuem as alternativas de áreas para disposição dos resíduos. Some-se a isso o fato de que na grande maioria das cidades brasileiras o destino final dos resíduos sólidos urbanos é totalmente inadequado.

Cerca de 89% do lixo coletado no país ainda é despejado em áreas a céu aberto, nos chamados “lixões”; aproximadamente 10% do total de lixo coletado é conduzido para aterros e apenas 1% do total do lixo é tratado em usinas (IBGE, 1991).

Resolver de forma sustentável a disposição final dos resíduos sólidos de uma cidade é fundamental para a questão do meio ambiente, do saneamento e da saúde pública, mas não é o suficiente. Os resíduos sólidos devem ser gerenciados de forma integrada, desde sua origem até a disposição final, com abordagens que incluem a minimização ou redução da quantidade gerada, a reciclagem e a reutilização ou reaproveitamento de materiais (EPA,

2000). Entretanto, mesmo adotando-se todas estas iniciativas simultaneamente, permanece ainda a necessidade de se dispor adequadamente os resíduos finais, que não podem ser reciclados nem reutilizados. A disposição final pode causar diversos danos ao homem e ao meio ambiente, principalmente se ocorrer de maneira inadequada, a céu aberto, poluindo o solo, a água e o ar (CONSONI *et. al.*, 1996b).

Uma das principais dificuldades enfrentadas na implantação de um aterro sanitário é, sem dúvida, a escolha de uma área que reúna boas condições técnicas, econômicas e ambientais (MASSUNARI, 2000). Isto, normalmente, é feito a partir de criteriosa pesquisa de áreas favoráveis. O estudo destas alternativas locacionais é considerado um importante instrumento de planejamento ambiental, pois muitos impactos podem ser evitados ou minimizados com a escolha de local adequado para implantação do empreendimento.

Na maior parte das vezes, a escolha do local para a implantação de um aterro sanitário já parte de um número reduzido de alternativas pré-definidas, em virtude da dificuldade de avaliar simultaneamente todo o território potencialmente utilizável para essa finalidade. Com o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas, mais especificamente na área de informática, os procedimentos de trabalho no campo das geotecnologias evoluiu, permitindo a automação de serviços que no passado eram executados manualmente, muitas vezes de forma lenta e imprecisa.

Com o auxílio das técnicas de geoprocessamento e computadores de última geração é possível resolver estas questões, obtendo-se sensíveis ganhos em tempo e qualidade dos resultados, permitindo a realização de avaliações complexas em grandes extensões territoriais. O potencial analítico propiciado por métodos de classificação contínua dos dados recentemente introduzidos, baseados em lógica *fuzzy*, e de cruzamentos não *boolean*, baseados na análise multi-critério, amplia o leque de potencialidades dos sistemas de informação geográfica (SIG's) na integração de dados para análises voltadas à geotecnia ambiental, possibilitando reter toda a variabilidade dos dados.

As análises baseadas no conceito *fuzzy*, ao contrário das análises *boolean* convencionalmente disponíveis na maior parte dos SIG's, não segmentam cada variável em apta e não apta ao fim pretendido, mas permite

transformá-las em escores de aptidão que mantém toda a variação espacial original. Além disso, as variáveis podem compensar umas às outras durante a agregação para a obtenção do mapa final de aptidão ao propósito pretendido. Um alto escore de aptidão de uma variável em um determinado local pode compensar um baixo escore de aptidão de outra variável no mesmo local, resultando num escore ponderado no resultado final.

O grau com que uma variável pode compensar outra no resultado final de uma análise com classificação contínua dos dados é determinado pelo seu peso relativo, uma vez que as variáveis podem ter pesos diferentes para a definição do resultado final. Em uma análise *boolean* uma aptidão baixa em qualquer uma das variáveis utilizadas fatalmente levaria à exclusão do local, mesmo que em todas as demais a aptidão fosse elevada.

O presente trabalho fez uso dessas novas técnicas de geoprocessamento, buscando-se avaliar e selecionar as áreas mais adequadas para a implantação de um aterro sanitário em um município de médio porte. Foram utilizadas técnicas avançadas de geoprocessamento para integrar variáveis de diversos tipos, através da classificação contínua dos dados baseada em funções *fuzzy* de pertinência a conjunto, visando a obtenção de uma superfície de aptidão à implantação do empreendimento impactante.

A área estudada foi o município de Cachoeiro de Itapemirim, situado no sul do Estado do Espírito Santo. Cachoeiro possui uma população de 174.227 habitantes e área territorial de aproximadamente 890,40 km², segundo IBGE (1997). O lixo recolhido na área urbana é depositado em um aterro sanitário. No contexto regional, Cachoeiro é um importante centro industrial de pedras ornamentais e tem experimentado um crescimento significativo nos últimos anos.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral propor uma metodologia de avaliação e seleção de áreas para implantação de aterros sanitários utilizando lógica *fuzzy* e análise multi-critério. Visando validar a metodologia proposta, tem-se a aplicação ao município de Cachoeiro de Itapemirim- ES, o qual já possui um aterro sanitário em operação, que terá sua localização comparada com as áreas consideradas adequadas pela metodologia.

1.2. Justificativas

Como justificativas, citam-se:

- A elaboração do documento referente à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, intitulado Agenda 21, estabeleceu que até 2025 todos os resíduos sólidos deveriam estar depositados de acordo com diretrizes nacionais ou internacionais de qualidade ambiental;
- A avaliação de uma área para implantação de aterro sanitário é de fundamental importância para minimizar os impactos ambientais inerentes ao empreendimento;
- Ao abordar aspectos técnicos, ambientais e sócio-econômicos, aliados às técnicas de geoprocessamento, é possível desenvolver uma análise de alternativas locais uma vez que os órgãos ambientais competentes exigem uma escolha criteriosa;
- A redução das áreas adequadas ambiental e economicamente devido à crescente urbanização exige uma abordagem técnica muito mais precisa.

1.3. Organização da Tese

No Capítulo 2 (Revisão de Literatura), inicialmente aborda-se o conceito sobre aterro sanitário além dos aspectos técnicos relacionados. Em sequência, é apresentada uma revisão sobre algumas metodologias aplicadas na avaliação e seleção de área para instalação de aterros sanitários.

No Capítulo 3 (Materiais e Métodos) são apresentados os materiais e a metodologia aplicados no desenvolvimento do presente trabalho. São descritos os materiais, os programas e os equipamentos utilizados. No que se refere à metodologia, procura-se descrever detalhadamente os procedimentos adotados, onde são abordados os conceitos de lógica *fuzzy* e análise multi-critério e sua relação com o SIG.

Neste capítulo procurou-se aplicar a metodologia ao município de Cachoeiro de Itapemirim- ES (estudo de caso), onde são

apresentados a descrição da área de estudo e os critérios utilizados na análise.

O Capítulo 4 (Resultados e Discussões) aborda os resultados obtidos no estudo de caso desenvolvido no presente trabalho. São discutidos os aspectos referentes aos cenários de risco na tomada de decisão para seleção de áreas apropriadas à implantação de aterros sanitários. É neste capítulo que apresentam-se a avaliação e seleção final das áreas mais adequadas ao empreendimento impactante.

No Capítulo 5 (Conclusões e Sugestões) são apresentadas as conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho, abordando a importância da disposição correta dos resíduos sólidos assim como os aspectos positivos referentes à metodologia utilizada. Apresenta-se também algumas sugestões de trabalhos futuros.

2. Revisão de Literatura

2.1. Aterro Sanitário

2.1.1. Histórico

A prática de se utilizar o solo para enterrar resíduos, ocorre desde o início da civilização, tendo sido por muito tempo a alternativa mais conhecida pelo homem para dar destino aos rejeitos oriundos de suas atividades, seja na sua própria casa ou na chamada atividade produtiva (indústria, comércio, serviços, entre outras).

Aterrar o lixo não é privilégio da civilização moderna. Em 2500 a.C., os nababeus na Mesopotâmia enterravam seus resíduos domésticos e agrícolas em trincheiras escavadas no solo. Passado algum tempo, as trincheiras eram abertas e a matéria orgânica, já decomposta, era removida e utilizada como fertilizante orgânico na produção de cereais (LIMA, 1995).

Em 150 d.C., em Roma, o povo que morava na zona urbana, assustado com a grande quantidade de roedores e insetos que apareciam em torno dos locais onde o lixo era disposto, resolveu abrir valas e aterrar todos os resíduos, a fim de eliminar os inconvenientes causados pelos mesmos. Este relato pode ser comprovado pois registros históricos mostram que durante este período o povo romano foi vítima da peste bubônica (LIMA, 1995). Na Idade Média, quando a mesma peste vitimou 43 milhões de pessoas na Europa, o Homem também teve que aterrar seus resíduos.

Desde então os administradores públicos e os interessados em saúde pública passaram a defender a necessidade de desenvolver técnicas mais confiáveis no gerenciamento dos resíduos, entre as quais, está incluída a técnica de disposição e confinamento dos resíduos no solo denominada aterro sanitário.

No Brasil, os aterros de resíduos sólidos, enquanto obra de engenharia, começaram na década de 70, e logo passaram a sofrer resistência no meio técnico e na própria sociedade devido aos riscos ambientais que podiam apresentar, não obstante as técnicas de controle disponíveis e utilizadas. Atualmente, essa resistência é ainda maior, visto que, ao longo dos anos, muitos aterros, inadequadamente implantados e operados, resultaram com a degradação e alteração do meio ambiente local.

No Brasil, a grande maioria das disposições de resíduos no solo é inadequada, constituindo-se em vazadouros a céu aberto e apenas uma reduzida parcela está de acordo com as normas vigentes. Com isso, as áreas destinadas a receber lixo, sem uma infra-estrutura adequada, expostas a danos advindos dessa atividade, têm seu futuro comprometido, além de serem responsáveis pela degradação ambiental das regiões sob sua influência.

2.1.2. Definição

O aterro sanitário é uma forma de disposição final de resíduos sólidos urbanos no solo, dentro de critérios de engenharia e normas operacionais específicas, proporcionando o confinamento seguro dos resíduos (normalmente, recobrimento com argila selecionada e compactada em níveis satisfatórios), evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais. Esses critérios de engenharia materializam-se no projeto de sistemas de drenagem periférica e superficial para afastamento de águas de chuva, de drenagem de fundo para a coleta do lixiviado, de sistema de tratamento para o lixiviado drenado, de drenagem e queima dos gases gerados durante o processo de bioestabilização da matéria orgânica.

É, sem dúvida, uma interessante alternativa de disposição final de resíduos sólidos para os países em desenvolvimento, como o Brasil. Atualmente, segundo IPT (1995), cerca de 10% das cidades brasileiras solucionaram seu problema de disposição de lixo adotando a técnica do aterro

sanitário.

Segundo a ASCE (American Society of Civil Engineering), um aterro sanitário é um método de disposição que não provoca prejuízos ou ameaça à saúde e à segurança, utiliza princípios de engenharia de modo a confinar o lixo no menor volume possível, cobrindo-o com uma camada de solo ao fim do trabalho de cada dia, ou mais vezes, se necessário.

Segundo ABNT (1992), a NBR 8.419/92 define aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos como: *"Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário"*.

2.1.3. Tipos de Aterros Sanitários

O lançamento a céu aberto, conhecido também como lixão, é uma forma inadequada de disposição final dos resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. O mesmo que descarga a "céu aberto". Os resíduos assim lançados acarretam problemas como a proliferação de vetores de doenças (moscas, mosquitos, baratas, ratos, entre outros), geração de maus odores e, principalmente, poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através do chorume (líquido de cor preta, mau cheiroso e de elevado potencial poluidor produzido pela decomposição da matéria orgânica), comprometendo os recursos hídricos.

Os aterros sanitários constituem o principal método de disposição e descarte dos resíduos sólidos, provenientes da atividade humana e considerados indesejáveis. Seus princípios básicos são amplamente difundidos e aceitos em todo o mundo, pois representam a solução para todas as tentativas de eliminação dos resíduos de maneira segura ambientalmente.

Existem dois tipos principais de aterros para disposição de resíduos:

- Aterro sem confinamento - é o aterro direto no meio físico, sem nenhum sistema de impermeabilização de base e que apresenta, geralmente, os sistemas de drenagem de chorume, coleta de gás, monitoramento e cobertura final;
- Aterro confinado - apresenta, adicionalmente aos aterros não confinados, um sistema de revestimento de proteção simples ou duplo para minimizar o fluxo do líquido percolado no solo subjacente à camada de impermeabilização.

É importante observar que, para os resíduos sólidos urbanos (RSU's), classificados pela NBR 10.004/87 (ABNT, 1987) como pertencentes à classe de resíduos não-perigosos, os aterros sanitários devem dispor de sistemas de proteção com menos exigências ambientais que as apresentadas para os que receberão resíduos perigosos ou de origem industrial. Entretanto, isto não significa reduzir os critérios de projeto, pois sabe-se que os resíduos domiciliares podem apresentar substâncias altamente tóxicas e potencialmente poluidoras tanto quanto os resíduos industriais, de mineração ou de serviços de saúde.

2.1.3.1. Aterro Sem Confinamento

Os aterros sem confinamento partem do princípio de que os materiais, em seu estado natural, tem a capacidade de retenção de componentes perigosos presentes nos líquidos percolados, que permitem retê-lo no próprio local de disposição. Isto geralmente não ocorre, devido a complexidade dos processos de interação dos resíduos/materiais geológicos e a limitada capacidade de retenção dos componentes perigosos.

Os principais sistemas de proteção apresentados por este tipo de aterro são: sistemas de drenagem de líquidos percolados, de coleta de gás, de monitoramento, de drenagem superficial e de cobertura.

As rigorosas leis de proteção ambiental dos países desenvolvidos não permitem mais este tipo de disposição de resíduos. Como estas leis começaram a ser aplicadas, a duas ou três décadas, ainda existem aterros sanitários em operação com este conceito, que vêm sendo substituídos pelos

aterros, que partem do princípio do confinamento e minimização do fluxo de poluentes para o meio ambiente.

No Brasil, ainda existem técnicas de disposição consideradas inadequadas do ponto de vista ambiental. A disposição a céu aberto ainda é utilizada como forma de disposição de resíduos na maioria das cidades de pequeno porte (figura 1).



Figura 1 – Disposição de lixo a céu aberto.

2.1.3.4. Aterro Confinado

Atualmente, o aterro confinado é o tipo mais aceito para disposição final de resíduos sólidos das mais variadas origens e graus de periculosidade. Segundo McBEAN *et. al.* (1995), este tipo de aterro é capaz, com base nas condições geológicas e hidrogeológicas e nas técnicas apropriadas de engenharia, de conter indefinidamente os resíduos depositados e seus líquidos gerados. Na prática, é difícil conseguir este isolamento, uma vez que, mesmo nos materiais com baixíssimo coeficiente de permeabilidade, onde os efeitos de advecção são praticamente nulos, ocorrem trocas, principalmente por processos de difusão.

Os aterros confinados partem do princípio da contenção dos resíduos depositados e de seus líquidos gerados dentro da área direta do aterro. Utiliza-

se para isso técnicas de engenharia, como os sistemas de revestimento de proteção de base (camadas de impermeabilização), que são os principais elementos de contenção dos resíduos e líquidos percolados. Podem ser simples, duplos ou compostos, artificiais ou naturais. Somam-se ao sistema de impermeabilização de base, os sistemas de coleta, drenagem e tratamento dos líquidos gerados, de proteção superficial da cobertura e de monitoramento e vazamento dos líquidos oriundos dos resíduos (ver figura 2).

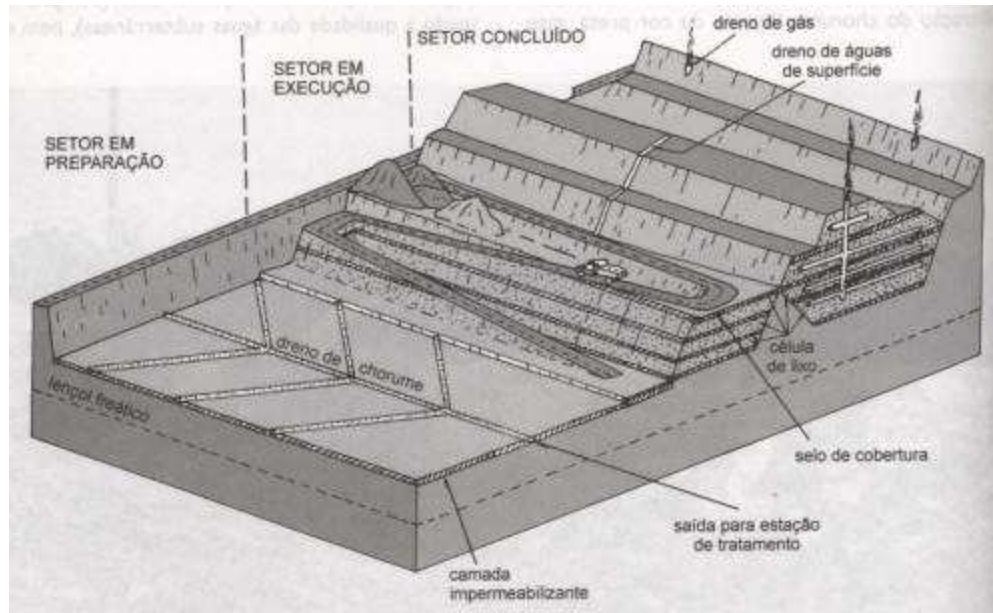


Figura 2 – Modelo de aterro sanitário. Adaptado de IPT (2000).

A respeito do sistema de proteção de base do aterro sanitário, é importante salientar que a principal característica é o seu baixo coeficiente de permeabilidade, o que minimiza o fluxo de contaminantes para as camadas adjacentes. Uma segunda observação a ser feita refere-se às variações desse elemento, que estão intimamente relacionadas ao tipo de resíduo a ser aterrado e às condições do meio físico.

Sendo assim, os aterros confinados são classificados em dois tipos, de acordo com o tipo de resíduo a ser disposto, a saber:

- Aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos;
- Aterros sanitários para resíduos perigosos.

2.1.3.4.1. Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos

É a denominação dada aos aterros sanitários para recebimento de resíduos sólidos de origem urbana, os quais contêm resíduos de origem doméstica e de serviços do comércio. Geralmente apresentam baixo grau de periculosidade ou são classificados como não-perigosos segundo a NBR 10.004/87.

Este tipo de aterro sanitário deve dispor de todos os elementos de proteção ambiental:

- Sistema de impermeabilização de base e laterais;
- Sistema de cobertura;
- Sistema de coleta e drenagem de líquidos percolados;
- Sistema de tratamento de líquidos percolados;
- Sistema de coleta e tratamento de gás;
- Sistema de drenagem superficial;
- Sistema de monitoramento.

A disposição dos resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário pode ser executada na superfície do terreno (aterros de superfície) ou em escavações naturais ou artificiais (aterros de depressões), a depender das características topográficas apresentadas pelo local de instalação do empreendimento, do grau de periculosidade dos resíduos, das condições hidrogeológicas, entre outros fatores condicionantes.

Os aterros de depressão são aqueles executados em locais específicos (depressões, ondulações, pedreira extintas, entre outros), em geral, áreas de baixo valor comercial. Este tipo de prática tem sido benéfica, pois, principalmente nos EUA e na Europa, muitos parques e áreas verdes foram construídos em áreas recuperadas. No Brasil, grandes áreas deterioradas vêm sendo recuperadas nas principais capitais, com o objetivo de utilização futura.

Por sua vez, os aterros de superfície são aqueles executados em regiões planas. Dependem de alguns fatores, tais como: disponibilidade de material de cobertura, profundidade do lençol freático, vias de acesso, tipo de solo, dimensões do terreno, entre outros.

Os resíduos podem ser dispostos a partir de três métodos, de acordo com a sua técnica de operação. Estes métodos de operação e disposição dos resíduos estão intimamente relacionados às características geológicas e geotécnicas do local. São eles (Mc BEAN *et. al.*, 1995; BIDONE & POVINELLI, 1999):

a) Método da trincheira

Fundamenta-se na abertura de trincheiras ou valas no solo, onde o lixo é disposto no fundo, compactado e posteriormente recoberto com a terra escavada. É aplicado quando o local do aterro for plano ou levemente inclinado, onde o lençol freático não está próximo à superfície. O fundo das trincheiras é geralmente coberto por uma camada de solo argiloso de baixa permeabilidade ou por uma membrana sintética ou mesmo a combinação das duas para minimizar o movimento de líquidos gerados pelo lixo para as camadas de solos adjacentes.

A figura 6a representa, esquematicamente, o método da trincheira. Já as figuras 3a e 3b mostram estágios na execução e operação de uma trincheira.



Figura 3a – Abertura de trincheira. Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).



Figura 3b – Descarga dos resíduos no interior da trincheira.
Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).

b) Método da escavação progressiva ou da meia rampa

Fundamenta-se na escavação da rampa onde o lixo é disposto no fundo, compactado e coberto com solo. É empregado em áreas planas onde o solo natural oferece boas condições para ser escavado e utilizado como material de cobertura. Aliás, esse aspecto caracteriza uma interessante vantagem do método.

A figura 6b representa, esquematicamente, o método da escavação progressiva. Na figura 4, tem-se a execução de uma célula de aterro sanitário contra uma encosta.



Figura 4 – Compactação dos resíduos contra uma encosta.
Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).

c) Método da área

É executado sobre o terreno quando este não oferece boas condições para escavações de trincheiras. Este método é comumente empregado em locais onde a topografia se apresenta de forma irregular e o lençol freático está muito próximo à superfície, sendo assim indicado em regiões baixas e alagadiças. É utilizado quando a topografia local permite o recebimento dos resíduos sólidos, sem a alteração de sua configuração natural.

A formação da célula do aterro exige o transporte e a aquisição de terra para cobertura. Nessas áreas, os resíduos são descarregados e compactados, formando uma elevação tronco-pirâmide, que recebe o recobrimento com solo ao final de um dia de operação

Esse procedimento não é correto e caiu em desuso, pois requer cuidados especiais, como rebaixamento constante do lençol freático, construção de diques ao longo da linha costeira ou dos rios, com a finalidade de evitar a contaminação das águas pelo chorume, além do

bombeamento de toda a água do local antes do início da construção do aterro. A figura 6c representa, esquematicamente, o método da área. Já a figura 5 mostra execução e operação de um aterro sanitário operado pelo método de área.



Figura 5 – Célula de aterro tronco-pirâmida executada em área.
Adaptado de BIDONE & POVINELLI (1999).

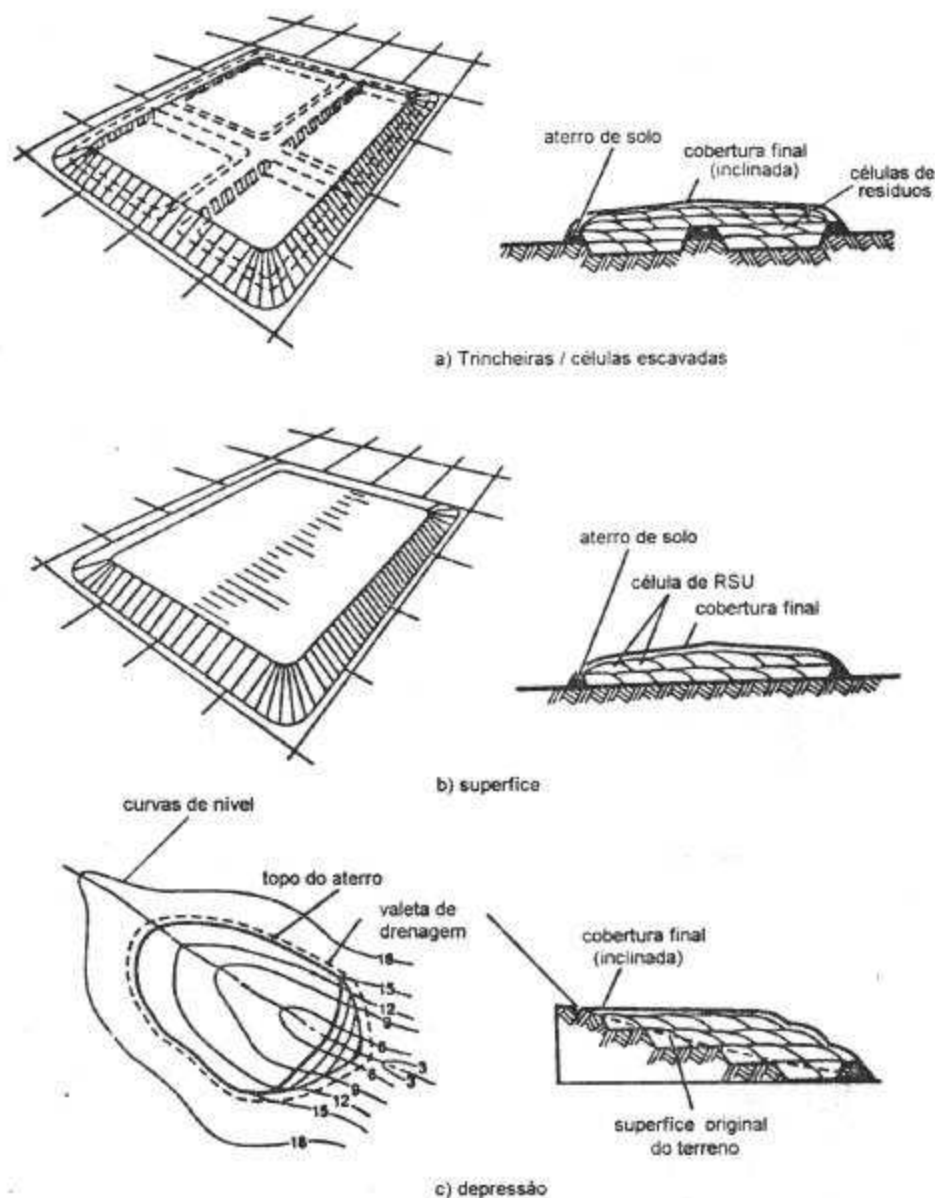


Figura 6 – Métodos de operação e disposição de resíduos.

Em todos os sistemas apresentados acima, a disposição dos resíduos é executada em células ou módulos com alturas variando entre 2 e 6 metros a fim de facilitar a operação do aterro e evitar grandes áreas de exposição de resíduos às variações climáticas.

Independente da concepção adotada, o projeto de um aterro sanitário deve ser dimensionado considerando as condições de proteção ambiental em todas as fases do projeto da obra, desde a fase de implantação, passando pela

fase de operação, até a fase de encerramento. Por lei, é exigido a elaboração de um EIA/RIMA (Estudo de Impacto Ambiental/ Relatório de Impacto Ambiental) ou um PCA/RCA (Plano de Controle Ambiental/ Relatório de Controle Ambiental), a depender do local e da área a ser utilizada.

2.1.3.4.2. Aterros para Resíduos Perigosos

Os aterros para resíduos perigosos, assim denominados, são utilizados para receber resíduos classificados como perigosos, provenientes de atividades industriais ou outro tipo de atividade geradora (KATAOKA, 2000). Diferem dos aterros sanitários para resíduos urbanos por apresentar maiores garantias de segurança com a colocação de sistemas de revestimento de proteção de base duplos ou compostos e sistemas de detecção de vazamentos, além de cuidados adicionais na operação e manuseio dos resíduos recebidos.

Os critérios para seleção e aprovação dos locais destinados a este tipo de aterro são também mais exigentes, pois os riscos de poluição ao meio ambiente são muito grandes.

Além do rigoroso critério de seleção de áreas, assim como nos aterros para disposição de resíduos sólidos urbanos, devem dispor de todos os elementos de proteção ambiental, tais como: sistemas duplo ou composto de revestimento de proteção de base e laterais do aterro, de coleta e drenagem de líquidos percolados, de detecção de vazamentos e inspeções, de coleta e tratamento de gases, de drenagem superficial, de revestimento de proteção de cobertura superficial, de monitoramento e devem contar também com rigoroso sistema de controle de recebimento de resíduos.

O tipo de configuração do aterro sanitário industrial é semelhante aos aterros para resíduos sólidos urbanos, sendo que os aterros em cavas ou trincheiras são mais utilizados, além da disposição em antigas cavidades de mineração subterrânea.

2.1.4. Sistemas de Proteção Ambiental

O projeto de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos exige a execução de alguns sistemas importantes para a proteção ambiental, os quais foram citados no item 2.1.3.4.1 e que serão abordados abaixo.

2.1.4.1. Sistema de Impermeabilização de Base e Laterais

O sistema de proteção de base e laterais tem a função de proteger a fundação do aterro, evitando-se a contaminação do subsolo e aquíferos adjacentes, pela migração de percolados e/ou dos gases, em não havendo condições naturais *in situ* favoráveis (IPT, 1995). Isto pode ser alcançado com a construção de uma camada de revestimento "impermeável" e com a garantia de que a integridade da estrutura desse revestimento se mantenha ao longo da vida útil projetada para o aterro.

A exigência de bom comportamento a longo prazo do sistema de impermeabilização está associada à dificuldade de, após recobrimento, os trabalhos de reparação só serem possíveis com enormes custos, especialmente no caso de o aterro se encontrar concluído (LOPES, 2000).

A NBR 13896/97 (ABNT, 1997), exige que seja implantada uma camada de impermeabilização inferior e superior sempre que às condições hidrogeológicas do local escolhido para a implantação do aterro não atenderem às especificações de segurança ambiental. Desta forma, a camada impermeabilizante deve ser (ABNT, 1997):

- Construída com materiais de propriedades químicas compatíveis com os resíduos, suficiente espessura e resistência de modo a evitar rupturas devido às tensões decorrentes das atividades de instalação e operação do aterro;
- Colocada sobre uma base ou fundação capaz de suportá-la, bem como resistir aos gradientes de pressão acima e abaixo da impermeabilização, de forma a evitar sua ruptura por assentamento, compressão ou levantamento do aterro;
- Instalada de forma a cobrir toda a área, de modo que o resíduo ou o

líquido percolado não entre em contato com o solo natural.

A segurança ambiental dos aterros sanitários depende fundamentalmente dos sistemas de drenagem e impermeabilização. O sistema de drenagem deve direcionar o percolado para o sistema de coleta e tratamento, minimizando o tempo de contato do percolado com a camada de impermeabilização. Cabe ao sistema de impermeabilização assegurar que a concentração com que os poluentes atinjam o lençol freático estejam dentro dos padrões estabelecidos.

Os materiais de baixa permeabilidade ou a combinação destes são utilizados na base de um aterro sanitário com o objetivo de reduzir a migração de líquidos para as camadas adjacentes (Mc BEAN *et. al.*, 1995). A camada de impermeabilização é projetada para interceptar o percolado e direcioná-lo para o sistema de drenagem de chorume, como ilustrado na figura 7.

Vários são os tipos de revestimentos aplicados para impermeabilização e confinamento dos resíduos nos aterros sanitários. O projeto de revestimento para controle de poluição tem que levar em consideração a finalidade do uso e as condições de instalação local (KATAOKA, 2000). Segundo BAGCHI (1994), os diferentes tipos de materiais usados para construção de camadas de base e cobertura final de aterros sanitários enquadram-se em três tipos: (1) solos argilosos, (2) membranas sintéticas ou outros produtos artificiais manufaturados e (3) solos melhorados ou outras misturas. Podem ser empregados solos argilosos somente ou a combinação de dois ou todos os três tipos de materiais na construção da base e da cobertura final do aterro. Cada tipo tem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na seleção de uma camada em particular. Uma comparação de custos deve também ser feita a priori. Especificações dos materiais, testes de controle de qualidade e espessura mínima permissível das camadas podem variar de um país para o outro.

Para CONSONI *et. al.* (1995), um sistema de revestimento de proteção deve apresentar características de estanqueidade, durabilidade, resistência mecânica, resistência às intempéries e compatibilidade físico-química e biológica com os resíduos a serem dispostos.

A argila compactada tem sido o material mais comumente usado para

revestimentos ou barreiras de contenção em aterros confinados. A estrutura da argila compactada depende do método de compactação. A pré-compactação torna-se um fator importante na permeabilidade resultante se a argila é compactada usando-se métodos padrões e se há secagem da mistura para sua otimização (DANIEL, 1993). A compactação da argila deve ser feita com umidade acima da ótima e com nível alto de energia de compactação, o que propicia valores mais baixos de condutividade hidráulica. DANIEL (1993) chama atenção para o fato de que os solos argilosos devem ser utilizados como barreiras naturais quando constituem espessas camadas e condutividade hidráulica com valores inferior a 10^{-6} cm/s.

Problemas com compactação podem ocorrer em períodos de chuvas prolongadas, assim como o trincamento superficial praticamente imediato de camadas compactadas em épocas quentes e secas. Para minimizar o impacto de defeitos localizados, a camada de solo compactado pode ser revestida por geomembranas.

Existem situações onde a abundância local de argila natural e recompactada pode gerar um custo eficiente e uma barreira primária confiável. Por sua vez, há também situações onde o tipo de resíduo, tamanho do aterro, local hidrogeológico e condições geotécnicas são tão inadequadas que a camada natural de solo é insuficiente para prevenir o impacto dos contaminantes no futuro. Nesses casos, um projeto apropriado envolvendo uma geomembrana como parte primária (e, se necessário, secundária) de uma camada composta também pode providenciar um ganho na proteção ambiental.

As geomembranas (também conhecidas como membranas sintéticas) e os revestimentos de argilas geosintéticas são materiais geosintéticos comumente usados para camadas de revestimento (MACARI & AZEVEDO, *apud* LIMA, 1999). As geomembranas são membranas sintéticas de permeabilidade muito baixa, feitas de polímeros (BAGCHI, 1994). Podem ser moldadas *in loco* ou pré-fabricadas.

As geomembranas pré-fabricadas são mantas flexíveis feitas de resina de polímeros sintéticos (materiais orgânicos). Os polímeros mais usados na sua confecção são: polietileno de alta densidade (HDPE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), polietileno de baixa densidade (LDPE) e o polietileno clorosulfonado reforçado (CSPE-R) (BARBOSA, *apud* LIMA, 1999).

As mantas de HDPE são consideradas as mais resistente a substâncias químicas corrosivas e são as únicas aceitas pelas normas federais alemãs.

Os revestimentos de argilas geossintéticas (*geosynthetic clay liners* - GCLs) consistem de uma combinação de geosintéticos (geomembranas e geotêxteis) com bentonita, sendo mecanicamente fixados por adesivos de costura. A bentonita expande quando em contato com água para formar um leito impermeável (BAGCHI, 1994). Este tipo de produto tem ganho grande popularidade.

A bentonita tem sido utilizada em muitas áreas de aplicação no campo geotécnico e ambiental, devido a sua baixa permeabilidade, alta plasticidade, alta capacidade de adsorção e qualidades reológicas (EGLOFFSTEIN, 1994). Podem entrar em contato com uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos quando usado como material de barreira de contaminantes na construção de camadas de aterros (REDDI e INYANG, 2000).

Os solos melhorados também têm sido utilizados para construir a base de alguns aterros quando há disponibilidade de fonte de empréstimo. O material corrigido mais utilizado tem sido a bentonita, pois esta aumenta a capacidade de absorção de água do revestimento. Quando a bentonita é hidratada, expande e conduz a uma permeabilidade variando entre 10^{-8} e 10^{-9} cm/s na camada (MACARI & AZEVEDO, *apud* LIMA, 1999).

2.1.4.2. Sistema de Cobertura

O sistema de cobertura tem a função de proteger a superfície das células de lixo, minimizando impactos ao meio ambiente, visando à eliminação da proliferação de vetores, à diminuição da taxa de formação de percolados, à redução da exalação de odores, impedir a catação, permitir o tráfego de veículos coletores sobre o aterro, à eliminação da queima dos resíduos e à saída descontrolada dos gases (IPT, 1995). Além destas características, este sistema deve ser resistente aos processos erosivos e adequado à utilização futura da área.

É composto por várias camadas, entre as quais: superficial, de proteção, de drenagem, de impermeabilização, para coleta de gás e de regularização. A camada drenante tem a função de reduzir a carga hidráulica

na barreira para minimizar a infiltração (BAGCHI, 1994), reduzir as pressões neutras a fim de melhorar a estabilidade e aumentar a capacidade de armazenamento de água da camada superior para o crescimento da vegetação. O uso da proteção ambiental é recomendado, procurando-se integrar a massa final ao meio ambiente local (IPT, 1995).

Os geotêxteis têm sido amplamente empregados nos sistemas de cobertura, como camada de proteção entre as camadas de cobertura e as camadas drenantes e, ainda, como proteção contra a erosão superficial.

2.1.4.3. Sistema Drenagem de Líquidos Percolados

Um dos problemas na operação e cuidados a longo prazo de aterros sanitários é a poluição ou a contaminação do lençol freático ou das águas superficiais próximas do aterro. Isto ocorre devido ao fluxo dos líquidos originados da própria decomposição do lixo ou outros líquidos que percolam através da massa de resíduos.

O percolado é definido pela NBR 8.419/92 (ABNT, 1992), como o líquido que passa através de um meio poroso. Esta mesma Norma Técnica, define o chorume ou sumeiro como: *"líquido produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda química de oxigênio)"*.

O sistema de drenagem de líquidos deve coletar e conduzir o líquido percolado (chorume), que atravessa a massa do aterro, através de drenos internos, reduzindo as pressões atuantes dos líquidos na massa de resíduo e minimizando o potencial de migração do mesmo no subsolo (IPT, 1995).

O sistema de dreno é caracterizado por um meio poroso de pouca declividade. Em geral, constitui-se de canaletas escavadas no solo preenchidas de pedras britadas. O projeto do sistema de drenagem deve ser orientado no sentido de conduzir todos os líquidos para um único local (figura 7). A sua concepção depende da alternativa de tratamento adotada para o aterro sanitário, podendo inclusive estar associada ao sistema de drenagem de gases.

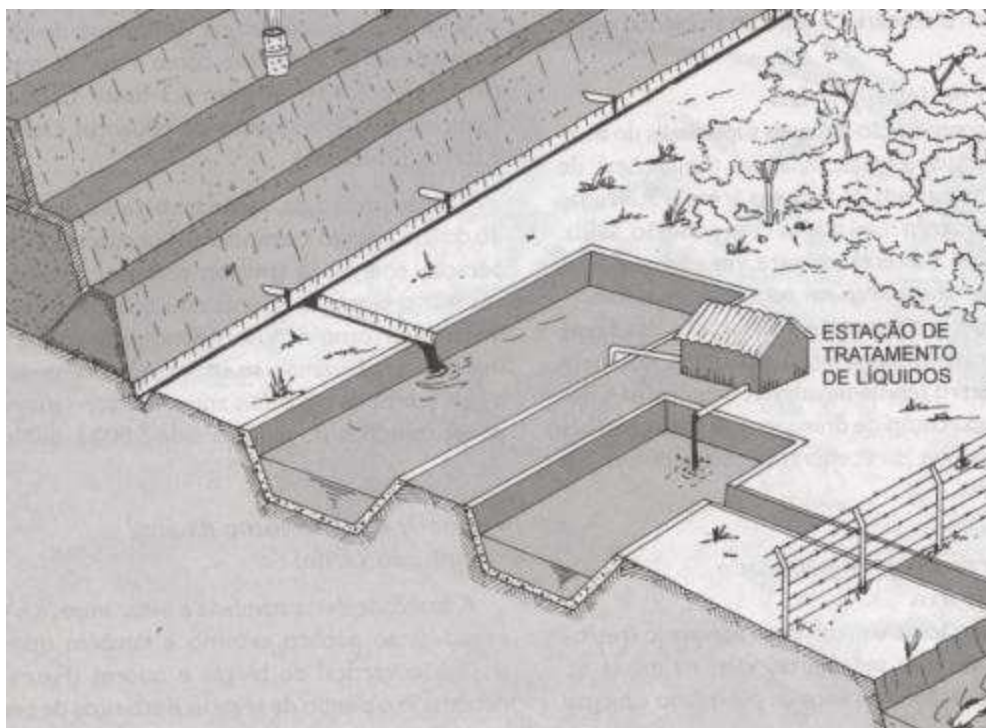


Figura 7 – Coleta e tratamento de efluentes líquidos. Adaptado de IPT (2000).

Segundo ABNT (1997), a NBR 13.896/97 exige que o sistema de drenagem para a coleta e a remoção de líquido percolado do aterro deva ser:

- Instalado imediatamente acima da impermeabilização;
- Dimensionado de forma a evitar a formação de uma lâmina de líquido percolado superior a 30 cm sobre a impermeabilização;
- Construído de material quimicamente resistente ao resíduo e ao líquido percolado, e suficientemente resistente a pressões originárias da estrutura total do aterro e dos equipamentos utilizados em sua operação;
- Projetado e operado de forma a não sofrer obstruções durante o período de vida útil e pós-fechamento do aterro.

Este sistema poderá ser projetado através de drenos de brita com tubo perfurado, direcionando os percolados até o local de acumulação, de onde

serão enviados a um tratamento adequado. Para o seu é fundamental o conhecimento da vazão a ser drenada e das condicionantes geométricas da massa de resíduos. Este dimensionamento não é uma tarefa simples devido, principalmente, a impossibilidade de se conhecer os inúmeros fatores responsáveis pelo surgimento dos veios líquidos, sendo realizada com base no cálculo do balanço hídrico do aterro.

2.1.4.4. Sistema de Coleta e Tratamento de Líquidos Percolados

Uma das formas de minimização do impacto ambiental causado pelo aterramento de resíduos é coleta, remoção e tratamento dos líquidos percolados (IPT, 1995). A coleta deverá ser realizada através de drenos de brita com tubos que compõem o sistema de drenagem de percolado, os quais conduzirão o chorume coletado até os tanques ou caixas de acumulação de onde serão direcionados a um único local para uma tratamento adequado.

Segundo ABNT (1997), a NBR 13.896/97 exige que o sistema de tratamento do líquido percolado do aterro deva:

- Ser projetado, construído e operado de forma que seus efluentes atendam aos padrões de emissão e garantam a qualidade do corpo receptor;
- Ter efluentes monitorados pelo menos quatros vezes ao dia.

Os processos de tratamento atualmente empregados são (BAGCHI, 1994; Mc BEAN *et. al.*, 1995; IPT, 1995; LIMA, 1995):

- Recirculação ou irrigação;
- Tratamento em lagoas de estabilização;
- Tratamento por ataques químicos;
- Tratamento por filtros biológicos;
- Tratamento por processo fotossintético;
- Processos mistos.

O melhor processo e o seu dimensionamento está associado à

alternativa de tratamento dos resíduos adotada para o aterro sanitário (IPT, 1995). Deverá sempre ser previsto um sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados, pois legalmente não é admissível a sua descarga em quaisquer que sejam os corpos de água, principalmente se os líquidos poluídos estiverem fora dos padrões mínimos normalizados.

2.1.4.5. Sistema de Coleta e Tratamento de Gás

A decomposição biológica do lixo resulta em efluentes gasosos. Esta atividade segue uma seqüência mais ou menos definida (LIMA, 1999):

- I) Inicialmente, a maior parte da matéria orgânica (50-60% do volume do lixo domiciliar) é metabolizada aerobicamente, com elevada temperatura e produção de gás carbônico, água, nitritos e nitratos;
- II) À medida que o oxigênio existente vai se esgotando, organismos facultativos e anaeróbios começam a predominar e continuam com a decomposição da matéria orgânica, agora, porém, mais lentamente que na fase inicial, em temperaturas mais baixas e gerando ácidos orgânicos;
- III) Finalmente, em subseqüentes reações bioquímicas, estes ácidos são convertidos em 45 a 50% de dióxido de carbono (CO_2) e em 45 a 50% de metano (CH_4), cuja mistura é conhecida como biogás.

A NBR 13.896/97 exige que todo aterro seja projetado de maneira a minimizar as emissões gasosas e promover a captação e tratamento adequado das eventuais emanções (ABNT, 1997).

O sistema de coleta destes gases consiste de drenos verticais de tubos de concreto ou plásticos perfurados e envolvidos em meio poroso, em geral, pedra britada. A prática recomenda que estes drenos sejam interligados ao sistema de drenagem de líquidos e percolados, de forma a permitirem o monitoramento de ambos paralelamente.

Apesar das incertezas, muitos projetos visando à exploração do gás metano de aterros sanitários vêm sendo estabelecidos nas últimas décadas, em todo o mundo (IPT, 1995). Os principais problemas estão relacionados à real capacidade de produção e recuperação, à impossibilidade de um perfeito

controle de determinados parâmetros como umidade, pH, potencial redox, temperatura, teor de sólidos voláteis e à presença de substâncias inibidoras do processo biológico na massa de lixo, entre outros.

O processo de tratamento mais usual tem sido a queima dos gases provenientes do aterro nos próprios drenos coletores de gases.

2.1.4.6. Sistema de Drenagem Superficial

Este sistema tem a finalidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais, durante e após, a vida útil do aterro, evitando sua infiltração na massa de resíduo.

A eliminação ou redução da quantidade de água que penetra nas células do aterro é de fundamental importância para a diminuição do volume de líquido percolado.

O dimensionamento da rede de drenagem é dependente, principalmente, da vazão a ser drenada. Os métodos de dimensionamento seguem a prática usual de drenagem urbana, em se tratando de bacias de pequena área de contribuição (IPT, 1995).

A água pluvial é coletada por canaletes associados à escadas de água e tubos de concretos. Este sistema é então direcionado para um único local, distinto do local dos líquidos percolados.

A NBR 13.896/97 exige que o sistema de drenagem de água não contaminada deva ser inspecionado regular e obrigatoriamente após tempestades, com a finalidade de manter, repor, desassorear e esgotar as bacias de contenção e de dissipação de energia, a fim de manter o sistema em operação (ABNT, 1997).

2.1.4.7. Sistema de Monitoramento

O monitoramento ambiental de um aterro sanitário visa avaliar a sua influência sobre o meio ambiente e definir ações permanentes para sua conservação (MENDONÇA, 2000). A intenção de um programa de monitoramento é determinar o grau com que o aterro e qualquer outro sistema associado está funcionando, de acordo com os objetivos do projeto. A preocupação está relacionada com o fluxo de contaminantes para fora da área

de confinamento, seja chorume ou gás (Mc BEAN *et. al.*, 1995).

Os aterros sanitários devem ser monitorados no que se referem os seguintes aspectos (Mc BEAN *et. al.*, 1995; IPT, 1995, LIMA, 1999; MENDONÇA, 2000):

- Meteorológicos (controle do índice pluviométrico, velocidade e direção do vento, período de insolação, evaporação e temperatura ambiente);
- Geotécnicos (zona aerada, movimentos horizontais e verticais em diferentes pontos do aterro e piezometria);
- Hidrológicos (quantidade e características do chorume produzido e, características da água do lençol freático a jusante e a montante do aterro);
- Físico-químicos (pressão de gás e temperatura no interior do aterro);
- Controle de recebimento do resíduo (análise do resíduo quanto a quantidade e composição).

O monitoramento deverá ser efetuado através da construção de poços de monitoramento, instalação de piezômetros, medidores de deslocamentos horizontais e verticais, medidores de vazão, análises físico-químicas e biológicas.

A frequência da coleta das amostras para as análises, assim como a técnica e os métodos utilizados de coleta são indicados pelos órgãos de controle ambiental. Por sua vez, a frequência das leituras dos marcos superficiais (deslocamentos verticais e horizontais), piezômetros, inclinômetros e medidores de vazão deverá ser definida no projeto.

O monitoramento do lençol freático deve ser constante pois avalia a eficiência dos sistemas de impermeabilização e drenagem dos efluentes. As alterações na qualidade da água são decorrentes da infiltração de chorume e gases no subsolo.

O método mais direto de monitoramento implica na perfuração de poços com locação e profundidades que interceptem o aquífero, sendo no mínimo um a montante e três a jusante (MENDONÇA, 2000). As amostras

retiradas são analisadas em laboratório, permitindo um diagnóstico da qualidade do manancial antes e depois da influência do aterro. Os poços localizados a jusante devem estar situados de forma que possam diagnosticar as posições mais críticas de caminhamento de eventuais plumas de contaminação pelo chorume.

Em aterros de grandes dimensões é imprescindível a imposição de um monitoramento geotécnico. É possível, assim, avaliar a estabilidade do maciço tanto quanto a recalques e deslocamentos, como a geração e variabilidade das pressões internas devido à formação de bolsões de chorume e gases.

O maciço também sofre modificações em seus parâmetros de resistência, que diminuem com o tempo, em parte devido a inadequação de drenagens internas e o aumento de pressões de gás e chorume.

A fim de monitorar estas alterações utilizam-se marcos superficiais e instrumentos como inclinômetros, perfilômetros, entre outros (MENDONÇA, 2000). Com os resultados obtidos organiza-se um diagnóstico periódico do comportamento do maciço que resulta em recomendações quanto aos desvios detectados. Isto permite analisar a estabilidade por métodos clássicos.

Por meio de um programa de monitoramento obtém-se subsídios para recomendações posteriores quanto à operação, efetuar investigações em pontos específicos e preparar relatórios analíticos, interpretativos e conclusivos, a serem enviados ao órgão de Controle Ambiental.

2.1.5. Aspectos Técnicos e Ambientais para Implantação de um Aterro Sanitário

A prática da boa engenharia recomenda que a implantação de um aterro sanitário seja precedida de um série de estudos que vão desde levantamentos de dados gerais passando pelos estudos de viabilização das áreas mais adequadas até a elaboração do projeto e dos planos de execução do aterro.

Deve-se ter sempre em vista a importância das características do meio físico da área para instalação do aterro sanitário. Uma área adequada significa menores gastos com preparo, operação e encerramento do aterro, mas fundamentalmente significa menores riscos ao meio ambiente e à saúde pública (IPT, 1995). Deste modo, ao escolher uma boa área, a prefeitura estará

se prevenindo contra efeitos indesejáveis da poluição dos solos e das águas subterrâneas do seu município, além de eventuais transtornos decorrentes de oposição popular.

As atividades de viabilização de áreas para a instalação de aterros sanitários exigem compatibilização de vários critérios e fatores, os quais devem manter o equilíbrio entre os aspectos ambientais, operacionais e sociais inerentes ao empreendimento.

Abaixo são citados alguns aspectos técnicos relacionados com a implantação de um aterro sanitário, a saber (BAGCHI, 1994; CANSONI *et. al.*, 1995b; PRESA *apud* LIMA, 1999; ABNT, 1997; FERREIRA *apud* LIMA, 1999):

- Dados topográficos - são informações sobre a compartimentação geomorfológica e características das unidades que compõem o relevo (colinas, encostas, talvegues, entre outras) e sobre a declividade dos terrenos. É um dos fatores mais relevantes na seleção de um local pois há uma relação muito grande entre o relevo e a ampliação dos problemas ambientais. Sendo assim, o terreno deve ter uma conformação e topografia compatíveis, onde locais de baixa declividade são preferenciais a fim de minimizar o escoamento de águas superficiais para o aterro e a ocorrência de uma elevação ou desnível natural, com o objetivo de facilitar a construção das células do lixo;
- Dados pedológicos - são as informações sobre as características e distribuição do solo na região, a identificação do tipo de solo mais indicado para material de empréstimo e a avaliação da susceptibilidade de ocorrência de processos erosivos (sulcos, ravinas, boçorocas/voçorocas, entre outros). O solo considerado apropriado é aquele de fácil escavação e de textura argilo-arenosa (baixo coeficiente de permeabilidade), que combine boa capacidade de depuração da argila e resistência de carga da areia. Considera-se desejável a existência, no local, de um depósito natural extenso e homogêneo de materiais com coeficiente de permeabilidade inferior a 10^{-6} cm/s e uma zona não saturada com espessura superior a 3,0 m;

- Dados geológico-geotécnicos - são as informações sobre as características, distribuição e ocorrência de materiais que compõem o substrato dos terrenos e das principais feições estruturais (foliação, falhas e fraturas), onde está incluso o tipo e a posição das fronteiras geológicas. Estudos sobre condutividade hidráulica, pH, capacidade de troca catiônica (CTC), salinidade, fator de retardamento, entre outros, são importantes para avaliar o tipo de interação solo/contaminante. A condutividade hidráulica é um atributo fundamental na análise da adequabilidade do terreno para uso como aterro sanitário. Estudos sobre a estabilidade dos taludes existentes, capacidade de suporte do subsolo e potencial de melhorar sua estanqueidade são também indicados;
- Jazidas de empréstimo - é importante que seja feita a avaliação da disponibilidade de material de cobertura diária (qualidade e quantidade) e da disponibilidade de material para as camadas de impermeabilização e cobertura (com baixa permeabilidade). A proximidade de jazidas de terra é muito aconselhável, a fim de que haja sempre abundância de material de cobertura. O material de cobertura indicado é aquele cuja composição apresenta 50% a 60% de areia e o restante uma mistura equilibrada entre silte e argila. Em geral, são necessários aproximadamente 1 m³ de terra para 6 toneladas de lixo;
- Dados hidrológicos - são as informações sobre os principais mananciais, bacias e corpos de água de interesse ao abastecimento público (âmbito local e regional), bem como informações sobre áreas de proteção de manancial. Deve ser avaliada a possível influência do aterro na qualidade e no uso das águas superficiais e subterrâneas. Recomenda-se que a distância mínima entre o aterro e qualquer coleção hídrica ou cursos de água seja de 200 m;
- Dados hidrogeológicos - são as informações sobre o comportamento natural da dinâmica e química das águas subterrâneas e superficiais. Deve ser feito o levantamento da posição do lençol freático e das zonas de recarga das águas

subterrâneas e a verificação das zonas de estratificação da subsuperfície. Em geral, quanto mais profundo for o lençol freático, teoricamente mais protegido estará o aquífero, uma vez que maior será a zona aeróbia do solo, a qual é importante para a atenuação dos poluentes;

- Dados Climáticos - são as informações sobre o regime de chuvas e precipitação volumétrica (série histórica), incidência solar, evaporação e evapotranspiração, umidade do ar e intensidade e direção predominante dos ventos. Esta direção deve ser, a princípio, contrária à aglomeração urbana, a fim de evitar incômodos causados pela incidência de odores desagradáveis;
- Vegetação - o estudo macroscópico da flora é importante, uma vez que a mesma pode atuar favoravelmente na escolha de uma área quanto aos seus aspectos de redução do fenômeno de erosão, da formação de poeiras e transporte de odores. Por sua vez, o local escolhido não deve causar sérios danos ao ambiente, pois tanto a flora quanto fauna devem ser analisadas e respeitadas de forma que o empreendimento tenha seus impactos negativos minimizados;
- Uso e ocupação do solo - são as informações sobre as leis ambientais de âmbito federal, estadual e municipal. É importante que uma descrição detalhada do uso e ocupação do solo da região seja feita. A área selecionada deve estar situada em um local onde a atividade seja permitida pelo zoneamento ambiental do município;
- Distância em relação à núcleos populacionais - o local mais apropriado deve estar afastado da aglomeração urbana a uma distância mínima de 500 m, a fim de não provocar incômodos aos moradores, tais como odores, fumaça, poeira, barulho de manobras de caminhões, presença de vetores, entre outros inconvenientes. Recomenda-se ainda que a distância ideal seja de 2 km;
- Distância dos centros geradores de lixo - entendendo-se como centro gerador de lixo, locais de transbordo ou centro atendido. Recomenda-se que a área deva estar situada distante de residências porém o mais próximo possível de centro de geração do

lixo, diminuindo as despesas com transporte e aumentando a produtividade da coleta. A distância ideal não deve ser superior a 30 km, em viagem de ida e volta. Valores superiores a este tornam anti-econômico o transporte direto com os caminhões coletores, o que cria a necessidade de estações de transferência;

- Acessos - fator de evidente importância, uma vez que são utilizados durante toda a operação do aterro. É desejável existir mais de uma via de acesso e evitar-se ao máximo atravessar zonas residenciais. O volume de tráfego nas estradas de acesso também precisa ser estudado, dando-se preferência àquelas de fluxo mais desimpedido, sendo necessário que o planejamento do transporte considere de forma adequada a malha viária existente. Os acessos internos e externos devem ser protegidos, executados e mantidos de maneira a permitir sua utilização sob quaisquer condições climáticas;
- Tamanho disponível e vida útil - estes fatores estão interrelacionados e recomenda-se a construção de aterros com vida útil mínima de 10 anos. A projeção futura da quantidade de lixo a ser disposta no aterro sanitário é fator preponderante para o dimensionamento da área de disposição;
- Valor venal das terras - são as informações sobre os custos de desapropriação, caso a área não seja de propriedade pública, ou mesmo de viabilidade econômica do empreendimento;
- Anteprojeto - visa o levantamento de parâmetros básicos para a elaboração do projeto definitivo, onde, obrigatoriamente, inclui o EIA/RIMA ou RCA/PCA;
- Projeto básico - com o anteprojeto aprovado, sucede-se o detalhamento de todos os desenhos e plantas (de situação e locação, baixa do terreno, perfis longitudinais e transversais, entre outras), as especificações técnicas, custos e cronogramas e os memoriais descritivos e de cálculo;
- Projeto executivo - deve estar de acordo com o projeto anterior. São definidas as etapas e prazos de execução de atividades que devem ser obedecidas regularmente e visam manter uma boa administração e organização do aterro. São atividades previstas o

preparo das vias de acesso, das áreas de emergência, do leito do aterro, do sistema de tratamento e captação dos líquidos percolados e gases, entre outras;

- Projeto de encerramento - tem como objetivo a concepção de um plano de encerramento do aterro, prevendo-se a recuperação da área utilizada e sua ocupação final.

Uma das principais dificuldades enfrentadas na implantação de um aterro sanitário é, sem dúvida, a escolha de uma área que reúna boas condições técnicas, econômicas e ambientais (MASSUNARI *et. al.*, 2000). Isto, normalmente, é feito a partir de uma criteriosa pesquisa de áreas favoráveis, seguido de um processo de hierarquização que permita, então, orientar a sua escolha final.

O estudo de alternativas de locais é considerado um importante instrumento de planejamento ambiental, pois muitos impactos ambientais podem ser evitados ou minimizados com a escolha de um local adequado para a implantação do empreendimento.

Os trabalhos de viabilização exigem, assim, a compatibilização de vários fatores, buscando-se o equilíbrio entre os aspectos sócio-econômicos, as alterações no meio ambiente e os custos inerentes ao empreendimento (ABGE, 1998). Isso faz com que a seleção de áreas seja um processo seqüencial de etapas que se complementam. É importante que o processo seja conduzido desta forma, partindo de estudos gerais, com a individualização das várias áreas homogêneas, das quais as de melhor potencial serão priorizadas para identificação de locais a serem submetidos a estudos de detalhe, cujos custos são mais elevados.

2.2. Principais Metodologias para Avaliação e Seleção de Áreas

2.2.1. Introdução

No passado, para a escolha de local de disposição de resíduos, considerava-se o subsolo de alta permeabilidade (arenito ou solos porosos) como ideal, pois imaginava-se que o volume de água do lençol freático teria a capacidade de diluir e dispersar ou atenuar o chorume. Estima-se que com isso

aproximadamente 75% dos 75.000 depósitos de lixo dos EUA causaram poluição do lençol freático (BOSCOV, *apud* LIMA, 1999), já que a maior parte destas áreas estavam localizadas em regiões onde os aquíferos eram recarregados com as águas provenientes das precipitações (Mc BEAN *et. al.*, 1995).

Devido as reações aos problemas identificados, a abertura de depósitos de resíduos tem rapidamente evoluído para modernos aterros sanitários. Exemplos de problemas e subseqüentes resoluções incluem problemas de fumaças e odores, os quais levaram a decidir em parar a queima de resíduos sólidos nos locais dos aterros; problemas com roedores, insetos e estética que conduziram para o uso da cobertura de solo diariamente; diferencial e ajuste global do potencial do fogo que levaram ao aumento dos esforços da compactação dos resíduos; e a potencial poluição das águas subterrâneas, a qual conduziu as operações de cobertura, construção de camadas de impermeabilização, bermas e sistemas de coleta de chorume e gás (Mc BEAN *et. al.*, 1995).

O resultado destas mudanças é uma evolução considerável na prática de disposição final de resíduos sólidos. Após anos de estudos, o enfoque do projeto de aterros sanitários passou a ser "*manter os resíduos em confinamento*" e os especialistas concluíram que as características ideais para o subsolo seria baixa permeabilidade, nível do lençol freático baixo, alta capacidade de adsorção e boa capacidade de suporte.

A atitude da população em relação à presença do aterro é particularmente negativa se o local de instalação do mesmo localiza-se na vizinhança de sua residência ou trabalho. Apesar de conscientes da necessidade de implantação dos aterros de resíduos, os cidadãos são pouco informados ou mesmo desmotivados a procurar informações.

Os vizinhos de aterros sofrem com os ruídos, pó, odores e a presença de pássaros. A oposição na localização de um aterro não está apenas no ambiente localizado, mas também no que se refere as reclamações sobre a segurança no tráfego de veículos, na cobertura do lixo, e na contaminação das águas subterrâneas que podem acontecer há longas distâncias ao redor da área de operação do aterro. Os administradores precisam reconhecer, ao início do processo de seleção de local, que local ideal não existe.

Os procedimentos para identificar e selecionar um local envolvem

despesas consideráveis devido, a oposição crescente, o alto custo de confirmar os atributos de um local e o número limitado de localizações que atenderão o critério para disposição,. O custo de disposição está subindo muito e rapidamente. Neste capítulo serão examinados uma série de metodologias disponíveis, desenvolvidas no Brasil ou no exterior, que foram propostas para o processo de seleção de local.

Para otimizar os recursos disponíveis para os estudos das áreas mais adequadas para este tipo de empreendimento impactante é necessário que se faça uso de uma boa metodologia nos processos de seleção de áreas.

2.2.2. Metodologias para avaliação e seleção de áreas

Uma metodologia é um conjunto de conceitos, postulados técnicos, métodos, classificações, recursos tecnológicos de investigações e computacionais utilizados para desenvolver um estudo e que deve estar relacionado às condições sócio-econômicas vigentes, às características dos técnicos da região ou país e à densidade de informações existentes (ZUQUETTE, 1993).

Para Mc BEAN *et. al.* (1995), uma metodologia para seleção de áreas para implantação de aterros sanitários tem que organizar a busca da área mais favorável. A evolução dos estudos tem que ser capaz de ordenar e aplicar os fatores de seleção da área de maneira lógica e defensiva.

Diversas propostas metodológicas têm estabelecido critérios e procedimentos buscando sistematizar e objetivar o processo de seleção de áreas para aterros de resíduos.

2.2.2.1. Mc BEAN *et. al.*

Mc BEAN *et. al.* (1995) apresentam diferentes metodologias para análise e avaliação de áreas para implantação de aterros sanitários. O método de análise a ser aplicado numa situação específica está diretamente relacionado ao estágio de avaliação da área e à disponibilidade de dados da caracterização geológico-geotécnica dos locais disponíveis, analisando seus possíveis efeitos ao meio ambiente. Dentre os vários métodos destacam-se: método do fim específico (*Ad Hoc method*), método da lista de conferência

(*Checklist method*), método econômico, método cartográfico, método da comparação conjunta (*Pairwise comparison method*) e método da matriz.

O método *Ad Hoc* é baseado no julgamento profissional e na descrição dos impactos, sem explicitar o critério adotado. Comparam-se alternativas sem usar qualquer método declarado para ordenar explicitamente as preferências. Utiliza-se a prática de reuniões entre especialistas de diversas áreas, para se obter dados e informações, em tempo reduzido, imprescindíveis à conclusão dos estudos. Este método envolve julgamento profissional, sendo difícil de explicar ao público.

Já o método *Checklist* compara e avalia alternativas em um conjunto de critérios sem regras de compensação. Os resultados são expressos com respostas simples sim/não.

No método *econômico*, tenta-se representar todos os aspectos econômicos de um projeto em termos monetários. Custos e benefícios são expressos em termos da *vontade* dos indivíduos em pagar pelos benefícios.

Por sua vez, o método *cartográfico* compara e avalia alternativas utilizando mapas e é usado nas fases de identificação de locais.

No método *Pairwise comparison*, utiliza-se uma comparação sequencial de alternativas duas a duas como base para o subsequente ordenamento de preferências.

O método da matriz utiliza uma matriz para resumir, comparar e avaliar os critérios e as alternativas. A matriz descritiva mostra apenas as propriedades e confia no julgamento profissional para ordenar as preferências, o que o torna uma simples extensão do método *Ad Hoc*.

2.2.2.2. CANSONI *et. al.*

CANSONI *et. al.* (1995b) propõem uma compatibilização de vários fatores, buscando-se o equilíbrio entre os aspectos sociais, as alterações no meio ambiente e os custos inerentes ao empreendimento. Parte-se de estudos gerais, identificando-se as várias áreas potenciais, sendo priorizadas as mais promissoras para os estudos de detalhe. São necessárias três etapas: levantamento de dados gerais, pré-seleção (escala regional), estudos para a viabilização de áreas pré-selecionadas (escala local).

Na etapa "*levantamento de dados gerais*" lança-se mão das informações existentes no acervo da prefeitura e de outros órgãos municipais ou estaduais, conforme os seguintes dados: dados populacionais, características do lixo, dados da coleta e transporte atual do lixo.

Como resultado desta etapa, tem-se a possibilidade de estimar a produção de lixo ao realizar o cruzamento dos dados populacionais (população permanente, flutuante e projetada), com as características do lixo e a eficiência do sistema de coleta. A partir do volume de lixo gerado diariamente, calcula-se a chamada célula diária de lixo. As dimensões desta célula teórica são um indicador para o tipo de aterro a ser efetuado.

Na próxima fase, denominada "*pré-seleção de áreas*", um conjunto de dados do meio físico e sócio-econômicos deve ser analisado, a fim de que sejam pré-selecionadas áreas potencialmente aproveitáveis para instalação do aterro. Normalmente, pouca atividade de campo é desenvolvida nesta etapa de trabalho, lançando-se mão, o máximo possível, do acervo de informações já existentes, abrangendo os aspectos relacionados aos dados: geológico-geotécnicos, pedológicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos, climáticos, legislativos e sócio-econômicos.

Ainda segundo CANSONI *et. al.* (1995b), caso existam áreas previamente indicadas pela municipalidade, estas serão analisadas prioritariamente. Somente se estas áreas forem "*não recomendáveis*", outros locais deverão ser buscados.

A ponderação dos diversos dados considerados e a análise integrada destes, permitem a identificação das zonas mais favoráveis, nas quais, através de uma vistoria de campo, serão individualizadas as candidatas à instalação do aterro (CANSONI *et. al.*, 1995b), o que resultará na classificação das áreas selecionadas em uma das seguintes categorias: "*recomendado*" - quando pode ser utilizada nas presentes condições, atendendo às normas vigentes com baixo investimento; "*recomendado com restrições*" - quando pode ser utilizada necessitando de medidas complementares de médio investimento; "*não recomendado*" - quando não se recomenda sua utilização em função da necessidade de medidas complementares de alto investimento.

Caso várias áreas sejam classificadas como *recomendada* ou *recomendada com restrições*, CANSONI *et. al.* (1995b) sugerem sua priorização, sendo executada a próxima etapa em no máximo três delas, tendo

em vista os custos daqueles trabalhos. Se, ao contrário, todas as áreas disponíveis forem avaliadas como inviáveis, o processo deverá ser revisto e re-executado, até que áreas adequadas sejam obtidas.

Com as áreas pré-selecionadas, pode-se passar para a próxima etapa dos estudos, com a indicação do local mais apropriado. Nesta fase, denominada "*estudos para a viabilização das áreas pré-selecionadas*", são fundamentais os trabalhos de campo, através do levantamento de dados do meio físico, com investigações de superfície e de subsuperfície. São trabalhos de carácter local e objetivam conhecer as características das áreas pré-selecionadas na etapa anterior.

A análise e a interpretação das informações coletadas determinarão qual das áreas é a mais indicada para a instalação do aterro sanitário, considerando-se os aspectos sociais, ambientais e financeiros.

2.2.2.3. LIMA

LIMA (1999) propõe uma metodologia de avaliação e hierarquização de um universo pré-definido de objetos. É de aplicação universal e seu desenvolvimento baseia-se inicialmente na "*análise do valor - AV*" e, num segundo momento na "*lógica fuzzy - LF*". A AV é orientada para a análise e solução de problemas, constituindo um esforço deliberado para identificar e seleccionar o método de menor custo. Segue os clássicos passos do processo decisório:

- Definir o problema, analisá-lo, definir o objetivo e seu escopo;
- Estabelecer alternativas;
- Avaliar as conseqüências de cada alternativa (abordagem funcional);
- Escolher a melhor alternativa (seleção de idéias);
- Implementação (ação decorrente da decisão).

A aplicação da metodologia objetiva a prestação de um serviço tendo contudo um produto final que deve atender uma série de critérios e expectativas (LIMA, 1999). Apresenta, fundamentalmente, três fases:

preparatória, informativa ou analítica e conclusiva.

Na fase "*preparatória*", questiona-se qual o objeto ou recurso a ser estudado. Procura-se, assim, identificar o objeto a ser estudado ("*O que estudar? A implantação de um aterro sanitário.*"), esclarecer o objetivo a ser atingido ("*Qual o objetivo em questão? Acondicionar adequadamente o lixo urbano.*") e definir os grupos interessados no objetivo em questão ("*Quais os interessados? Como usuário, tem-se: a população local, o município e o órgão ambiental competente; como fornecedor do serviço, tem-se: o responsável pela operação, podendo ser o município ou empresa terceirizada.*").

Na fase "*informativa ou analítica*" é enfatizada a identificação, descrição, custeio e análise das funções do objeto ou recurso estudado. Segundo LIMA (1999), nesta fase, a teoria da AV busca a satisfação das necessidades dos consumidores através da oferta das funções necessárias, valendo-se dos recursos que possam oferecê-las ao menor custo possível, garantidas a qualidade e a segurança.

As funções requeridas pelo usuário de um objeto podem ter diferentes graus de necessidades e importância para ele, sendo divididas como básicas ou principais e secundárias ou auxiliares. Para aterro sanitário, "*assegurar salubridade*" e "*minimizar impactos*" são definidas como funções básicas requeridas pelos usuários.

A seguir, descrevem-se as funções que concorrem, produzem e suportam as funções requeridas pelo usuário, e denominadas de funções "*definidas pelo fornecedor do objeto*", conforme proposta de LIMA (1999). Assim, para "*assegurar salubridade*" foram descritas as funções "*garantir segurança da população local*", "*controlar vetores*" e "*evitar odores*". Para minimizar impactos, foram descritas as funções "*assegurar estanqueidade*" e "*proteger flora e fauna*". "*Minimizar custos*" é a função mais relevante definida pelo fornecedor e também a mais difícil de ser desempenhada, pois, segundo LIMA (1999), não poderá ser priorizada em relação às demais. Deve-se buscar a minimização de custos sem que o desempenho desejado pelos usuários seja alterado. O quadro 1 relaciona cada função com o aspecto técnico avaliado nas funções adotadas por LIMA (1999).

Quadro 1 - Função e aspecto técnico relacionado.

Função	Aspecto técnico
--------	-----------------

Garantir a segurança da população vizinha	Distância em relação à área: o local mais apropriado deve estar afastado da aglomeração urbana a uma distância mínima de 2 quilômetros.
Minimizar o preço	Valor da área: o uso do solo na região deve comportar a presença do aterro e sua aquisição ser economicamente viável.
Dispor de infra-estrutura	Infra-estrutura: o local escolhido deve oferecer infra-estrutura (água, luz, esgoto e telefone).
Dispor de boas condições de acesso	Acesso: deve haver a integração da malha viária e prover vias de acesso em boas condições de tráfego, mesmo em épocas de chuva.
Distar centro produtores	Distância dos centros produtores de lixo: a área deve estar situada distante de residências, porém o mais próximo possível do centro de geração do lixo. Sendo considerado 30 km a distância ideal em viagem de ida e volta.
Oferecer topografia compatível com o projeto	Dados topográficos: a área deve ter conformação geomorfológica e topográfica compatíveis com o projeto de instalação de um aterro sanitário.
Oferecer climatologia favorável	Clima: estudos sobre o regime das chuvas, evapotranspiração, direção predominante dos ventos, etc.
Promover durabilidade	Capacidade volumétrica: a área escolhida para implantar o aterro deve ter vida útil estimada em mais de 10 anos.
Dispor de material para recobrimento diário	Jazidas de material de cobertura: avaliação da disponibilidade de material de cobertura, quantidade, qualidade e distância.
Dispor de solo adequado	Dados pedológicos: são informações sobre as características e propriedades do solo da região.
Proteger os cursos de água superficiais	Dados hidrológicos: conjunto de informações sobre os principais corpos de água de interesse ao abastecimento público. Recomenda-se distâncias superiores a 200 metros.
Ser favorecido por legislação	Legislação: referem-se às informações sobre as leis ambientais e de zoneamento urbano de âmbito federal, estadual ou municipal. Assim, a área escolhida deve estar dentro das considerações exigidas por lei.

Fonte: Adaptado de LIMA (1999).

Para simular a avaliação das funções definidas, LIMA (1999) emprega a "*Matriz de Avaliação Funcional*", criada por MUDGE (CISILLAG, *apud* LIMA,

1999), que compara entre si todas as funções que são desempenhadas por um objeto (aterro sanitário), estabelecendo valores a serem creditados a uma função, todas as vezes que esta for mais importante ou necessária que cada uma das outras.

Um grupo de n especialistas avalia 13 funções propostas com conceitos de importância ou necessidade. Cada matriz preenchida fornece um *ranking* ordenado, em que cada função ocupa uma posição. As posições finais destacam a opinião mais próxima à maioria do grupo (LIMA, 1999).

As funções são classificadas de acordo com sua importância/necessidade relativa segundo os níveis: 3 *pontos* - função muito mais importante ou necessária que a outra; 2 *pontos* - função significadamente mais importante ou necessária que a outra; 1 *ponto* - função pouco mais importante ou necessária que a outra; 0 *ponto* - função de igual importância ou necessária que a outra.

A metodologia AV procura determinar o "*valor relativo*" de cada função exigida, que inclui o custo ou percentual de custo, avaliando as funções que merecem maior atenção ou estudo, no sentido de aumentar o desempenho funcional esperado do projeto (LIMA, 1999). Considera-se o custo total do objeto como 100% e as parcelas do custo de suas funções como percentuais do total do custo do objeto. Com isso, monta-se a "*Matriz de Custeio de Funções*", onde analisa-se cada componente procurando atribuir quanto de seu custo é utilizado para cumprir a função, variando de zero (parte que não cumpre função) até 100% (toda parte cumpre apenas uma função). Determina-se assim a percentagem do custo total correspondente a cada parte, e soma-se o percentual da função no custo total do objeto.

Segundo LIMA (1999), a relação "*desempenho/custo*" é o indicador que sinaliza quais são as funções críticas em um aterro sanitário. O desempenho funcional é aquele atribuído a cada função na "*Matriz de Avaliação Funcional*" e o custo funcional é a resultante da "*Matriz de Custeio de Funções*". Valores desta relação inferiores a 1 (um), destacam funções que requerem maior atenção e estudo durante a implantação de um aterro sanitário. Sendo assim, soluções eficientes que minimizem o custo destas funções serão importantes.

A fase "*conclusiva*" compreende a escolha, a implantação e o acompanhamento do projeto. É nesta fase que é feita a escolha da alternativa

mais viável, ou seja, aquela que previne os impactos ambientais e evite os elevados custos para a recuperação ambiental.

LIMA (1999), durante o desenvolvimento da metodologia, opta, numa segunda etapa, pela aplicação de modelos "fuzzy" de decisão para a seleção de áreas. A "Lógica Fuzzy" é uma extensão da lógica convencional (*boolean*). As áreas pré-selecionadas devem satisfazer aos atributos ou parâmetros relevantes para a instalação de um aterro sanitário. Atributos como topografia, geologia, pedologia, acessos, hidrologia, climatologia, valor da terra, entre outros são denominados "*variáveis lingüísticas*". Cada atributo é relacionado a um conjunto de "*termos lingüísticos*", dentro de um conjunto referencial (escalas de peso) e são associados a uma "*função de pertinência*".

A tomada de decisão no ambiente "fuzzy" é orientada a esclarecer incertezas, as quais se referem aos graus de pertinência de um determinado elemento. As opiniões individuais são agregadas através da média para se obter a comparação das importâncias relativas de cada função.

Ao utilizar a "*Matriz de Avaliação Funcional*" da AV, obteve-se a opinião de *n* especialistas sobre a importância ou necessidade relativa de cada função ou atributo concernente aos critérios para escolha de área de disposição de resíduos urbanos (LIMA, 1999). As opiniões são agregadas através da média ponderada para se obter o consenso e cada atributo assume uma posição no "*ranking*" final de importância. Cada área pré-selecionada é submetida a uma avaliação, em que suas características referentes a cada atributo serão enquadradas nos níveis de aceitação: "*nível 1 - não aceito*"; "*nível 2 - aceito com restrições*"; "*nível 3 - recomendado*".

2.2.2.4. ANDRADE

ANDRADE (1999) apresenta uma metodologia computacional, abrangendo os aspectos relacionados ao ambiente dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG's). Os procedimentos empregados envolvem a definição de parâmetros de inclusão e exclusão, análises de rede e sobreposição topológica, todos desenvolvidos no âmbito de um SIG. Para a realização dos diagnósticos, são consideradas as características do meio ambiente físico e questões de caráter social e econômico do município, além da legislação ambiental brasileira e normas técnicas propostas por órgãos de

renome nacional.

Na fase posterior, correspondente à produção cartográfica e definição de critérios, ANDRADE (1999) utiliza mapas de uso do solo, modelo de elevação do terreno (DEM), declividade, vulnerabilidade geotécnica, lineamento estrutural, hidrogeológico, unidades de conservação, entre outros. Com estes dados em mãos, procede-se à identificação de critérios e zonas "*tampão*", ou seja, zonas em que não é permitido a construção de aterros sanitários devido às suas peculiaridades. Utiliza-se para isso a lógica booleana, onde 0 corresponde as áreas impróprias e 1 as áreas aptas à instalação do aterro sanitário, em função do aspecto analisado.

Na terceira etapa, emprega-se a técnica de sobreposição topológica e reclassificação em todos os mapas produzidos no fase anterior combinados dois a dois. A operação de sobreposição topológica computa a interseção geométrica de dois mapas que tenham feições poligonais e cria um novo, preservando as características e os atributos originais dos dois mapas. As duas classes de uso possíveis são: "*apropriado*" e "*não apropriado*".

Sendo assim, a reclassificação das feições existentes é realizada conforme os critérios definidos, logo após a sobreposição. Segundo ANDRADE (2000), prevalece sempre o uso mais restritivo sobre o menos restritivo. Por exemplo, um polígono fruto da sobreposição de outros que tenham os atributos "Apropriado" e "Não Apropriado", será reclassificado como "Não Apropriado" e assim por diante. Caso existiam muitos polígonos com dimensões abaixo do mínimo necessário para serem aproveitados para aterros sanitários, processa-se uma reclassificação por área mínima.

2.2.2.5. MASSUNARI *et. al.*

MASSUNARI *et. al.* (2000a) propõem procedimentos metodológicos específicos, primeiramente para a pesquisa de áreas favoráveis à implantação do aterro sanitário e em seguida para a hierarquização destas áreas, com o objetivo de orientar a escolha do local. Procuram contemplar aspectos técnicos, ambientais, econômicos e operacionais.

Na fase "*pesquisas de áreas*", a metodologia compreende a análise integrada de condicionantes técnicos, legais, antrópicos, naturais e econômicos. Procede-se ao levantamento e à análise da legislação municipal,

estadual e federal e dos estudos existentes, no que se refere ao zoneamento do uso do solo, áreas urbanas e de expansão, planos diretores, projetos localizados, áreas de proteção aos mananciais, áreas de preservação e outras normas específicas, com o objetivo de identificar as restrições existentes à localização de aterros sanitários. Procura-se também aproximações com representantes de organizações não-governamentais a fim de obter informações, bem como a participação destas entidades.

Com todas as restrições levantadas na atividade anterior, procede-se ao mapeamento e delimitação das restrições. Com o objetivo de delimitar o espaço onde deve ser concentrada a pesquisa da área, MASSUNARI *et. al.* (2000a) recomendam lançar sobre o mapa de restrições, dois círculos com raios de 10 e 20 km a partir do centro da cidade.

Delimitadas as áreas restritas, realiza-se uma análise nas áreas remanescentes situadas no raio de 20 km. Isto tem a finalidade de identificar as regiões mais favoráveis à implantação do empreendimento impactante, com base no exame de fotografias aéreas e mapas topográficos, o que permite orientar o trabalho de pesquisa de campo.

Um vez identificadas as regiões mais favoráveis, MASSUNARI *et. al.* (2000a) orientam a efetuar trabalhos de pesquisa de campo para localizar sítios adequados e verificar possíveis interferências e atributos de cada local, tais como: dimensões (vida útil) e topografia da área, característica da cobertura do solo (argiloso ou arenoso), disponibilidade de solo para empréstimo, afloramento de rocha, presença de nascentes de água, presença de formações vegetais importantes, uso e ocupação do solo da área, distância de núcleos urbanos, distância em relação ao centro de geração de lixo, condições do acesso viário, etc. Com as informações obtidas em campo, procede-se a pré-seleção para identificar os locais que reúnem requisitos mínimos necessários. Essas áreas são submetidas ao processo de hierarquização, com a finalidade de permitir a escolha de três alternativas.

MASSUNARI *et. al.* (2000a) selecionam alguns indicadores técnicos e ambientais e estabelecem critérios de pontuação e ponderação da importância relativa de cada indicador. Todos os indicadores recebem pontuações variando de 1 a 10, onde quanto maior a pontuação mais favorável é a área, de acordo com a sua maior adequação para a implantação do aterro sanitário. É definida também a aplicação de um coeficiente de ponderação da importância, variando

de 1 a 5, onde o maior valor é aplicado aos indicadores de maior importância.

Com os indicadores estabelecidos e os critérios adotados, procede-se à soma da pontuação das áreas pré-selecionadas. A que apresentar as melhores condições de implantação, ou seja, maior pontuação, será considerada apta. É fundamental, segundo MASSUNARI *et. al.* (2000b), verificar também o atual depósito de lixo da cidade.

2.2.2.6. KATAOKA

KATAOKA (2000) propõe uma metodologia baseada no preenchimento de planilhas para gerenciamento ambiental. A planilha tem com objetivo uniformizar os critérios de análise dos EIA/RIMA, além de documentar todo o processo de aprovação e solicitação de complementações. Esta proposta foi desenvolvida para aplicação na avaliação de áreas para implantação de aterros sanitários industriais. O princípio básico é a comparação de dados apresentados frente às exigências necessárias aos estudos numa visão exclusivamente técnica, considerando os componentes do meio físico, biológico e sócio-econômico.

Com o objetivo de avaliar a qualidade das informações obtidas nas planilhas propostas, adota-se o procedimento de atribuição de pontuações para cada item da planilha. Dentro da avaliação destes itens, os que apresentarem maior grau de importância receberão o maior número de pontos quando o estudo estiver sendo executado corretamente e os resultados apresentarem condições favoráveis de segurança ao meio ambiente e à saúde pública. No caso de ocorrerem deficiências nos estudos ou os resultados apresentarem condições desfavoráveis à implantação do empreendimento impactante, a pontuação é menor, podendo chegar a zero quando as condições são totalmente desfavoráveis.

Com base nestes critérios, o valor máximo atribuído para determinado item da planilha atinge 3 pontos, correspondendo aos estudos considerados fundamentais e às pontuações máximas com valores menores (2 pontos e 1 ponto) são atribuídas para os itens de importância secundária. A pontuação total dos itens da planilha corresponde a 100 pontos.

A proposta de avaliação considera três faixas de pontuação: "*análise*

inadequada" (<51 pontos); *"análise regular"* (51-80 pontos); *"análise adequada"* (>80 pontos).

2.2.2.7. COELHO

COELHO (2000) propõe uma metodologia em que a seleção de áreas deve processar-se por fases, do geral para o particular, isto é, da escala regional (1:100.000 a 1:50.000) para a grande escala ou escala local (1:25.000 a 1:10.000), de forma a passar da análise de uma grande área à análise de um número discreto de pequenas áreas de trabalho, com maiores probabilidades de conterem locais candidatos favoráveis. Estes locais candidatos são então avaliados com maior pormenor à escala local, visando a seleção de uma área (ou de um pequeno número de áreas alternativas) mais favoráveis à localização do aterro sanitário.

O desenvolvimento deste processo envolve geralmente três fases: seleção preliminar, seleção definitiva e demonstração da viabilidade do local escolhido.

Segundo COELHO (2000), cada uma destas fases dá origem a um relatório com objetivos diferentes. O relatório da fase preliminar deverá conter a indicação de um série de locais candidatos e a sua classificação. O relatório da seleção definitiva deverá indicar um, dois ou, no máximo, três sítios candidatos, selecionados entre os locais anteriores. Segue-se o estudo mais pormenorizado dos locais selecionados, incluindo a execução de programas de trabalhos de prospecção (prospecção geofísica, prospecção mecânica e ensaios *in situ*) visando uma primeira caracterização das condições geotécnicas e hidrogeológicas locais. O terceiro relatório encerra a questão da viabilidade, em geral com dois assuntos fundamentais: a viabilidade financeira e a viabilidade das condições geotécnicas e hidrogeológicas.

Esta abordagem por fases da pequena escala à grande escala é sobretudo típica da forma de seleção de locais conduzida pelas autoridades nacionais e/ou regionais de Portugal.

A fase inicial, denominada *"delimitação da área inicial de estudo"*, consiste num estudo de gabinete, na escala de 1:50.000 a 1:25.000, com base em informação existente e facilmente acessível. A área de investigação inicial é delimitada com base na análise da localização dos centros produtores de

resíduos e da distância máxima economicamente viável, bem como nas limitações e possibilidades decorrentes dos instrumentos de planejamento em vigor.

Na fase intermediária ou "*identificação e classificação de sítios possíveis*", procedem-se visitas de reconhecimento, com apoio de especialistas consultores de várias especialidades (geologia, hidrogeologia, geotecnia, ambiente, etc.), visando identificar os locais possíveis e avaliar os custos e benefícios ambientais de cada área. Sugere também a consulta de entidades e de pessoas interessadas e afetadas visando identificar outras questões potenciais específicas de cada local.

Na fase posterior, denominada "*avaliação dos possíveis sítios e seleção final dos sítios candidatos*", tem-se a identificação de medidas de proteção e soluções de projetos para diferentes sítios alternativos. Em consulta com o cliente, responsáveis locais e partes afetadas e interessadas, seleciona-se um ou dois locais candidatos e elaboram-se estudos prévios e recomendações de medidas de proteção.

Com as etapas anteriores realizadas, procede-se a fase final ou "*preparação dos requisitos para o prosseguimento dos estudos necessários ao pedido de licença preliminar*". É nesta fase que ocorrem os estudos locais necessários à consolidação da exequibilidade.

2.2.2.8. Outras Propostas

ALLER *et. al.*, *apud* LIMA, (1999), apresentam o método DRASTIC, desenvolvido para a US EPA (United States Environmental Protection Agency). Este método compara a adequação de diferentes alternativas de locais, com base no potencial relativo de poluição das águas subterrâneas. Trabalha com informações referentes à profundidade do nível d'água subterrâneo, declividade, condutividade hidráulica do aquífero, entre outras.

CUNHA & PARZANESE, *apud* LIMA, (1999), propõem uma metodologia baseada em um conjunto de critérios de uso e ocupação do solo, sociais e do meio físico. A identificação dos critérios fundamenta-se em dados bibliográficos e levantamentos feitos em campo. Os tipos de áreas são classificados em: "*adequada*", "*possível*" e "*inviável*". Entretanto, a proposta metodológica não deixa bem claro como tal classificação é feita.

ZUQUETTE *et. al.*, *apud* LIMA, (1999), propõem uma metodologia que considera um conjunto de 32 atributos baseados em aspectos geológicos com o objetivo de orientar a elaboração de um mapeamento geotécnico. Estes atributos são estabelecidos dentro de alguns campos de conhecimento e são associados à escolha de locais para disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários. O procedimento classifica cada atributo de uma área em "*favorável*", "*moderado*", "*severo*" ou "*restritivo*".

GALVES *et. al.*, *apud* LIMA, (1999), apresentam uma metodologia baseada na função de utilidade de multi-atributos da análise de decisão, o que permite que aspectos geo-ambientais e econômicos sejam enfatizados. Trabalha com a caracterização de cada área pré-selecionada dado um conjunto de objetivos, onde é medido o grau em que cada objetivo é encontrado. Este método não estabelece a importância relativa entre objetivos definidos.

VALENTINI, *apud* LIMA, (1999), propõe um sistema multi-critério formado por uma matriz constituída das categorias ambientais organizadas por prioridades e dos indicadores de impacto qualificados de acordo com a severidade. A confecção de uma matriz e seu desenvolvimento resultará um valor, sendo que o maior será o local mais impactante e o menos aceito ambientalmente.

LANGE (1998), enfatiza a multidisciplinaridade das investigações e avaliações das áreas selecionadas para disposição final de resíduos. Trabalha com princípios científicos de métodos de avaliação de segurança, onde descreve três passos a serem seguidos para avaliação de locais: seleção dos locais, investigação e avaliação. Estas avaliações não só produzem dados necessários para a análise de segurança, mas também para o planejamento e operação do aterro.

VIEIRA & LAPOLLI (2001), descreve, para o levantamento de áreas adequadas, uma análise sob critérios técnicos, sociais e ambientais utilizando técnicas de geoprocessamento. Este procedimento visa a facilitar à tomada de decisões quanto as alternativas a serem implementadas. Apresenta uma análise técnica *boolean*.

2.2.3. Discussão das metodologias

Na maioria das propostas metodológicas, observa-se um seqüência lógica durante o seu desenvolvimento. Indicam um sítio favorável que responda com o grau mais elevado possível à ocorrência de condições naturais favoráveis a uma localização ambientalmente menos impactante e condições favoráveis que permitam minimizar os custos e a desvalorização de recursos e de valores sócio-econômicos, ou seja, que constitua uma localização tecnicamente correta, economicamente viável e socialmente justa.

Por sua vez, em nenhuma região existe um “*sítio ideal perfeito*” que satisfaça simultaneamente e no mais elevado grau todos os requisitos para a implantação de um aterro sanitário. Ao analisar as metodologias apresentadas, nota-se que existem áreas inadequadas e áreas adequadas e, dentro destas últimas, é de esperar que existam locais potencialmente mais adequados, cada um deles caracterizado por aspectos mais favoráveis e outros menos favoráveis.

Uma metodologia, para ser considerada completa, deve englobar todos os aspectos ambientais, técnicos e sócio-econômicos. Duas dentre as metodologias apresentadas possuem forte tendência para avaliar apenas um dos aspectos citados anteriormente.

Mc BEAN *et. al.* propõem a utilização de metodologias direcionadas ao estudo de impacto ambiental e apresentam alguns métodos clássicos para avaliação de impactos ambientais.

Tanto CANSONI *et. al.* quanto COELHO procuram desenvolver as suas metodologias em etapas seqüenciais. Iniciam-se os estudos em nível regional, passando pela análise dos dados existentes e pré-seleção de áreas adequadas até a escolha final baseada nos ensaios de caracterização local. Por sua vez, ambos não deixam claro como procede-se a etapa de pré-seleção, onde ocorre a indicação das áreas potenciais para a implantação do aterro sanitário.

Ao analisar a proposta de LIMA, observa-se, diferentemente das outras, a adoção de duas metodologias interdependentes. A primeira, denominada *análise de valor* e a segunda, *lógica fuzzy*. Este método permite a introdução da importância relativa entre objetivos definidos ao utilizar o custo de implantação como indicador. Apesar da proposta minimizar uma das principais dificuldades encontradas na seleção de áreas para empreendimentos impactantes, ou seja, o grau de incerteza, que é inserido através da *lógica fuzzy*, a mesma pode ter a sua aplicabilidade aprimorada. Para isso, torna-se

necessário envolver toda a metodologia em um ambiente computacional, o que daria agilidade e eficiência.

MASSUNARI *et. al.* propõem uma metodologia que tem como diferencial a aplicação de um coeficiente de importância sobre os fatores analisados como prioritários na identificação de áreas potenciais. A sequência envolve um trabalho considerável, principalmente pelo fato de utilizar manualmente os mapas que irão orientá-los na localização das áreas adequadas. Ao inserir esta proposta em um ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) seria possível agilizar os procedimentos adotados.

A metodologia proposta por ANDRADE apresenta uma característica destacável: a introdução de análises espaciais automatizadas. Para isso, utiliza-se um ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) que orienta a tomada de decisão pelo analista. Trabalha com a *lógica boolean*, ou seja, funções que identificam apenas áreas aptas e não aptas à implantação do empreendimento. Apesar do grande avanço tecnológico, a proposta tem um aspecto a ser aprimorado: o grau de incerteza, que pode ser inserido ao utilizar a *lógica fuzzy*, ao invés da *lógica boolean*.

KATAOKA propõe a utilização de uma planilha a ser preenchida, a qual aborda os aspectos ambientais, técnicos e sócio-econômicos. A planilha em si apenas avalia uma área específica, não sendo possível selecionar um local de uma determinada região.

Um aspecto importante das metodologias é o papel da comunidade. O propósito básico de participação pública é permitir a introdução das percepções dos cidadãos e grupos de interesse para melhorar a qualidade da decisão. Destacam-se as metodologias propostas por Mc BEAN *et. al.*, CANSONI *et. al.*, ANDRADE, COELHO e MASSUNARI *et. al.*, que introduzem discretamente a participação das comunidades envolvidas através de seus representantes legais. Sem esforços válidos para incorporar a opinião pública na seleção e operação de locais, é pouco provável que os locais sejam aprovados.

Em qualquer caso, é necessário entender que o processo de seleção de uma área é um passo extremamente importante que condiciona o futuro desenvolvimento do projeto e exploração do empreendimento às condições naturais do local. A seleção de um local desfavorável poderá ter implicações negativas em termos de custos de construção, de exploração, de manutenção

e de reabilitação após o encerramento, bem como, a longo prazo, em termos ambientais. É neste contexto que estão inseridas as propostas apresentadas anteriormente. O quadro 2 apresentam um resumo dos aspectos positivos e negativos das metodologias.

Quadro 2 – Resumo dos aspectos positivos e negativos das metodologias.

Metodologia	Aspectos		Observações
	Positivos	Negativos	
McBEAN et. al.	Prevê estudos de impacto ambiental.	Preocupação exclusivamente ambiental.	
CANSONI et. al	Étapas sequenciais e reconhecimento técnico do local; envolve critérios técnicos, ambientais e sociais.	Pouca agilidade (análise manual); falta de clareza na pré-seleção das áreas.	Com o uso da informática, pode-se adquirir agilidade.
LIMA	Inserção da variável custo e utilização da lógica <i>fuzzy</i> (não restritiva).	Excesso de teoria e pouca agilidade.	Com o uso do SIG pode-se adquirir agilidade.
ANDRADE	Envolve análises espaciais em ambiente SIG; apresenta critérios técnicos, ambientais e sociais.	Muito restritivo (técnica <i>boolean</i>).	Com o uso da lógica <i>fuzzy</i> pode-se inserir a análise de adequabilidade.
MASSUNARI et. al	Envolve um estudo espacial e ponderação de critérios; envolve critérios técnicos, ambientais e sociais.	Pouca agilidade (análise espacial em mapas analógicos).	Com o uso do SIG pode-se adquirir agilidade.
KATAOKA	Envolve uma planilha de pontuação de critérios; envolve critérios técnicos, ambientais e sociais.	Não seleciona áreas; apenas analisa uma área pré-existente.	
COELHO	Étapas sequenciais e reconhecimento técnico do local; envolve critérios técnicos, ambientais e sociais.	Pouca agilidade (análise manual); falta de clareza na pré-seleção das áreas.	Com o uso da informática, pode-se adquirir agilidade.

3. Materiais e Métodos

3.1. Descrição do Material

Para a realização do trabalho prático proposto foram utilizados vários materiais cartográficos digitais, equipamentos e programas, detalhados a seguir:

3.1.1. Materiais Cartográficos Digitais

- Cartas plani-altimétricas produzidas pelo IBGE na escala de 1:50.000 (1978) com equidistância vertical de 20 metros entre curvas de nível;
- Cartas temáticas produzidas pelo IBGE (1992);
 - Geologia na escala 1:100.000;
- Cartas temáticas produzidas pelo IBGE (1983a e 1983b);
 - Geomorfologia na escala 1:250.000;
 - Pedologia na escala 1:250.000.
- Mapa produzido pela EMCAPA (1999);
 - Unidades Naturais na escala 1:400.000.
- Cartas temáticas produzidas pelo IBGE (1983c, 1983d e 1997);
 - Malha Viária na escala 1:50.000;

- Hidrografia na escala 1:50.000;
- Divisão Político-Administrativa.
- Imagem LandSat 7 nas Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 (1999);

3.1.2. Equipamentos

- Computador tipo PC Pentium II, 300 MHz, 128 Mb de RAM, HD 4.3 Gb, CD Player 36X e monitor de vídeo SAMSUNG SVGA 14" - utilizado no processamento dos dados digitais;
- Receptor GPS PROXR TRIMBLE e GPS GARMIN SRVY II - utilizado no levantamento das coordenadas de campo;
- Impressora HP DeskJet 1120C Printer - utilizada na impressão final dos resultados.

3.1.3. Programas

- Software GIS Idrisi32, Version I32.2, maio de 2001, © The Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis - utilizado na geração, manipulação e análises espaciais das imagens em formato *raster*;
- Software GIS ArcView 3.2a, © Environmental Systems Research Institute, Inc. - utilizado na execução do *layout* final das imagens *raster* para impressão.

3.2. Descrição da Metodologia

3.2.1. Introdução

A proposta metodológica de pesquisa e avaliação de áreas para implantação do aterro sanitário utilizando *lógica fuzzy* e *análise multi-critério* compreende o levantamento e a análise de condicionantes operacionais,

legais, ambientais e sócio-econômicos, seguidos, conseqüentemente, da aquisição, armazenamento, descrição e posterior análise, em nível espacial, desses dados georeferenciados.

De um modo geral, os processos de decisão pretendem satisfazer um ou múltiplos objetivos, e são desenvolvidos com base na avaliação de um ou vários critérios (EASTMAN, 1997). No caso particular da localização do aterro sanitário, trata-se essencialmente de um processo de decisão de natureza *multi-critério*, no sentido em que são considerados na avaliação diversos atributos do problema. O processo de decisão poderá consistir na avaliação das áreas com maior adequabilidade para o uso em estudo, dentro de um determinado espaço geográfico.

Um outro aspecto que tem constituído preocupação nessa análise é a questão do risco associado à decisão. Num problema *multi-critério* está implícita a avaliação de diferentes aspectos que contribuem (a favor ou contra) para uma decisão. A forma de combinar os critérios, a consideração de todos ou apenas parte deles (os melhores, os piores, os médios, ou qualquer combinação), a forma como uns critérios podem compensar outros, são aspectos que assumem grande importância nas decisões, particularmente em contextos de recursos escassos. Entre as atitudes mais extremas de risco na avaliação – conservadoras e arriscadas – pode haver lugar a cenários de avaliação que sejam mais compatíveis com as condições que contextualizam a decisão.

3.2.2. Avaliação Multi-Critério

Começando pela definição básica, *Decisão* é a escolha entre alternativas. As alternativas podem representar diferentes localizações, planos, classificações ou hipóteses sobre um fenómeno. Por exemplo, a escolha entre três classificações de aptidão (*Alta, Média, Baixa*) para um determinado uso do solo relativamente a uma determinada parcela de terreno é um ato que se designa por *Decisão*.

A decisão é suportada pela consideração de *Critérios*, que representam condições possíveis de quantificar ou avaliar e que contribuem para a tomada de decisão. Os critérios podem ser de dois tipos: *Restrições* e *Fatores*.

Os critérios servem de norma para julgar os melhores locais para

localização do aterro sanitário. São eles:

- *Ambientais;*
- *Operacionais;*
- *Sócio-econômicos.*

As restrições estão fundamentadas em critérios *boolean* (verdadeiro ou falso) que cerceiam ou limitam a análise a regiões geográficas específicas. As restrições diferenciam áreas aptas das não aptas (CALIJURI, 2000). Na maioria dos casos, uma restrição traduz-se na criação de limitações ao espaço de análise, definindo as alternativas não elegíveis que deverão ser excluídas do espaço inicial de soluções possíveis (RAMOS & MENDES, 2001). Por isso, serão identificadas áreas que não podem, ou melhor, não são aptas à implantação do aterro sanitário, como, por exemplo, áreas de preservação ambiental ou mesmo próximas aos mananciais.

Já os fatores, são critérios que definem algum grau de aptidão para todas as regiões geográficas (CALIJURI, 2000). Normalmente esta aptidão é medida numa escala contínua e de forma a abranger todo o espaço de solução inicialmente previsto (RAMOS & MENDES, 2001). Por isso, serão identificados e relacionados a uma função que represente, da melhor forma possível, a variação da adequabilidade no espaço geográfico. Por exemplo, à medida que aumenta a distância do sistema viário, aumenta-se, de acordo com uma função, o custo de transporte por parte dos caminhões basculantes, onerando, sensivelmente, o custo operacional do aterro.

A avaliação e seleção de áreas aptas à implantação de um aterro sanitário implica em uma decisão entre várias alternativas possíveis, com base em alguns critérios. Nesse trabalho, as restrições diferenciam áreas ou alternativas que podem ser consideradas aptas para destinação final de resíduos sólidos daquelas que não são aptas sob condição alguma. Por sua vez, os fatores definem áreas ou alternativas em termos de uma medida contínua de aptidão, realçando ou diminuindo a importância de uma alternativa em consideração naqueles locais fora das restrições absolutas.

A *Regra de Decisão* é o procedimento através do qual os critérios são combinados para chegar a uma determinada avaliação, incluindo a própria comparação entre avaliações no sentido de produzir decisões (RAMOS &

MENDES, 2001). Tipicamente, as regras de decisão incluem procedimentos para normalizar e combinar diferentes critérios, resultando um índice composto e uma regra que regem a comparação entre alternativas utilizando este índice. Em outras palavras, a regra de decisão é o procedimento pelo qual os critérios eleitos, fatores ou restrições, são combinados.

A forma como os dados disponíveis influem na definição da adequabilidade de uma área à implantação de um aterro sanitário no município estudado foi definida considerando-se os diferentes critérios, normalmente adotados na seleção de locais para esse propósito. Como resultado, alguns dados foram classificados em escores em função de sua aptidão para o uso desejado, tomando-se fatores, e outros, em barreiras absolutas, impedindo o uso da área, tomando-se restrições.

3.2.3. Padronização dos Critérios

A padronização é essencialmente um processo de conversão dos valores dos dados originais em escores de adequabilidade ao propósito desejado, aplicando-se os critérios preestabelecidos através de pertinência a conjuntos, isto é, de sua associação ao conjunto de áreas para a implantação de um aterro sanitário.

Normalmente, os valores de diferentes critérios não são compatíveis entre si, o que inviabiliza a sua agregação. Para resolver este problema é necessário padronizar ou normalizar cada um dos fatores para uma mesma escala de valores.

A maior parte dos processos de normalização utilizam os valores máximo e mínimo para a definição da escala. A forma mais simples é uma variação linear definida da seguinte forma (EASTMAN, 1997):

$$X_i = \frac{(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} * (IntervaloNormalizado) \quad \text{(Equação 1)}$$

em que R_i é o valor de escore a normalizar e R_{min} e R_{max} são os escores

mínimo e máximo, respectivamente.

O processo de normalização é, na sua essência, idêntico ao processo introduzido pela *Lógica Fuzzy*, segundo a qual um conjunto de valores expressos numa dada escala é convertido em outro comparável, expresso numa escala normalizada (por exemplo, 0-1 ou 0-255). O resultado expressa um grau relativo de pertencer a um conjunto (designado por "*fuzzy membership*" ou possibilidade) que varia de 0.0 a 1.0 ou 0 a 255, indicando um crescimento contínuo desde não-pertence até pertence total. Segundo ZADEH (1965), *"a teoria do conjunto fuzzy é, em suma, o passo seguinte de aproximação entre a precisão da matemática clássica e a imprecisão do mundo real."*

O conjunto *fuzzy* é uma generalização de conjunto ordinário. É definido a partir de um domínio contínuo, com graus de pertinências variando de 0 a 1 ou 0 a 255, após a normalização. Na teoria geral, a pertinência ou afirmativa de um dado fenómeno é relativa. Com o advento dessa teoria, obteve-se uma estrutura conceitual apropriada de tomada de decisão pois a lógica *fuzzy* auxilia a diminuir a subjetividade na escolha e a aumentar o raciocínio no processo de decisão.

Desta forma, nenhum fenómeno interveniente é absoluto, como, por exemplo, a distância do local em relação às áreas urbanizadas. A sua aplicação é extremamente conveniente como complemento para ocorrências indefinidas ou relativas, principalmente porque permite caracterizar locais de maior ou menor adequação para serem utilizados como aterros sanitários de resíduos sólidos (MAHLER & LEITE, 1998).

Nos sistemas de informações geográficas esta lógica pode ser implementada através de rotinas computacionais chamadas de objetos *fuzzy* (alguns sistemas já possuem módulos FUZZY - baseados na aplicação universal desta lógica - entre eles, o GIS *Idrisi32*, *I32.2*, utilizado neste trabalho).

Quando se trabalha com modelos *fuzzy* aplicados às ciências ambientais, as seguintes regras devem ser observadas (RIBEIRO, 1996):

- Alternativas: um conjunto de atributos, produtos, ações, ou seja, itens que ajudem na elaboração de estratégias para uma

determinada tarefa, por exemplo, a escolha de um local;

- Atributos: cada alternativa é composta por um conjunto de características e estas devem ser separadas em grupos para posterior avaliação;
- Objetivos: os conjuntos de atributos selecionados pelo interessado devem ser classificados de acordo com os objetivos principais;
- Preferências: a relativa importância de cada atributo dentro dos objetivos deve ser listada de acordo com o seu grau de importância e se surgem subdivisões de objetivos estes devem ser chamados de interatributos.

Segundo KURTENE & BADENKO (1999), quando um módulo com algoritmos *fuzzy* é integrado a um SIG ele cria novos dados, de onde a informação e o conhecimento são construídos a partir do algoritmo no banco de dados espacial (figura 8).

Sistema de Informações Geográficas

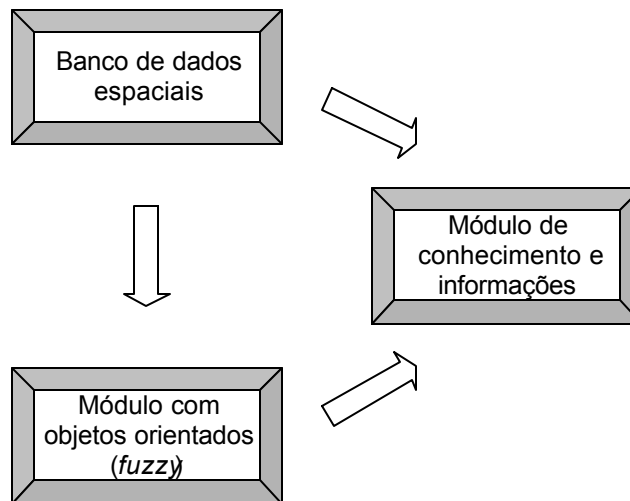


Figura 8 - Aplicação de objetos orientados *fuzzy*.

No âmbito da Geotecnia Ambiental, tem-se aplicado a lógica *fuzzy* para diversas finalidades como, por exemplo, na escolha de áreas para aterros sanitários. Nestes estudos, os resultados têm mostrado que as operações *boolean* (método baseado na lógica *binária* - base matemática dos SIG's

convencionais) apresentam uma falha de 35% na seleção de áreas potenciais para este fim quando comparado às análises realizadas utilizando lógica *fuzzy* (CHARNPRATHEEP & GANER, 1996)

Para a normalização dos critérios, várias são as funções que podem ser utilizadas para reger a variação entre o ponto mínimo e o ponto máximo. Algumas das mais utilizadas, designadas por funções *fuzzy* ou, mais genericamente e na terminologia anglo-saxónica, "*fuzzy set membership functions*", são: *Sigmoidal*, *J-Shaped*, *Linear* e *Definida pelo Usuário* (ZADEH, 1965; EASTMAN, 1997; CALIJURI, 2000; RAMOS & MENDES, 2001). Estas funções estão indicadas nas figuras 9, 10, 11 e 12.

A função *Sigmoidal* é a função mais usada na teoria de conjuntos *fuzzy*. Utiliza-se, para descrevê-la, uma função cosseno. A operação requer as posições, ao longo do eixo X, de quatro pontos que indiquem a forma da curva, como indicado na figura 9. Os pontos *a*, *b*, *c* e *d* representam os pontos de controle da curva. As figuras 9a, 9b, 9c e 9d mostram as diferentes possibilidades da função *Sigmoidal* e as posições dos pontos de controle.

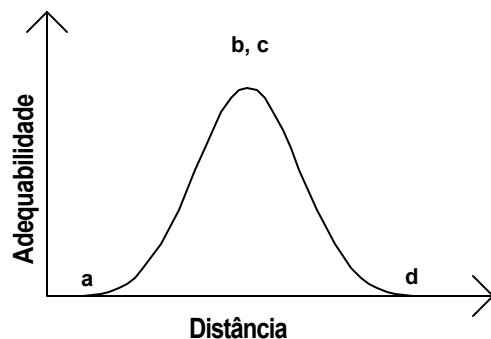


Figura 9a – Função sigmoidal simétrica sem patamar

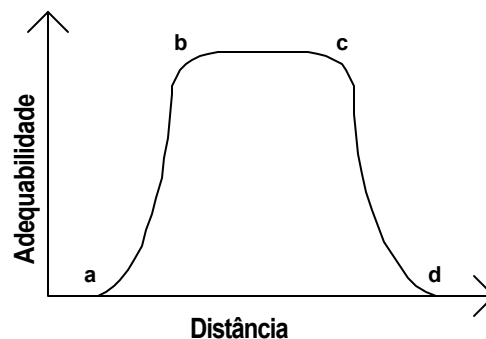


Figura 9b – Função sigmoidal simétrica com patamar

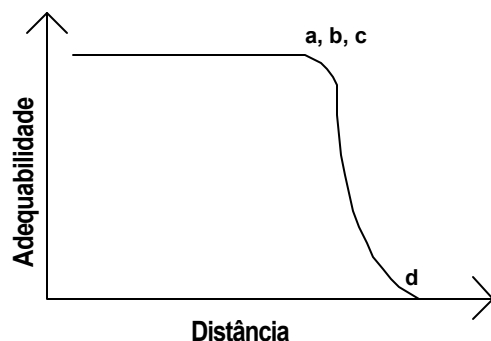


Figura 9c – Função sigmoidal decrescente

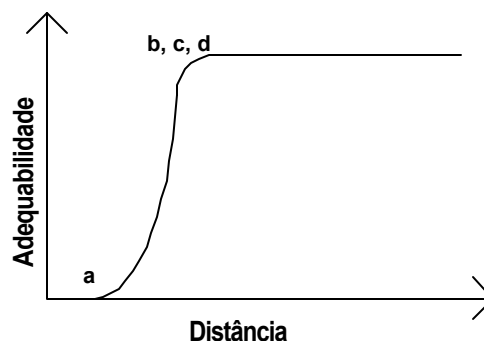


Figura 9d – Função sigmoidal crescente

Figura 9 - Função sigmoidal.

A função *J* também é comum. As figuras 10a, 10b, 10c e 10d mostram

as diferentes possibilidades da função J e as posições dos pontos de controle. É importante observar que a curva da função J aproxima-se de zero quando a abscissa tende ao infinito.

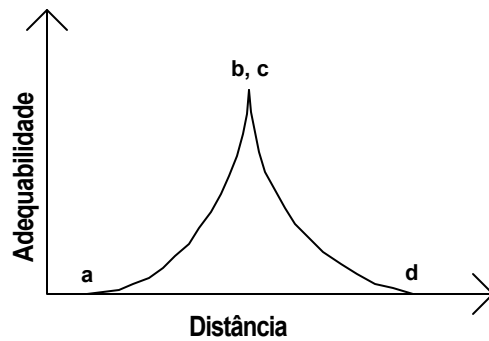


Figura XXa - Função J simétrica

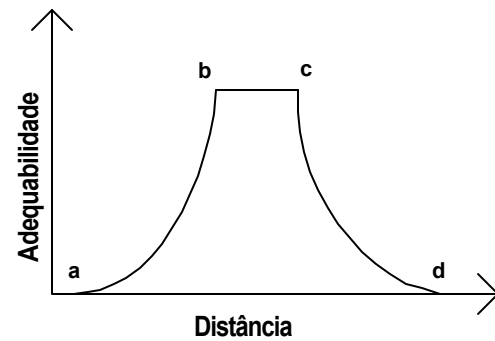


Figura XXb - Função J simétrica

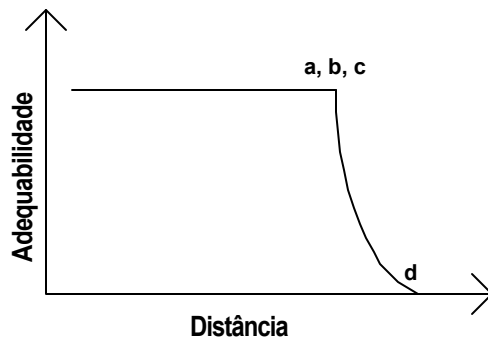


Figura 10c – Função J decrescente

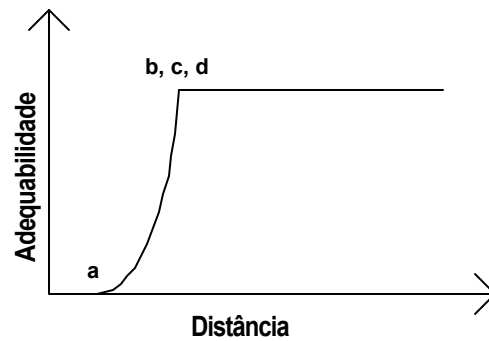


Figura 10d – Função J crescente

Figura 10 - Função J .

A função *Linear*, suas variações e seus pontos de controle podem ser observados nas figuras 11a, 11b, 11c e 11d.

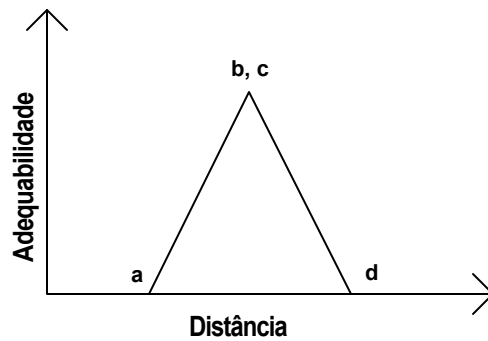


Figura 11a – Função linear simétrica sem patamar

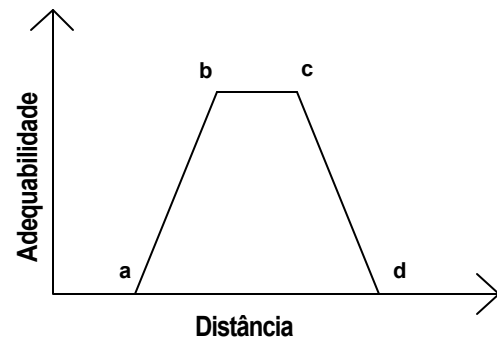


Figura 11b – Função linear simétrica com patamar

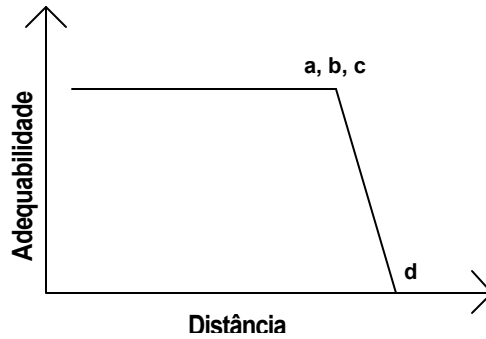


Figura 11c – Função linear decrescente

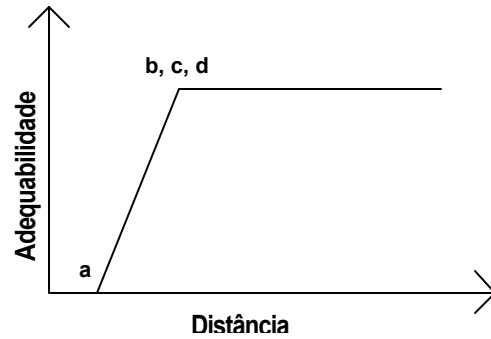
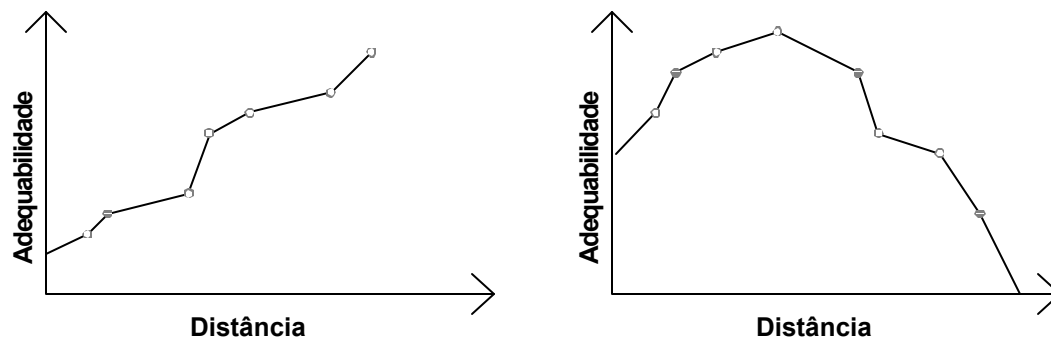


Figura 11d – Função linear crescente

Figura 11 - Função linear .

Quando a relação entre os valores e a função *fuzzy* não estão relacionadas com as três acima, as funções *Definidas pelo Usuário* são mais aplicáveis. A função *fuzzy* entre dois pontos de controle é linearmente interpolada, como mostra a figura 12.



○ Ponto de controle

Figura 12 - Funções definidas pelo usuário

Nesta etapa, foi utilizado o conceito de lógica FUZZY, inserido no módulo FUZZY do *Idrisi32, I32.2*, para dar a todas as localizações um valor representando seu grau de adequabilidade. As restrições, entretanto, mantiveram seu caráter *boolean* (aptas ou não aptas) rígido. Os fatores passaram por uma padronização *não-boolean*, em que foram padronizados a uma escala contínua de adequabilidade de zero, a menos adequada, a 255, a mais adequada. A escala de [0-255] foi utilizada com o objetivo de propiciar uma melhor definição dos valores, pois a mesma apresenta uma faixa de valores que permite uma adequada distribuição do escore, principalmente quando comparado com a escala [0-1].

3.2.4. Avaliação de Pesos para os Critérios

Uma das grandes dificuldades muitas vezes encontradas num processo de decisão que envolve múltiplos critérios é a forma como se deve quantificar a importância relativa de cada um deles, ao que acresce o fato dos mesmos possuírem graus de importância variáveis para diferentes decisores. Portanto, é necessário definir qual a importância relativa de cada critério no processo de decisão, o que é feito normalmente atribuindo um determinado peso a cada critério interveniente. A correta atribuição de pesos é importante para que sejam mantidas as preferências dos decisores.

Nesta etapa foi desenvolvida uma correlação e uma ponderação envolvendo rotinas de apoio a decisão em SIG utilizando o *Idrisi32, I32.2*. Foi proposta uma relação de importância entre os fatores envolvidos no processo. Essa relação envolveu um conjunto de suposições sobre os fatores que permita, além de qualificar o porquê da importância de um em detrimento do outro, também quantificar essa importância. Isso advém da necessidade de atribuir diferentes valores relativos a cada um dos fatores no processo de agregação.

Segundo CALIJURI (2000), a ponderação do fator é também conhecida como valor de compensação atribuída a cada fator. A ponderação indica a importância relativa de todos os fatores e regula a compensação entre eles. O grau em que um fator pode compensar outro é determinado por seu fator ou compensação de peso.

Embora não se possa afirmar que exista um método consensual para a

definição de pesos, encontram-se na literatura várias propostas de procedimentos para este efeito (VOOGD, 1983; WINTERFELDT & EDWARDS, 1986; MALCZEWSKI, 1999). Alguns desses métodos são apresentados em RAMOS (2000), tais como: métodos baseados no ordenamento de critérios; métodos baseados em escalas de pontos; métodos baseados em distribuição de pontos; método baseado na comparação de critérios par-a-par.

Neste trabalho, optou-se por trabalhar com o método baseado na comparação de critérios par-a-par, presente no algoritmo do programa utilizado nas análises. O módulo WEIGHT, do *Idrisi32*, *I32.2*, utiliza esta técnica de comparação de pares para desenvolver um conjunto de pesos cujo somatório é a unidade.

Os fatores foram comparados dois a dois, em termos de sua importância relativa. Depois de todas as possíveis combinações entre dois fatores, o módulo calcula um conjunto de pesos e uma razão de consistência. A razão indica qualquer inconsistência que tenha ocorrido durante o processo de comparação.

O módulo WEIGHT permite ajustes repetidos à comparação e relaciona os novos pesos e razão de consistência para cada interação.

3.2.5. Combinação dos Critérios

Uma vez normalizados os escores dos critérios para um intervalo fixado [0-255], estes já podem ser agregados de acordo com a regra de decisão. Existem diversos métodos de combinação de critérios (para uma descrição extensiva ver MALCZEWSKI, 1999). Nas seções seguintes apresentam-se dois procedimentos que, no âmbito dos processos de decisão de natureza espacial, objetivo geral do trabalho aqui proposto, são mais relevantes: a Combinação Linear Ponderada (WLC – Weighted Linear Combination) e a Média Ponderada Ordenada (OWA – Ordered Weighted Average).

Identificando-se a relação de importância entre os fatores (ambientais, operacionais e sócio-econômicos), procedeu-se à agregação, utilizando tanto o módulo MCE-WLC (Multi-Criteria Evaluation - Weighted Linear Combination / Combinação Linear Ponderada) quanto o módulo MCE-OWA (Multi-Criteria Evaluation - Ordered Weighted Average / Média Ponderada Ordenada) de

apoio à tomada de decisão do *Idrisi32*, 132.2. O resultado do procedimento, acima descrito, terá como consequência a geração de uma imagem de adequabilidade caracterizada pelos critérios apresentados e, principalmente, pela técnica de agregação utilizada.

3.2.5.1. Combinação Linear Ponderada – WLC

O procedimento WLC (VOOGD, 1983) combina os fatores através de uma média ponderada, dada pela equação:

$$S = \sum_i W_i * X_i \quad (\text{Equação 2})$$

em que S é o valor final do escore, W_i é o peso do fator i e X_i é o valor normalizado para o mesmo fator. Dado que o somatório dos pesos é a unidade, o valor final vem calculado na mesma escala dos valores normalizados.

Nos casos em que, para além dos fatores (que expressam escalas de valores contínuos), aplicam-se também restrições (que se expressam na escala binária 0/1), o procedimento pode ser alterado multiplicando o valor calculado com base nos fatores pelo produto das restrições:

$$S = \sum_i W_i * X_i * \prod_j c_j \quad (\text{Equação 3})$$

onde c_j é o escore (0/1) da restrição j .

A mais importante característica do procedimento WLC é o fato de permitir a compensação entre fatores ("*trade-off*"), o que significa que uma baixa adequabilidade em um dado fator, pode ser compensada por um conjunto de boas adequabilidades em outros.

3.2.5.2. Média Ponderada Ordenada – OWA

YAGER (1988) introduziu uma nova perspectiva de análise através de outro procedimento de agregação de fatores. Esta técnica, além de utilizar os pesos de critérios usados no procedimento WLC, considera outro conjunto de pesos que não estão especificamente ligados a quaisquer fatores, mas que lhes são aplicados por uma ordem que depende do valor dos fatores após aplicação normal do primeiro conjunto de pesos.

Este procedimento denomina-se OWA e estes novos pesos denominam-se "*order weights*" (pesos ordenados), visto que sua aplicação depende da ordenação dos fatores a serem agregados (EASTMAN *et. al.*, 1998).

Depois da aplicação do primeiro conjunto de pesos aos fatores (tal como no procedimento WLC), os valores resultantes (agora ponderados) são ordenados do valor mais baixo para o mais elevado. Ao fator com o valor ponderado mais baixo é aplicado o primeiro peso ordenado, ao fator com o segundo valor mais baixo é aplicado o segundo peso ordenado, e assim sucessivamente. Trata-se, portanto, de ponderar os fatores com base na sua ordem, do mínimo para o máximo.

Fazendo variar os pesos ordenados, o procedimento OWA permite implementar uma gama (na verdade infinita) de opções de agregação. Como relatam EASTMAN *et. al.* (1998), em um processo de decisão que envolva três fatores, um conjunto de pesos ordenados [1 0 0] aplicaria todo o peso ao fator com o menor escore, produzindo assim uma solução adversa ao risco (conservadora), equivalente ao operador lógico AND (E); um conjunto de pesos ordenados [0 0 1], pelo contrário, aplicaria todo o peso ao fator de mais alto valor, produzindo assim uma solução de elevado risco, equivalente ao operador lógico OR (OU); um conjunto de pesos ordenados [0.33 0.33 0.33], por sua vez, aplicaria igual peso a todos os fatores, produzindo assim uma solução de risco médio, equivalente ao operador WLC. Nos dois primeiros casos, apenas os valores extremos são considerados (o mínimo, no primeiro e, o máximo, no segundo), o que significa que os fatores não podem ser compensados uns pelos outros (ausência de compensação). Contudo, no terceiro caso, como foi atribuído um conjunto de pesos ordenados perfeitamente equilibrado, os fatores podem compensar-se mutuamente (compensação total), no sentido de

que a adequabilidade alta em um fator possa compensar a adequabilidade baixa em outro. Na realidade, este terceiro caso é equivalente ao WLC ou, ainda mais corretamente, o procedimento WLC é um caso particular do procedimento mais geral OWA.

Os pesos ordenados não estão restritos aos três casos apresentados no parágrafo anterior; na verdade, qualquer combinação é possível desde que o seu somatório seja igual a um. O deslocamento dos pesos ordenados no sentido do mínimo ou do máximo controla o nível de risco (também designado por "*ANDness*"); por sua vez, a homogeneidade de distribuição dos pesos ordenados pelas posições controla o nível global de compensação (também designado por "*trade-off*").

O resultado é um espectro estratégico de decisão, aproximadamente triangular, definido por um lado pelo risco e, por outro lado, pela compensação (EASTMAN *et. al.*, 1998), como se observa na figura 13.

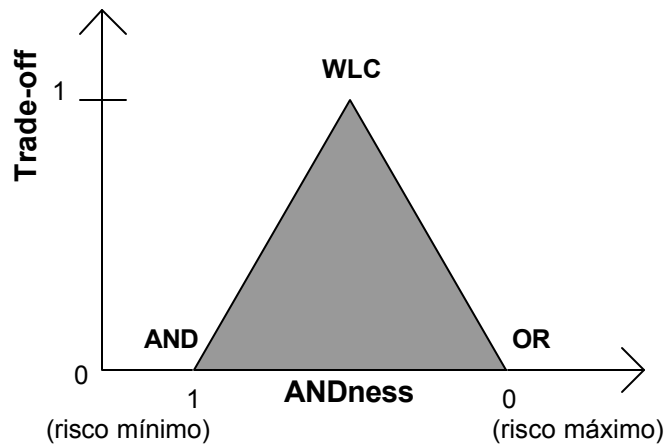


Figura 13 – Espaço estratégico de decisão (OWA).

O nível de risco é medido pela variável *Risco*, dada pela equação (EASTMAN *et. al.*, 1998):

$$ANDness = \frac{1}{n-1} \sum_i [(n-i)O_i] \quad (\text{Equação 4})$$

e a compensação é dada por:

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

(Equação 5)

em que n é o número total de fatores, i é a ordem do fator e O_i é o peso ("order weight") para o fator de ordem i .

3.2.5.3. Seleção de Técnicas Associadas à Avaliação Multi-Critério

A seleção das técnicas a utilizar depende, desde logo, da sua adequação à situação particular em análise, mas também dos dados e recursos disponíveis.

No que se refere à avaliação de pesos, sempre que estiver em causa expressar aquelas que são prioridades de um grupo de decisores, deverá ser utilizado o Método de Comparações Par-a-Par. Embora seja um método mais complexo e demorado, que por vezes impõe a iteração para garantir um grau de consistência aceitável, os resultados e o próprio procedimento adequam-se perfeitamente ao problema de localização do aterro sanitário, pois permite uma avaliação da importância relativa dos critérios de localização

No que se refere à normalização de critérios, o procedimento mais adequado para variáveis contínuas (distâncias, por exemplo), é a aplicação de uma função *fuzzy*, que deverá ser escolhida e calibrada criteriosamente. Por sua vez, nos casos em que se está em presença de critérios envolvendo escalas nominais (uso do solo, por exemplo) deverão ser atribuídos arbitrariamente os valores, de acordo com a escala normalizada adotada.

Finalmente, no que se refere à combinação de critérios, podem ser utilizados os procedimentos de agregação WLC (combinação linear ponderada) ou OWA (média ponderada ordenada), ou ainda uma combinação de ambos ao longo da estrutura hierárquica de decisão. Interessa recorrer ao procedimento OWA sobretudo quando se pretende explorar cenários de risco e variação de compensação.

3.2.5.4. Implementação da Avaliação Multi-Critério em Ambiente SIG

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG's) são programas destinados à aquisição, gestão, análise e apresentação de informação georeferenciada. Utilizando a informação organizada em diferentes níveis temáticos (por exemplo, sistema viário, declividade, uso do solo, etc.) é possível fazer várias operações de análise lógica, estatística e matemática apresentando resultados em uma carta ou tabela. Este tipo de ferramenta revolucionou o monitoramento e a gestão dos recursos naturais e uso do solo, não sendo portanto surpreendente o interesse crescente no desenvolvimento de abordagens de suporte à decisão baseadas em SIG (EASTMAN *et. al.*, 1993, 1994; EASTMAN *et. al.*, 1998; CAVER, 1991; JANSSEN & RIETVELD, 1990; HONEA *et. al.*, 1991; CALIJURI, 2000).

A avaliação *multi-critério* pode ser implementada num SIG através de um dos dois procedimentos a seguir. O primeiro envolve a sobreposição *boolean*, na qual todos os critérios são reduzidos a declarações lógicas de adequabilidade (isto é, classificados de forma binária: 0/1) e então combinados por via de operadores lógicos como a interseção (AND - E) e a união (OR - OU). O segundo envolve a combinação de critérios contínuos (fatores), através da normalização para uma escala comum e da aplicação de pesos para obter médias ponderadas. Por razões que remontam à facilidade com que estas abordagens podem ser implementadas, a sobreposição *boolean* tem dominado as aplicações em SIG vetoriais, enquanto que a combinação de critérios contínuos domina as aplicações em SIG raster (RAMOS & MENDES, 2001).

No trabalho proposto optou-se por um SIG raster, no qual as *Restrições* são processadas através de operações *boolean* enquanto os *Fatores* são processados por operadores matemáticos, recorrendo à álgebra de mapas.

A implementação do modelo corresponde, em um SIG raster, ao processamento de cada pixel de uma imagem raster representativa do território em estudo, permitindo obter um mapa de adequabilidade contínua. Em outras palavras, cada pixel tem uma aptidão para a localização da atividade impactante (aterro sanitário), o qual é submetido a uma avaliação *multi-critério* que determina a sua adequabilidade final.

3.2.5.5. Estrutura do Modelo de Avaliação Multi-Critério

O modelo de avaliação é estruturado por níveis hierárquicos de análise, sendo definido dentro de cada grupo de critérios (três grupos: ambiental, operacional e sócio-econômico). Estes grupos são processados segundo uma sequência que envolve três etapas: padronização (ou normalização) dos fatores, comparação par-a-par (ou identificação de pesos) e combinação (WLC e OWA). A figura 14 ilustra o procedimento adotado.

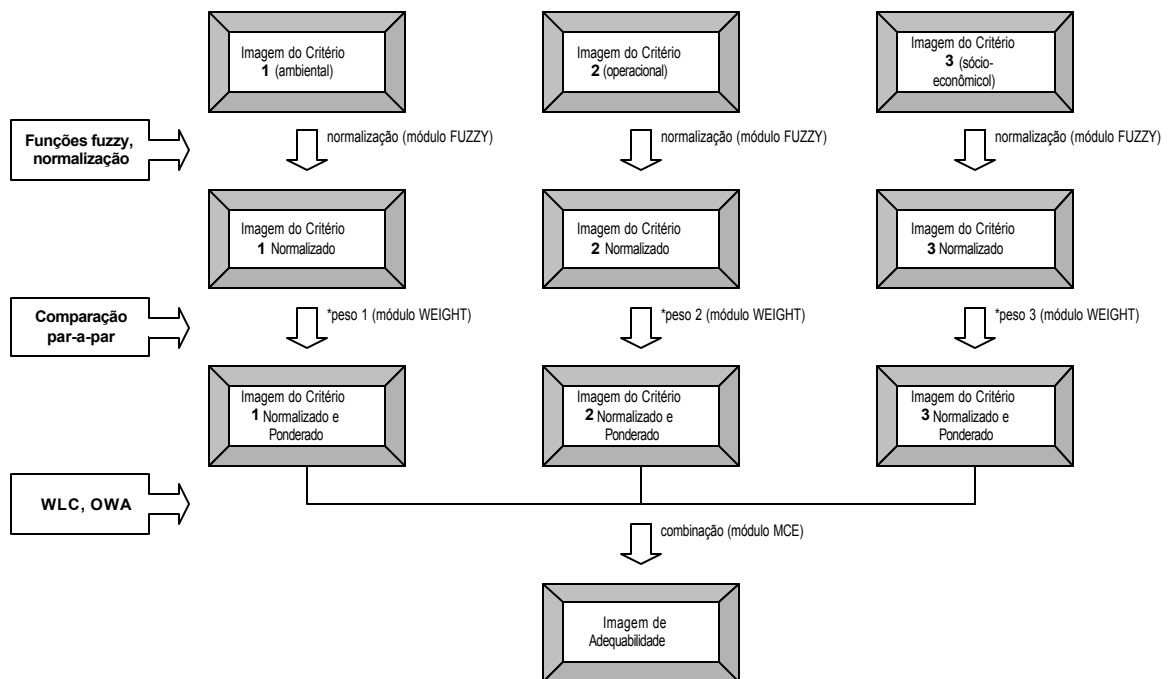


Figura 14– Modelo de avaliação multi-critério.

4. Estudo de Caso: Avaliação e Seleção de Áreas para Implantação de Aterro Sanitário no Município de Cachoeiro de Itapemirim-ES

4.1. Descrição da Área em Estudo

4.1.1. Localização e Acesso

O município de Cachoeiro de Itapemirim está localizado ao Sul do Estado do Espírito Santo, constituindo parte da Zona Fisiográfica Serrana do Sul. A sede apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 20° 51' 12" de latitude Sul e 41° 06' 22" de longitude Oeste de Greenwich. A figura 15 ilustra bem a localização do município.

O principal acesso à cidade é feito pela BR-101, que liga Vitória ao Rio de Janeiro. Outras estradas asfaltadas ligam Cachoeiro de Itapemirim às cidades de Castelo, Atílio Vivacqua, Vargem Alta, Marataízes, Muqui e Jerônimo Monteiro.

4.1.2. Aspectos Hidrográficos

Os cursos d'água da área de estudo fazem parte do sistema hidrológico do rio Itapemirim, o qual corta a área praticamente ao meio como apresentado na figura 16. Segundo CPRM (1993), devido ao surto industrial da área, os cursos d'água estão passando por um processo gradativo de poluição, havendo já uma descaracterização da fauna e da flora.

É possível observar que a área em estudo apresenta altitudes mais elevadas no Nordeste e Noroeste, enquanto que as menores altitudes estão a Sudeste, onde está direcionado o fluxo do rio Cacheiro de Itapemirim. As menores declividades estão próximas às margens dos rios, onde estão presentes regiões de acumulação de sedimentos. O modelo digital de elevação (MDE) e as classes de declividade estão apresentadas nas figuras 17 e 18, respectivamente, e podem ilustrar bem este aspecto físico.

4.1.3. Aspectos Pedológicos

A região em estudo conta com mapeamento pedológico na escala 1:250.000, como parte dos trabalhos do Projeto RADAMBRASIL.

Com base nas informações apresentadas no RADAMBRASIL e com o mapa de solos aqui produzido (figura 19), constata-se que na área de trabalho são encontradas as seguintes classes de solos: PODZÓLIO VERMELHO-ESCURO EUTRÓFICO, LATOSSOLO VERMELHO – AMARELO ÁLICO, SOLOS LITÓLICOS EUTRÓFICOS, SOLOS BRUNIZÉM AVERMELHADO, CAMBISSOLO, SOLOS ALUVIAIS.

Os PODZÓLIOS VERMELHO-ESCUROS EUTRÓFICOS (PEe), estão em maior proporção que os demais e sua principal característica é a espessura, apresentam textura variando de arenosa a argilosa na parte superficial e franco argilosa ou mais fino no horizonte B, possuem nesse horizonte valor de saturação por bases maior ou igual a 50%. São solos bem a moderadamente drenados.

Os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS ÁLICOS (LVa) têm como principais características a textura argilosa, são profundos a muito profundos com seqüência de horizontes A, B e C, apresentam avançado grau de meteorização com predominância de minerais de argila 1:1, são acentuadamente bem drenados e possuem valores de saturação de alumínio maiores que 50%.

Os solos LITÓLICOS EUTRÓFICOS compreendem solos minerais, pouco desenvolvidos, com aproximadamente 20 a 40cm de profundidade assentes sobre rochas consolidadas, pouco ou nada meteorizadas.

Os SOLOS BRUNIZÉM AVERMELHADO apresentam argila de alta atividade, com o horizonte A bastante espesso e valor elevado de saturação de bases; o horizonte B é geralmente argiloso com estruturas em bloco ou prismática; localizam-se em pequenas áreas do relevo forte – ondulado e/ou montanhoso.

Os CAMBISSOLOS são solos geralmente não muito espessos com relação silte/argila maior que 0,6 (textura média) ou maior que 0,7 (textura argilosa) e com minerais facilmente intemperizáveis na fração areia.

Os solos ALUVIAIS são solos resultantes das disposições fluviais recentes, assente sobre um horizonte C de camadas estratificadas não consolidadas não havendo qualquer relação pedogenética entre elas.

4.1.4. Aspectos Geológicos

A geologia apresentada é proveniente do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM desde 1985. A folha em estudo SF.24-V-A-V, Cachoeiro de Itapemirim - ES foi executada pela superintendência Regional de Belo Horizonte em setembro de 1990.

Apesar de estar sob exploração econômica há mais de um século, a região enfocada neste trabalho apenas inicia ser descoberta geologicamente. Anteriormente, apenas trabalhos sem abrangência suficiente para o entendimento da geologia desta área foram realizados (CPRM,1993).

Da coluna litoestratigráfica proposta para toda a carta, seis unidades estratigráficas estão presentes na área em estudo (figura 20):

- Complexo Paraíba do Sul;
- Granitóides Sin a Tardi-tangenciais;
- Intrusivas Ácidas, Intermediárias e Básicas Tardi a Pós-Transcorrentes;
- Intrusivas Ácidas Pós-Transcorrentes;
- Intrusivas Básicas;
- Depósitos Quaternários.

4.1.4.1. Complexo Paraíba do Sul

Para a área do Projeto Cachoeiro de Itapemirim, na qual está inserido o presente trabalho, optou-se pela denominação de Complexo Paraíba do Sul, sendo subdividida em nove unidades, sem significado cronoestratigráfico de constituição litológica e aspectos estruturais peculiares, além de subunidades ou tipos petrográficos especiais, individualizados na escala adotada (CPRM,1993).

4.1.4.2. Granitóides Sin a Tardi-tangenciais

A formação caracteriza-se por uma paisagem constituída de grandes edifícios rochosos, com desníveis de até 800m entre a base e o topo do morro. Os vales são geralmente amplos e encaixados. A altitude oscila desde 100m na parte Sul do corpo até 1100m mais para o Norte. Predomina o Gnaiss de cor branco-acinzentada.

Existe uma área de aproximadamente 360 km² que apresenta predominantemente um relevo arrasado com morros ondulados e topos achatados, altitude média em torno de 150 metros e montanhoso nas extremidades. A rocha apresenta de modo geral aspecto granítico com foliação incipiente proporcionada pela disposição planar da biotita.

4.1.4.3. Intrusivas Ácidas, Intermediárias e Básicas Tardi a Pós-Transcorrentes

Nessa unidade litoestratigráfica as rochas foram divididas em quatro grupos:

No Maciço Santa Helena, os tipos litólicos mais expressivos são granitos, granodioritos e gabros, já no Maciço Castelo, apresentam como tipos litólicos mais expressivos a titanita-granito, granito grosseiro porfirítico, dioritos e granodiorito porfirítico.

O maciço Alto Chapéu apresenta tipos litólicos similares aos encontrados nos Maciços anteriores incluindo os gabros.

4.1.4.4. Intrusivas Ácidas, Pós-Transcorrentes

Essa unidade litoestratigráfica é caracterizada por inúmeros diques de rochas graníticas. Macroscopicamente, as rochas são de composição granítica, podendo apresentar foliação de fluxo, com disposição preferencial das palhetas de biotita.

4.1.4.5. Intrusivas Básicas

Aqui estão presentes diques básicos preenchendo juntas ou falhas. Geralmente afloram em blocos bastante resistentes, normalmente com esfoliação esferoidal e solo argiloso avermelhado.

4.1.4.6. Depósitos Quaternários

Estão representados por dois tipos: os aluviais e os coluviais. São constituídos por sedimentos inconsolidados arenosos, argilo-arenosos, argilo-siltosos exibindo cores variadas, ocorrendo localmente níveis de cascalho.

4.1.5. Aspectos Geomorfológicos

A região de Cachoeiro de Itapemirim conta com estudos geomorfológicos na escala 1:250.000, como parte dos trabalhos do Projeto RADAMBRASIL.

Com base nas informações apresentadas no trabalho citado acima, a área em estudo pode ser compartimentada de forma hierárquica e decrescente como parte de um domínio morfoestrutural, uma região geomorfológica, e duas unidades geomorfológicas apresentando nove tipos de modelado.

O domínio morfoestrutural das Faixas de Dobramentos Remobilizados caracterizam-se pelas evidências de movimentos crustais, com marcas de falhas, deslocamentos de blocos e falhamentos transversos, impondo nítido controle estrutural sobre a morfologia atual.

A região geomorfológica da Mantiqueira Setentrional compreende a área localizada ao Sul do Estado do Espírito Santo e a Leste de Minas Gerais, possui altitudes médias de 700m sendo seu ponto mais elevado o pico da Bandeira na Serra do Caparaó.

A Região da Mantiqueira Setentrional compreende três unidades geomorfológicas denominadas Patamares Escalonados do Sul Capixaba, Maciço do Caparaó e Serranias da Zona da Mata Mineira, dessas apenas as duas primeiras fazem parte da área de trabalho.

A Unidade Patamares Escalonados do Sul Capixaba possui morfologia de aspecto preferencialmente homogêneo, tiveram esse termo adotado por constituírem conjuntos de relevos que funcionam como degraus de acesso aos seus diferentes níveis topográficos.

Na Unidade Maciços do Caparaó as formas de relevo predominantes são resultantes da influência da estrutura, correspondendo aos modelados de dissecação diferencial com aprofundamentos da drenagem entre 104 e 344m. O relevo, de modo geral, apresenta-se com grandes formas alongadas de topos e encostas convexizados como mostrado na figura 21, onde se desenvolvem alterações profundas, resultando em espessos mantos argilosos. Nos contatos com os Patamares Escalonados do Sul Capixaba as formas de relevo tornam-se mais regulares, com perfis alongados, topos e encostas entre convexas e retilíneas e aprofundamento da drenagem em torno de 160m. São

constantes as marcas de voçorocamento e mesmo onde eles não ocorrem é possível observar a instabilidade das encostas.

Na área em estudo estão presentes os modelados de acumulação (Planície Fluvial e Coluvial ou de Enxurrada) e os de dissecação (em Colinas, em Ravinas e Aguçado).

O modelado de acumulação Planície Fluvial, tem como características principais áreas planas de acumulação fluvial sujeita a inundações periódicas, correspondendo às várzeas atuais. Dentro desse mesmo tipo de modelado há ainda, o Coluvial ou de Enxurrada denominado Ac, que se apresenta como área plana ou abaciada resultante da convergência de leques de espraiamento ou de concentração de depósitos de enxurradas nas partes terminais de sedimentos, podendo eventualmente apresentar solos solodizados.

Com relação aos modelados de Dissecação têm-se o modelado em Colinas, o qual possui um conjunto de formas de relevo de topos convexos, em geral, esculpidos em rochas cristalinas e eventualmente em sedimentos, às vezes denotando controle estrutural. São definidos por vales pouco aprofundados, apresentando vertentes de declividade suave, entalhadas por sulcos e cabeceiras de drenagem de primeira ordem.

Outro desse tipo de modelado é o Aguçado, que têm como principal característica um conjunto de formas de relevo de topos estreitos e alongados, esculpidos em rochas cristalinas, e eventualmente em sedimentos denotando eventual controle estrutural, definida por vales encaixados. Os topos de aparência aguçada são resultantes da interpretação de vertentes de declividade acentuada, entalhadas por sulcos e ravinas profundos.

O último tipo de modelado presente na área em estudo é o em Ravinas. A sua dissecação é caracterizada por grande intensidade de incisões resultantes da atuação predominante da erosão pluvial sob a forma de escoamento concentrado (torrencial). E, em certas áreas, assume feição de verdadeira “badland”.

4.1.6. Unidades Naturais

Algumas características das zonas naturais do município de Cachoeiro de Itapemirim estão apresentadas no quadro 3.

FEITOSA *apud* MARQUES (2001), apresenta fatores para a classificação das unidades naturais do Estado do Espírito Santo. Dentre esses fatores, como pode ser observado na figura 22, estão o clima e o relevo.

O clima úmido ocorre em quatro áreas do Município de Cachoeiro de Itapemirim, sendo caracterizado por apresentar temperatura média variando entre 7,3 e 27,8°C nas regiões mais chuvosas (zonas 1, 2, 3 e 4), e média variando entre 11,8 e 34,0° C nas regiões menos chuvosas (zona 5).

O clima seco ocorre na maior parte do município. Apresenta temperaturas médias anuais que variam de 30,7 a 34,0° C.

As zonas 1, 2, 3, 4 e 5 são caracterizadas por chuvas quase o ano todo o que permite a não deficiência hídrica, com exceção de uma região apresentada com 4 meses de seca. Por sua vez, as zonas 6 e 9 apresentam maior número de meses com deficiência hídrica.

Quadro 3 - Características das zonas naturais de Cachoeiro de Itapemirim.

ZONAS	Temperatura		Relevo	Água												
	Média min. Mês + frio (°C)	Média max. Mês + quente (°C)	Declividade	Nº de meses secos ²	Meses secos, chuvosos/secos e secos ³											
					J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
ZONA 1: Terras frias, Acidentadas e Chuvosas	7,3 – 9,4	25,3 – 27,8	> 8%	1	U	U	U	U	U	U	U	P	P	U	U	U
				3,0	U	U	U	U	P	P	P	S	P	U	U	U
ZONA 2: Terras de Temperaturas Amenas, Acidentadas e chuvosas	9,4 – 11,8	27,8 – 30,7	> 8%	1,0	U	U	U	U	U	U	U	P	P	U	U	U
				3,0	U	U	U	U	P	P	P	S	P	U	U	U
ZONA 4: Terras quentes, Acidentadas e Chuvosas	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	> 8%	2,5	U	P	U	U	U	P	P	P	P	U	U	U
ZONA 5: Terras Quentes, Acidentadas e Transição Chuvosa/Seca	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	> 8%	4,5	U	P	P	P	P	P	P	S	P	U	U	U
				4,5	U	U	U	U	P	S	S	S	S	U	U	U
				5	P	P	P	P	P	P	P	S	P	U	U	U
ZONA 6: Terras quentes, Acidentadas e Secas	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	> 8%	6	U	P	P	P	P	P	S	S	S	P	U	U
ZONA 9: Terras Quentes, Planas e Secas	11,8 – 18,0	30,7 – 34,0	< 8%	6	U	P	P	P	P	P	S	S	S	P	U	U

¹ Fonte: Mapa de Unidades Naturais(EMCAPA, 1999), Figura C.5

² Cada 2 meses parcialmente secos são contados como um mês seco;

³ U – chuvoso; S – seco; P- parcialmente seco.

4.1.7. Núcleos Urbanos

O Município de Cachoeiro de Itapemirim é constituído de dez distritos, incluindo a sede (ver figura 23). Dentre estes distritos, estão o distrito sede (Cachoeiro de Itapemirim), o de Vargem Grande de Soturno, Gironda e Itaoca, nessa respectiva ordem de grandeza.

As fazendas (entenda-se sedes rurais), por serem inúmeras, bem distribuídas pelo município e habitadas, devem ser analisadas também.

4.2. Estabelecimento dos Critérios

No presente trabalho, optou-se por subdividir a análise inicial em três critérios (ambiental, operacional e sócio-econômico). Esta divisão tem por objetivo discernir os aspectos que individualizam cada critério (importância relativa), o que permite uma melhor comparação par-a-par dos fatores envolvidos. Este procedimento possibilita inicialmente que fatores de mesma natureza sejam relacionados.

Os critérios adotados foram compilados de cinco fontes principais: NBR 13.896/97 – Aterros de Resíduos Não-Perigosos – Critérios de Projeto, Implantação e Operação, MENEZES (1995), Mc BEAN (1995), ANDRADE (1999), LIMA (1999) e MASSUNARI (2000).

4.2.1. Critérios Restritivos (restrições)

As Restrições são um tipo de critério que, como já foi dito, restringem o espaço de solução do problema, através da exclusão de áreas de acordo com determinadas condições. Foram consideradas as restrições associadas aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico, de acordo com o quadro 4.

Os critérios restritivos, como representam restrições absolutas à implantação do aterro, foram aplicados como máscaras para descartar todas as áreas que não atendem a alguma das restrições que elas representam.

Quadro 4 – Restrições associadas aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico.

ID	DESCRIÇÃO
RA	Restrições associadas ao critério ambiental
RA1	Distância mínima de 200m (“ <i>buffer</i> ”) de qualquer coleção hídrica ou curso d’água (de acordo com a NBR 13896/97).
RA2	Distância mínima de 200m (“ <i>buffer</i> ”) do sistema viário.
RA3	Distância mínima de 200m (“ <i>buffer</i> ”) das falhas geológicas.
RO	Restrições associadas ao critério operacional
RO1	Declividade mínima de 1% e máxima de 30% (de acordo com a NBR 13896/97).
RO2	Limite do município de Cachoeiro de Itapemirim
RS	Restrições associadas ao critério sócio-econômico
RS1	Distância mínima de 500m (“ <i>buffer</i> ”) dos distritos – núcleo populacional (de acordo com a NBR 13896/97).
RS2	Distância mínima de 500m (“ <i>buffer</i> ”) da cidade sede – área urbanizada (de acordo com a NBR 13896/97).
RS3	Distância mínima de 500m (“ <i>buffer</i> ”) das sedes das fazendas (de acordo com a NBR 13896/97).

Fonte: Adaptado da NBR 13896/, MENEZES (1995), Mc BEAN (1995), ANDRADE (1999), LIMA (1999), MASSUNARI (2000) e MARQUES (2001).

4.2.2. Critérios Escalonados (fatores)

Fatores, por outro lado, são critérios que definem algum grau de aptidão para a área considerada. Eles definem áreas ou alternativas em termos de uma medida contínua de adequabilidade, realçando ou diminuindo a importância de uma alternativa em consideração naqueles locais fora das restrições absolutas. Foram considerados os fatores associados aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico, de acordo com o quadro 5. Neste mesmo quadro são apresentadas as funções utilizadas para normalizar os dados assim como seus respectivos pontos de inflexão.

Quadro 5 – Fatores associados aos critérios ambiental, operacional e sócio-econômico.

Funções fuzzy adotadas e seus respectivos pontos de controle.

ID	DESCRIÇÃO	d _{min}	Função Fuzzy	Ponto de Controle			
				a	b	C	d
FA	Fatores associados ao critério ambiental						
FA1	Distância mínima de 200m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água (de acordo com a NBR 13896/97).	200m	Sigmoidal monotônica crescente	200m	700m	700m	700m
FA2	Distância mínima de 200m das falhas geológicas.	200m	Sigmoidal monotônica crescente	200m	700m	700m	700m
FA3	Pedologia	-	Escala [0-255]	-			
FA4	Geologia	-	Escala [0-255]	-			
FA5	Geomorfologia	-	Escala [0-255]	-			
FA6	Unidades naturais	-	Escala [0-255]	-			
FO	Fatores associados ao critério operacional						
FO1	Declividade mínima de 1% e máxima de 30% (de acordo com a NBR 13896/97).	1%	Linear simétrica	1%	5%	20%	30%
FO2	Distâncias acima de 700m do sistema viário oneram sensivelmente os custos de operação.	500m	J monotônica decrescente	500m	500m	500m	700m
FO3	Distâncias de custo (em u.d.c. – unidades de distância de custo) menores são consideradas favoráveis.	mín.	Linear monotônica decrescente	mín.	máx.	máx.	máx.
FS	Fatores associados ao critério sócio-econômico						
FS1	Distância mínima de 500m dos distritos – núcleos populacionais (de acordo com a NBR 13896/97).	500m	Linear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m
FS2	Distância mínima de 500m da cidade sede – área urbana (de acordo com a NBR 13896/97).	500m	Linear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m
FS3	Distância mínima de 500m das fazendas (de acordo com a NBR 13896/97).	500m	Linear monotônica crescente	500m	700m	700m	700m

Fonte: Adaptado da NBR 13896/, MENEZES (1995), Mc BEAN (1995), ANDRADE (1999), LIMA (1999), MASSUNARI (2000) e MARQUES (2001).

4.2.3. Descrição e Justificativa dos Critérios (Restrições e Fatores)

A seguir, são apresentadas a descrição e a justificativa dos critérios adotados no presente trabalho.

4.2.3.1. Critérios Restritivos Ambientais (RA)

- Distância mínima (“*buffer*”) das áreas de preservação permanente (corpos e cursos d'água), fixada em 200 metros, visando preservar os recursos hídricos de possíveis contaminações por efluentes, de acordo com o que estabelece a legislação em relação à distância de cursos e corpos d'água. Assim, somente as áreas com uma distância de cursos e corpos d'água maior que a especificada na legislação são consideradas na análise. (RA1)
- Distância mínima (“*buffer*”) do sistema viário, fixada em 200 metros, objetivando preservar as áreas de circulação do impacto visual do aterro. Somente as áreas a mais de 200 metros de rodovias são consideradas aptas e as demais excluídas da análise. (RA2)
- Distância mínima (“*buffer*”) das falhas geológicas, estabelecida em 200 metros, visando preservar os caminhos preferenciais dos efluentes provenientes do aterro sanitário, de acordo com o que estabelece a legislação vigente. Assim, somente as áreas com uma distância das falhas maior que a especificada na legislação são consideradas. (RA3)

4.2.3.2. Critérios Restritivos Operacionais (RO)

- Declividades situadas em locais com inclinação entre 1% e 30% são consideradas aptas e, portanto, incluídas na análise. Sendo assim, somente as áreas com declividade presente no intervalo especificado na legislação são consideradas. (RO1)

- Limites do município de Cachoeiro de Itapemirim; restringindo a área de análise aos limites do município. Somente as áreas localizadas dentro do território do município interessam na presente análise, sendo as demais excluídas. Convém lembrar que em muitos casos analisar o território de um único município não é a alternativa mais viável, pois municípios vizinhos podem dispor de locais muito mais apropriados para a instalação de aterros, o que torna necessário uma negociação entre as partes. Neste trabalho foi considerado apenas o município de interesse. (RO2)

4.2.3.3. Critérios Restritivos Sócio-Econômicos (RS)

- Distância mínima de 500m (*"buffer"*) dos distritos – núcleos populacionais, objetivando minimizar o contato da população com a operação do aterro (cheiro desagradável e poeira) de acordo com a NBR 13896/97. (RS1)
- Distância mínima de 500m (*"buffer"*) da cidade sede - área urbanizada, visando minimizar os efeitos negativos da operação do aterro sanitário (cheiro desagradável e poeira) de acordo com a NBR 13896/97. (RS2)
- Distância mínima de 500m (*"buffer"*) das fazendas, com o objetivo de evitar a proximidade do aterro sanitário em relação às sedes das propriedades rurais de acordo com a NBR 13896/97. (RS3)

4.2.3.4. Critérios Escalonados Ambientais (FA)

- Distância mínima de 200m de qualquer coleção hídrica ou curso d'água (de acordo com a NBR 13896/97). Acredita-se que uma distância de 700m seria ideal. Com isso, optou-se por escalonar o valor da adequabilidade entre 200m e 700m, acima da qual a aptidão não apresenta sensível alteração. (FA1)

- Distância mínima de 200m das falhas geológicas, visando preservar os caminhos preferências dos efluentes, de acordo com o que estabelece a legislação vigente. Por sua vez, distâncias entre 200m e 700m são consideradas ideais. Sendo assim, optou-se por escalonar o valor da adequabilidade entre 200m e 700m, acima do qual a aptidão não apresenta alteração. (FA2)

- Pedologia (solos), considerando-se as áreas mais propícias para a implantação do aterro em função da permeabilidade do terreno, disponibilidade de material terroso para recobrimento e profundidade do lençol freático. Quanto mais favoráveis essas características nas unidades de mapeamento, maior sua aptidão à implantação de um aterro sanitário. Considerou-se, de acordo com os dados obtidos do mapeamento de solos, os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO ÁLICO os mais adequados e os SOLOS ALUVIAIS, os menos adequados. (FA3)

- Geologia, considerando-se as áreas mais propícias aquelas que apresentam maciços graníticos, como as classes de ROCHAS INTRUSIVAS ÁCIDAS, INTERMEDIÁRIAS e BÁSICAS TARDI A PÓS-TRANSCORRENTES, os GRANITÓIDES SIN A TARDI-TANGENCIAIS e o COMPLEXO PARAÍBA DO SUL. Os DEPÓSITOS ALUVIONARES e COLUVIONARES foram considerados os menos adequados, de acordo com as características intrínsecas. (FA4)

- Geomorfologia, considerando-se as áreas menos adequadas àquelas que apresentam MODELADOS DE ACUMULAÇÃO definidos como PLANÍCIE FLUVIAL E COLUVIAL ou de ENXURRADA assim como o MODELADO DE DISSECAÇÃO EM RAVINAS, pois ambos possuem características que favorecem o transporte de poluentes que *por ventura* possam fluir do aterro sanitário. Por sua vez, o MODELADO DE DISSECAÇÃO EM COLINAS foi considerado o mais apto ao empreendimento em estudo, uma vez que dificulta, apesar de não evitar, o fluxo de contaminantes. (FA5)

- Unidades naturais, considerando-se as áreas de menor adequabilidade aquelas pertencentes às regiões que apresentam terras quentes, secas, fracas e encharcadas, pois possuem características que influenciam consideravelmente a contaminação do solo e das águas subsuperficiais. As áreas com características intrínsecas tais como terras quentes, planas, de regiões secas, férteis, enxutas e de textura fina têm maior adequabilidade. (FA6)

4.2.3.5. Critérios Escalonados Operacionais (FO)

- Declividades entre 1% e 30% são exigidas pela NBR 13896/97, considerando-se que baixas declividades favorecem as operações de movimentação de resíduos e solos, além de oferecer condições menos críticas para os sistemas de drenagem. Quanto menor for a declividade da área em análise, mais apta ela será para a implantação de um aterro sanitário. Acredita-se que declividades entre 1 e 5% são mais adequadas do que entre 20 e 30%. (FO1)
- Distâncias superiores a 500m do sistema viário oneram consideravelmente os custos de operação do aterro sanitário, uma vez que a abertura de um acesso para a área encarece os custos de implantação e operação do aterro sanitário. Dessa forma, quanto mais próximo de uma rodovia estiver a área em análise (limitado ao critério restritivo ambiental), mais apta ela será para a implantação do aterro, pois menores serão os custos de transporte. (FO2)
- Distâncias de custo menores favorecem consideravelmente à redução dos valores estimados no orçamento desenvolvido pela prefeitura com relação aos gastos em transporte do lixo. Quanto menor a distância de custo em relação ao perímetro urbano, menores serão as despesas em manutenção, conservação e combustíveis dos caminhões basculantes. A distância de custo corresponde às possíveis despesas que a prefeitura tem quando necessita

transportar o lixo em rotas inadequadas, ou seja, fora do traçado original do sistema viário. (FO3)

4.2.3.6. Critérios Escalonados Sócio-Econômicos (FS)

- Distância mínima de 500m dos distritos – núcleos populacionais, com o objetivo de minimizar o contato da população com a operação do aterro (de acordo com a NBR 13896/97). Distâncias entre 500m e 700m são consideradas adequadas para o empreendimento proposto. Com isso, procurou-se escalonar o valor da adequabilidade entre 500m e 700m, acima do qual a aptidão não apresenta ganhos sensíveis. (FS1)
- Distância mínima de 500m da cidade sede – áreas urbanizadas, minimizar os efeitos negativos da operação do aterro sanitário (de acordo com a NBR 13896/97). Distâncias entre 500m e 700m são consideradas adequadas para o empreendimento proposto. Com isso, procurou-se escalonar o valor da adequabilidade entre 500m e 700m, acima do qual a aptidão não apresenta ganhos sensíveis. (FS2)
- Distância mínima de 500m das fazendas, evitando a proximidade do aterro sanitário em relação às sedes das propriedades rurais (de acordo com a NBR 13896/97). Distâncias entre 500m e 700m são consideradas adequadas para o empreendimento proposto. Com isso, procurou-se escalonar o valor da adequabilidade entre 500m e 700m, acima do qual a aptidão não apresenta ganhos sensíveis. (FS3)

4.3. Padronização dos Fatores para uma Escala Contínua

A padronização é essencialmente um processo de conversão dos valores dos dados originais em escores de adequabilidade ao propósito desejado, aplicando-se os critérios pré-estabelecidos através de pertinência a conjuntos, isto é, de sua associação ao conjunto de áreas para a implantação de um aterro sanitário. Sua importância advém da necessidade de uniformizar as unidades de todos os mapas, atribuindo-lhes uma escala comum de valores de aptidão para que possam ser agregados para a geração de um mapa final de adequabilidade à implantação do empreendimento, pois cada mapa possui unidades temáticas diferentes. A declividade está em percentagem, a distância do sistema viário e da rede hidrográfica estão em metros e as unidades naturais contêm classes, por exemplo.

Além de permitir a transformação das unidades das variáveis para uma única base de mensuração, a padronização também serve para hierarquizar internamente cada variável, descrevendo como a adequabilidade à implantação de um aterro varia espacialmente. No presente trabalho, os valores de todas as variáveis foram escalonados para o intervalo *byte* (0 a 255).

A forma como a adequabilidade varia com a distância pode assumir vários aspectos, de acordo com outros fatores locais. Por exemplo, com relação apenas à distância do sistema viário, quanto mais próximo de uma rodovia se situar uma área, mais apta ela será à implantação de um aterro sanitário. Assim, a adequabilidade máxima (255) pode ser atribuída à menor distância e a adequabilidade mínima (0) à maior distância de uma rodovia encontrada na região em estudo e os escores de aptidão podem ser linearmente distribuídos entre estes dois extremos.

A atribuição de escores também pode seguir curvas não-lineares entre os limites inferior e superior de aptidão, bem como restringir-se a limites pré-estabelecidos como considerar apenas a distância máxima de rodovias economicamente viável para o transporte e não a distância máxima de rodovias encontradas em toda a área. No quadro 5 foram apresentadas as funções *fuzzy* utilizadas para padronizar (ou normalizar) os fatores considerados na análise.

4.3.1. Fatores Ambientais (FA)

4.3.1.1. Fator Distância dos Cursos D'água (FA1)

Este fator apresenta como característica principal a distância mínima de 200m estabelecida pela NBR 13896/97, que a torna simplesmente uma restrição. O fator é estabelecido a partir do momento em que os ambientalistas reivindicam distâncias maiores. Acredita-se que uma distância de 700m poderia ser tão boa quanto uma distância de 800m, por exemplo. Com isso, a fim de determinar o fator de adequabilidade “*distância dos cursos d’água*”, utilizou-se a função *fuzzy sigmoidal monotônica crescente*, onde, de acordo com o quadro 5, o primeiro ponto de controle corresponde a 200m de distância dos mananciais e o segundo, a 700m, a partir do qual a adequabilidade é máxima. A figura 24 ilustra bem este fator.

4.3.1.2. Fator Distância das Falhas Geológicas (FA3)

Este fator apresenta como característica principal a distância mínima de 200m adotada neste trabalho. Acredita-se que, assim como o fator anteriormente descrito, uma distância de 700m poderia ser tão boa quanto uma distância de 800m, por exemplo. Sendo assim, objetivando determinar o fator de adequabilidade “*distância das falhas geológicas*”, utilizou-se a função *fuzzy sigmoidal monotônica crescente*, onde o primeiro ponto de controle corresponde a 200m de distância dos mananciais e o segundo a 700m, a partir do qual a adequabilidade é máxima. A figura 25 mostra claramente o fator apresentado.

4.3.1.3. Fator Pedológico (FA3)

O fator Pedológico apresenta como característica principal e favorável à implantação do aterro sanitário os LATOSSOLOS, especificamente os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO ÁLICO. Por sua vez, a presença de SOLOS ALUVIAIS reduz substancialmente a aptidão destas áreas para localização deste tipo de empreendimento. Sendo assim, objetivando determinar o fator de adequabilidade “*pedológico*”, e sabendo que o mesmo deve necessariamente pertencer a uma escala nominal, foram atribuídos valores, de acordo com a escala normalizada adotada (0-255).

A mínima adequabilidade (zero) foi atribuída aos SOLOS ALUVIAIS, enquanto que os LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO ÁLICO receberam a maior adequabilidade (255). Os demais solos apresentaram adequabilidades intermediárias. A figura 26 mostra o fator apresentado.

4.3.1.4. Fator Geológico (FA4)

O fator Geológico tem como característica principal e favorável à presença de MACIÇOS GRANÍTICOS, os quais apresentam a maior adequabilidade. Por sua vez, os DEPÓSITOS ALUVIONARES e COLUVIONARES apresentaram a menor aptidão à implantação do empreendimento em estudo. Com isso, a fim de determinar o fator de adequabilidade “*geológico*”, e sabendo que o mesmo deve necessariamente pertencer a uma escala nominal, foram atribuídos valores normalizados, procedimento este semelhante ao desenvolvido para o fator pedológico.

A mínima adequabilidade (zero) foi atribuída aos DEPÓSITOS ALUVIONARES e COLUVIONARES, enquanto que MACIÇOS GRANÍTICO receberam a maior adequabilidade (255). As demais classificações apresentaram adequabilidade intermediárias, na seguinte ordem decrescente: ROCHAS INTRUSIVAS ÁCIDAS, INTERMEDIÁRIAS e BÁSICAS TARDI A PÓS-TRANSCORRENTES, GRANITÓIDES SIN A TARDI-TANGENCIAIS e COMPLEXO PARAÍBA DO SUL. A figura 27 ilustra claramente o fator apresentado.

4.3.1.5. Fator Geomorfológico (FA5)

Da mesma forma que foram desenvolvidos os processos de normalização para os fatores pedológicos e geológicos, procedeu-se para a geração do mapa de adequabilidade do fator geomorfológico. A linearização das classes geomorfológicas foi realizada em função das fontes de pesquisa.

As classes geomorfológicas que apresentam MODELADOS DE DISSECAÇÃO EM COLINAS foram as que receberam o maior valor de adequabilidade (255). Por sua vez, as classes PLANÍCIE FLUVIAL E COLUVIAL ou de ENXURRADA e MODELADO DE DISSECAÇÃO EM RAVINAS foram classificados com o menor valor de aptidão à implantação do aterro sanitário. A classe MODELO DE DISSECAÇÃO AGUÇADO recebeu uma classificação intermediária (178). A figura 28 ilustra o fator apresentado.

4.3.1.6. Fator Unidades Naturais (FA6)

Este fator foi obtido da mesma forma que os fatores pedológico, geológico e geomorfológico. Neste caso, as unidades naturais que apresentam as características intrínsecas tais como terras quentes, planas, de regiões secas, férteis, enxutas e de textura fina foram classificadas com a maior adequabilidade (255) à implantação do aterro sanitário. Além destas características, as unidades que apresentam como características terras quentes, acidentadas, secas e férteis receberam uma classificação da ordem de 230. Por sua vez, as unidades que apresentam características tais como terras quentes, secas, fracas e encharcadas receberam a menor adequabilidade (zero). As demais unidades naturais receberam classificações intermediárias. A figura 29 ilustra o fator.

4.3.2. Fatores Operacionais (FO)

4.3.2.1. Fator Declividade (FO1)

O fator Declividade foi gerado de acordo com as exigências da NBR 13896/97, a qual permite declividades entre 1% e 30% nas áreas destinadas à implantação de aterros sanitários. Sendo assim, o mapa de adequabilidade deste fator foi obtido considerando-se a função *fuzzy linear monotônica decrescente*, onde, de acordo com o quadro 5, o primeiro ponto de controle corresponde a 1%, o segundo a 5%, o terceiro a 20% e o quarto a 30%, a partir do qual a adequabilidade é nula. A figura 30 ilustra bem este fator.

4.3.2.2. Fator Distância do Sistema Viário (FO2)

Este fator apresenta como característica principal a distância máxima aceitável de 700m, a fim de atender a necessidade de redução dos custos nas operações de transporte do lixo. Distâncias entre 500m e 700m oneram sensivelmente os custos desta atividade e distâncias superiores a 700m podem inviabilizar o empreendimento em estudo. Sendo assim, objetivando determinar o fator de adequabilidade “*distância do sistema viário*”, utilizou-se a função *fuzzy J monotônica decrescente*, onde o primeiro ponto de controle corresponde a 500m de distância e o segundo a 700m, a partir do qual a adequabilidade é baixíssima. A figura 31 mostra claramente o fator apresentado.

4.3.2.3. Fator Distância de Custo do Perímetro Urbano (FO3)

Este fator tem como característica principal a distância mínima, em que quanto menor esta distância maior a adequabilidade da área. O fator é estabelecido a partir do momento em que os custos de operação são influenciados principalmente pelas condições de trafegabilidade da via, em que quanto piores forem estas condições, maiores serão os desgastes e a necessidade de manutenção corretiva nos veículos, bem como no tempo gasto nas viagens e no consumo de combustível.

A distância de custo foi determinada considerando-se que, ao não percorrer as vias atuais do município, o custo do transporte em caminhões basculantes seria cinco vezes maior do que se percorressem as vias. Com isso, a fim de determinar o fator de adequabilidade “*distância de custo do perímetro urbano*”, utilizou-se a função *fuzzy linear monotônica decrescente*, onde, de acordo com o quadro 5, o primeiro ponto de controle corresponde ao valor mínimo de distância de custo (0udc) e o segundo ao valor máximo (6571udc). A figura 32 ilustra este fator.

4.3.3. Fatores Sócio-Econômicos

4.3.3.1. Fator Distância dos Distritos (FS1)

O fator Distância dos Distritos tem como característica principal a distância mínima de 500m exigida pela NBR 13896/97, a fim de minimizar o contato da população local com o processo de operação do aterro. As distâncias entre 500m e 700m são consideradas satisfatórias. Sendo assim, objetivando determinar o fator de adequabilidade “*distância dos distritos*”, utilizou-se a função *fuzzy linear monotônica crescente*, onde o primeiro ponto de controle corresponde a 500m de distância e o segundo a 700m, a partir do qual a adequabilidade é máxima. A figura 33 mostra claramente o fator apresentado.

4.3.3.2. Fator Distância da Cidade Sede (FS2)

Este fator apresenta como característica principal a distância mínima de 500m exigida pela NBR 13896/97, com o objetivo de minimizar os efeitos negativos da operação do aterro frente as áreas intensamente habitadas. As distâncias entre 500m e 700m são consideradas adequadas. Com isso, a fim de determinar o fator de adequabilidade “*distância da cidade sede*”, utilizou-se a função *fuzzy linear monotônica crescente*, onde o primeiro ponto de controle corresponde a 500m de distância e o segundo a 700m, a partir do qual a adequabilidade é máxima. A figura 34 mostra o fator apresentado.

4.3.3.3. Fator Distância das Fazendas (FS3)

Este fator apresenta como característica principal a distância mínima de 500m exigida pela NBR 13896/97, com o objetivo de evitar a proximidade do aterro em relação às sedes das fazendas. As distâncias entre 500m e 700m são consideradas adequadas. Com isso, a fim de determinar o fator de adequabilidade “*distância das fazendas*”, utilizou-se a função *fuzzy linear monotônica crescente*, onde o primeiro ponto de controle corresponde a 500m de distância e o segundo a 700m, a partir do qual a adequabilidade é máxima. A figura 35 ilustra o fator apresentado.

4.4. Ponderação das Variáveis

4.4.1. Comparação Par-a-Par

Considerando-se que as variáveis que interferem na escolha de uma área para a implantação de um aterro sanitário contribuem com pesos diferenciados no processo final de decisão, estabeleceu-se uma ponderação das variáveis de acordo com sua importância na decisão sobre a aptidão de uma área. A rotina utilizada auxilia o estabelecimento dos pesos finais através da comparação da importância relativa das variáveis duas a duas, diminuindo a subjetividade na decisão. É importante salientar que as comparações foram desenvolvidas em seus respectivos critérios (ambiental, operacional e sócio-econômico).

O peso final de cada variável é estimado através do método AHP (*"Analytical Hierarchy Process"* – Processo de Hierarquização Analítica) aplicado à matriz de comparação par-a-par. Com isso, obtém-se os pesos para as variáveis utilizadas na presente análise.

4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Ambiental

A seguir, é apresentada a matriz de comparação dos fatores ambientais (figura 36) e o resultado final dos pesos calculados (figura 37), ambos referentes à comparação par-a-par do módulo WEIGHT.

WEIGHT - AHP weight derivation

Pairwise Comparison 9 Point Continuous Scale

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremely	very strongly	strongly	moderately	equally	moderately	strongly	very strongly	extremely
Less Important					More Important			

Pairwise comparison file to be saved:

	fa1	fa2	fa3	fa4	fa5	fa6
fa1	1					
fa2	1/3	1				
fa3	1/5	1/5	1			
fa4	1/5	1/5	1	1		
fa5	1/7	1/7	1/3	1/3	1	
fa6	1/9	1/9	1/5	1/5	1/3	1

Descrição:

- fa1 – Fator Distância dos Cursos D'água**
- fa2 – Fator Distância das Falhas Geológicas**
- fa3 – Fator Pedológico**
- fa4 – Fator Geológico**
- fa5 – Fator Geomorfológico**
- fa6 – Fator Unidades Naturais**

Figura 36 - Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) ambientais.

Module Results

The eigenvector of weights is :

```

fa1 : 0.4417
fa2 : 0.3013
fa3 : 0.0934
fa4 : 0.0934
fa5 : 0.0452
fa6 : 0.0251

```

Consistency ratio = 0.06
Consistency is acceptable.

Figura 37 - Resultado final dos pesos calculados para os fatores ambientais.

4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Operacional

A seguir, são apresentados a matriz de comparação dos fatores operacionais (figura 38) e o resultado final dos pesos calculados (figura 39), ambos referentes à comparação par-a-par do módulo WEIGHT.

WEIGHT - AHP weight derivation

Pairwise Comparison 9 Point Continuous Scale

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extremely	very strongly	strongly	moderately	equally	moderately	strongly	very strongly	extremely
Less Important					More Important			

Pairwise comparison file to be saved:

	fo1	fo2	fo3
fo1	1		
fo2	5	1	
fo3	5	1	1

Compare the relative importance of fo3 to fo3

Descrição:

fo1 – Fator Declividade

fo2 – Fator Distância do Sistema Viário

fo3 – Fator Distância de Custo do Perímetro Urbano

Figura 38 - Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) operacionais.

Module Results

The eigenvector of weights is :

fo1 : 0.0909
fo2 : 0.4545
fo3 : 0.4545

Consistency ratio = 0.00
Consistency is acceptable.

Figura 39 - Resultado final dos pesos calculados para os fatores operacionais.

4.4.1.1. Comparação Par-a-Par – Fator Sócio-Econômico

A matriz de comparação dos fatores sócio-econômicos (figura 40) e o resultado final dos pesos calculados (figura 41), ambos referentes à comparação par-a-par do módulo WEIGHT, são apresentados abaixo.

	fs1	fs2	fs3
fs1	1		
fs2	3	1	
fs3	1/5	1/7	1

Descrição:

fo1 – Fator Distância dos Distritos

fo2 – Fator Distância da Cidade Sede

fo3 – Fator Distância das Fazendas

Figura 40 - Matriz de comparação dos critérios escalonados (fatores) sócio-econômicos.

The eigenvector of weights is :

fs1 : 0.2790
fs2 : 0.6491
fs3 : 0.0719

Consistency ratio = 0.06
Consistency is acceptable.

Figura 41 - Resultado final dos pesos calculados para os fatores sócio-econômicos.

4.4.2. Justificativa das Ponderações Adotadas

A seguir, são apresentadas as considerações e justificativas das comparações par-a-par adotadas nos critérios escalonados (fatores):

4.4.2.1. Fatores Ambientais

- ***Fator Distância dos Cursos D'água (FA1) e Fator Distância das Falhas Geológicas (FA2): 3***

O fator Distância dos Cursos D'água é moderadamente mais importante do que o fator Falhas, pois o risco do transporte de efluentes atingir a malha hidrográfica é maior, uma vez que a densidade e distribuição dessa malha é superior às falhas existentes.

- ***Fator Distância dos Cursos D'água (FA1) e Fator Pedológico (FA3): 5***

O fator Distância dos Cursos D'água é fortemente mais importante do que o fator Pedológico, pois o risco do fluxo de poluentes atingir as águas sub-superficiais e superficiais é maior, uma vez que o solo tem a capacidade de filtrar e reduzir a velocidade de percolação do efluente.

- ***Fator Distância dos Cursos D'água (FA1) e Fator Geológico (FA4): 5***

O fator Distância dos Cursos D'água é fortemente mais importante do que o fator Geológico, pois o risco do fluxo de contaminantes atingir as águas sub-superficiais e superficiais é maior, mesmo em classes geológicas como os MACIÇOS GRANÍTICOS.

- ***Fator Distância dos Cursos D'água (FA1) e Fator Geomorfológico (FA5): 7***

O fator Distância dos Cursos D'água é muito fortemente mais importante do que o fator Geomorfológico, pois existe o risco dos contaminantes alcançarem as águas sub-superficiais e superficiais mesmo em classes geomorfológicas como os MODELOS DE DISSECAÇÃO EM COLINAS.

- ***Fator Distância dos Cursos D'água (FA1) e Fator Unidades Naturais (FA6): 9***

O fator Distância dos Cursos D'água é extremamente mais importante do que o fator Unidades Naturais, pois o risco dos poluentes atingirem as águas sub-superficiais e superficiais é maior, mesmo em áreas com características intrínsecas como as terras quentes, planas, de regiões secas, férteis, enxutas e de textura fina.

- ***Fator Distância das Falhas Geológicas (FA2) e Fator Pedológico (FA3): 5***

O fator Distância das Falhas Geológicas é fortemente mais importante do que o fator Pedológico, da mesma forma que o fator Distância dos Cursos D'água, ou seja, a possibilidade de ocorrência do fluxo de contaminantes em direção às falhas é considerável.

- ***Fator Distância das Falhas Geológicas (FA2) e Fator Geológico (FA4): 5***

O fator Distância das Falhas Geológicas é fortemente mais importante do que o fator Geológico, da mesma forma que a justificativa apresentada anteriormente.

- ***Fator Distância das Falhas Geológicas (FA2) e Fator Geomorfológico (FA5): 7***

O fator Distância das Falhas Geológicas é muito fortemente mais importante do que o fator Geomorfológico, da mesma forma que o fator Distância dos Cursos D'água, ou seja, a possibilidade da ocorrência do transporte de contaminantes em direção às falhas é o ponto crítico da consideração.

- ***Fator Distância das Falhas Geológicas (FA2) e Fator Unidades Naturais (FA6): 9***

O fator Distância das Falhas Geológicas é extremamente mais importante do que o fator Unidades Naturais, da mesma forma que o fator Distância dos Cursos D'água.

- ***Fator Pedológico (FA3) e Fator Geológico (FA4): 1***

Os fatores Pedológico e Geológico são igualmente importantes, pois apresentam característica intrínsecas que se relacionam, uma vez que os solos têm aspectos inerentes à sua formação geológica.

- ***Fator Pedológico (FA3) e Fator Geomorfológico (FA5): 3***

O fator Pedológico é moderadamente mais importante do que o fator Geomorfológico, pois é possível desenvolver operações no aterro sanitário em áreas com solos de boa formação, mesmo em terrenos um pouco mais íngremes.

- ***Fator Pedológico (FA3) e Fator Unidades Naturais (FA6): 5***

O fator Pedológico é fortemente mais importante do que o fator Unidades Naturais, pois é possível desenvolver operações no aterro sanitário

em áreas com solos de boa formação, mesmo em terras mais frias e acidentadas.

- ***Fator Geológico (FA4) e Fator Geomorfológico (FA5): 3***

O fator Geológico é moderadamente mais importante do que o fator Geomorfológico, pois acredita-se que a formação geológica é mais importante que a forma do terreno, uma vez que os critérios de declividade estão sendo atendidos (1-30%).

- ***Fator Geológico (FA4) e Fator Unidades Naturais (FA6): 5***

O fator Geológico é fortemente mais importante do que o fator Unidades Naturais, pois o risco de utilizar áreas com formações geológicas inadequadas é maior, principalmente no desenvolvimento das operações do aterro sanitário.

- ***Fator Geomorfológico (FA5) e Fator Unidades Naturais (FA6): 3***

O fator Geomorfológico é moderadamente mais importante do que o fator Unidades Naturais, pois o risco é maior ao se desenvolver operações no aterro sanitário em áreas com formações geomorfológicas tais como os MODELOS DE DISSECAÇÃO EM COLINAS.

4.4.2.2. Fatores Operacionais

- ***Fator Declividade (FO1) e Fator Distância do Sistema Viário (FO2): 1/5***

O fator Declividade é fortemente menos importante do que o fator Distância do Sistema Viário, pois o custo de implantação e operação do aterro envolvem investimentos menores quando comparados com os gastos em equipamentos, manutenção e combustíveis para o transporte do lixo durante a vida útil do aterro.

- ***Fator Declividade (FO1) e Fator Distância de Custo do Perímetro Urbano (FO3): 1/5***

O fator Declividade é fortemente menos importante do que o fator Distância de Custo do Perímetro Urbano, pois os investimentos em infra-estrutura (abertura de estradas, por exemplo) para escoar o transporte do lixo envolvem consideráveis investimentos quando comparados com o custo de implantação e operação do aterro

- ***Fator Distância do Sistema Viário (FO2) e Fator Distância de Custo do Perímetro Urbano (FO3): 1***

O fator Distância do Sistema Viário e fator Distância de Custo do Perímetro Urbano são igualmente importantes, pois estão relacionados com a distância do sistema viário.

4.4.2.3. Fatores Sócio-Econômicos

- ***Fator Distância dos Distritos (FS1) e Fator Distância da Cidade Sede (FS2): 1/3***

O fator Distância dos Distritos é moderadamente menos importante do que o fator Distância da Cidade Sede, pois a concentração populacional e a intensa atividade humana se concentra na sede do município.

- ***Fator Distância dos Distritos (FS1) e Fator Distância das Fazendas (FS2): 5***

O fator Distância dos Distritos é fortemente mais importante do que o fator Distância das Fazendas, pois as atividade sócio-econômicas são muito mais ativas nos distritos.

- **Fator Distância da Cidade Sede (FS2) e Fator Distância das Fazendas (FS3): 7**

O fator Distância da Cidade Sede é muito fortemente mais importante do que o fator Distância das Fazendas, pois a concentração populacional e a intensa atividade humana se concentra na sede do município.

4.5. Fluxograma de Análise

A aplicação do modelo de seleção e avaliação do estudo de caso foi feita com os recursos do GIS *Idrisi32*, *132.2*. É um sistema raster, que possui um conjunto de ferramentas de análise espacial, incluindo uma vasta gama de operadores de álgebra de mapas (EASTMAN, 1997; CALIJURI, 2000).

No fluxograma apresentado na figura 42, os operadores e as imagens são identificados pelo seu nome tal como é feito pelo programa. Neste fluxograma é seguida a estrutura hierárquica de análise apresentada no quadro 6, que é uma referência sempre presente e importante na compreensão das fases de análises desenvolvidas ao longo desse estudo.

Quadro 6 – Critérios escalonados (fatores) por níveis.

Nível	Fator ambiental	Fator operacional	Fator sócio-econômico
1º	FA	FO	FS
2º	FA1; FA2; FA3; FA4; FA5; FA6	FO1; FO2; FO3	FS1; FS2; FS3

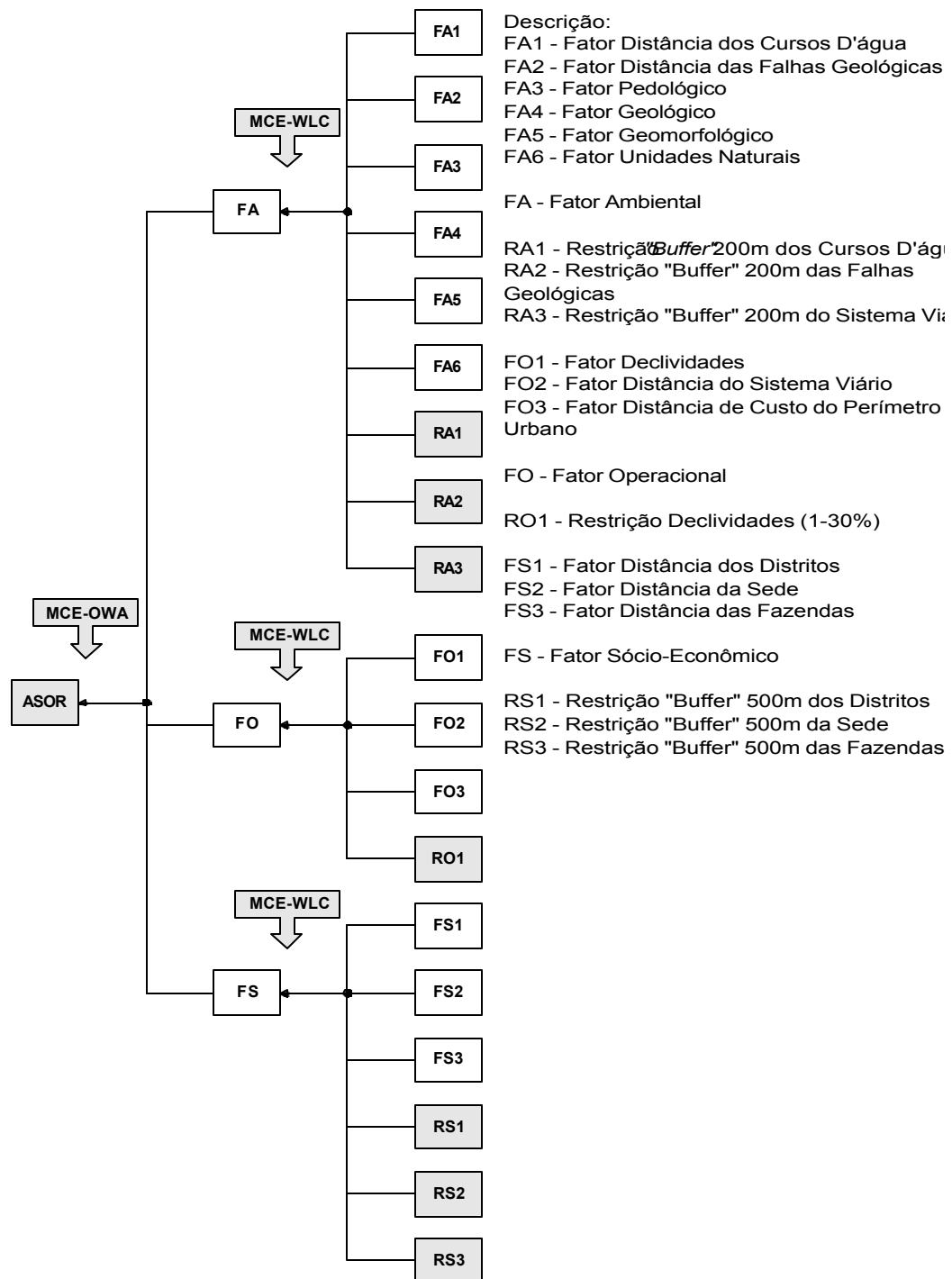


Figura 42 - Fluxograma da combinação dos fatores e restrições adotados.

4.6. Cenários de Avaliação

4.6.1. Introdução

A quantidade de opções possíveis na definição de cenários de avaliação é teoricamente infinita, considerando diferentes combinações de pesos e diferentes combinações de técnicas (MCE-WLC e MCE-OWA) nos diferentes níveis de critérios. Neste trabalho, optou-se por um conjunto de cenários com significado do ponto de vista do seu interesse prático, no contexto da realidade municipal de Cachoeiro de Itapemirim.

Sendo assim, foram consideradas as seguintes linhas de orientação, de acordo com o nível dos critérios (ver quadro 6):

- 2º nível: combinação das imagens resultantes do processo de normalização através do procedimento MCE-WLC para cada um dos três grupos de critérios escalonados (ambiental – FA, operacional – FO e sócio-econômico – FS);
- 1º nível: Combinação dos resultados da agregação do 2º nível, através do procedimento MCE-OWA, usando três conjuntos de pesos ponderados e treze conjuntos de pesos ordenados, o que corresponde a um total de 39 cenários.

4.6.2. Combinação dos Critérios Escalonados no 2º nível (MCE-WLC)

A combinação das imagens correspondentes ao 2º nível origina as imagens FA, FO e FS. Cada grupo de fator (FA, FO e FS) foi processado através da técnica MCE-WLC, cujas características estão indicadas no quadro 7.

Quadro 7 – Combinação dos critérios no 2º nível.

Fatores	Fatores Combinados	Pesos WLC	Observações
FA	FA1	0.4417	O fator ambiental “distância dos cursos d’água” apresentou juntamente com o fator “distância das falhas geológicas” o maior peso devido, principalmente, a maior vulnerabilidade destes fatores às possíveis falhas no projeto do aterro sanitário.
	FA2	0.3013	
	FA3	0.0934	
	FA4	0.0934	
	FA5	0.0452	
	FA6	0.0251	
FO	FO1	0.0909	O fator operacional “distância de custo do perímetro urbano” apresentou juntamente com o fator “distância do sistema viário” o maior peso devido aos elevados custos envolvidos na operação. Apesar do baixo peso dado ao fator “declividade”, às exigências impostas pela NBR 13896/97 (1-30%) estão sendo rigorosamente seguidas.
	FO2	0.4545	
	FO3	0.4545	
FS	FS1	0.2790	O fator sócio-econômico “distância da cidade sede” apresentou juntamente com o fator “distância dos distritos” o maior peso devido, principalmente, à maior concentração populacional destas áreas.
	FS2	0.6491	
	FS3	0.0719	

As imagens resultantes dos três critérios estão apresentadas nas figuras 43, 44 e 45, do Capítulo 5 referente aos Resultados e Discussão.

4.6.3. Combinação dos Critérios no 1º nível (MCE-OWA)

A combinação das imagens correspondentes ao 1º nível associada às restrições adotadas (RA1, RA2, RA3, RA4, RA5, RA6, RO1, RS1, RS2 e RS3), origina à imagem final de adequabilidade $F_n_AOSR_m$ (onde n corresponde ao conjunto de pesos adotado no quadro 8 e m aos cenários processados indicados no quadro 9).

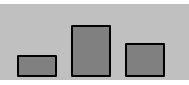
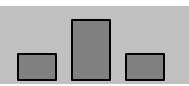
Quadro 8 – Conjunto de pesos ponderados referentes à importância relativa dos critérios escalonados (ambiental, operacional e sócio-econômico) na avaliação do 1º nível.

Conjunto de pesos	Fator	Peso
F_i	FA	0.50
	FO	0.30
	FS	0.20
	Soma	1.00
F_{ii}	FA	0.30
	FO	0.50
	FS	0.20
	Soma	1.00
F_{iii}	FA	0.40
	FO	0.40
	FS	0.20
	Soma	1.00

Utilizou-se, neste procedimento, treze conjuntos de pesos ordenados, de acordo com o quadro 9.

Quadro 9 – Conjuntos de pesos ordenados na avaliação do 1º nível.

Cenário	Pesos ordenados	Risco	Compensação	Característica
AOSR_i	[0.33 0.33 0.33] 	0.50	1.00	Risco médio Máxima compensação
AOSR_{ii}	[1.00 0.00 0.00] 	1.00	0.00	Risco mínimo Sem compensação
AOSR_{iii}	[0.00 0.00 1.00] 	0.00	0.00	Risco máximo Sem compensação
AOSR_{iv}	[0.00 1.00 0.00] 	0.50	0.00	Risco médio Sem compensação
AOSR_v	[0.50 0.40 0.10] 	0.70	0.64	Baixo risco Compensação parcial
AOSR_{vi}	[0.10 0.40 0.50] 	0.30	0.64	Alto risco Compensação parcial
AOSR_{vi} i	[0.10 0.50 0.40] 	0.35	0.64	Risco médio-alto Compensação parcial
AOSR_{vi} ii	[0.40 0.50 0.10] 	0.65	0.64	Risco médio-baixo Compensação parcial
AOSR_{ix}	[0.70 0.20 0.10] 	0.80	0.44	Baixo risco Compensação parcial
AOSR_x	[0.10 0.20 0.70] 	0.20	0.44	Alto risco Compensação parcial

AOSR_{xi}	[0.10 0.70 0.20] 	0.45	0.44	Risco médio-alto Compensação parcial
AOSR_{xi} i	[0.20 0.70 0.10] 	0.55	0.44	Risco médio-baixo Compensação parcial
AOSR_{xi} ii	[0.20 0.60 0.20] 	0.50	0.60	Risco médio Compensação parcial

As imagens resultantes dos cenários finais, isto é, $F_i_AOSR_i$, $F_i_AOSR_{ii}$, ..., $F_i_AOSR_{xiii}$, $F_{ii_AOSR_i}$, $F_{ii_AOSR_{ii}}$, ..., $F_{ii_AOSR_{xiii}}$, $F_{iii_AOSR_i}$, $F_{iii_AOSR_{ii}}$, ..., $F_{iii_AOSR_{xiii}}$, estão apresentadas nas figuras 46, 47 e 48, do capítulo 5, referente aos Resultados e Discussões.

No próximo capítulo (Resultados e Discussões), serão abordados os resultados obtidos nos dois níveis de combinação multi-critério. Com base nestes resultados, sobretudo naqueles que envolvem a técnica MCE-OWA (imagens finais), serão determinados três cenários de risco ideal para o empreendimento em estudo, a partir do qual serão selecionadas as áreas mais adequadas à implantação do aterro sanitário.

5. Resultados e Discussão

A discussão dos resultados da aplicação da proposta metodológica ao estudo de caso é desenvolvida por nível de combinação de critérios. Foram dois os níveis de combinação: 2º nível (MCE-WLC) e 1º nível (MCE-OWA).

O resultado da combinação das imagens no 2º nível são as imagens FA (critério ambiental), FO (critério operacional) e FS (critério sócio-econômico), para cada uma das quais foram definidos pesos desenvolvidos através da comparação par-a-par presente no módulo WEIGHT. As figuras 43, 44 e 45, mostram os resultados deste primeiro procedimento de agregação de critérios.

Na imagem de adequabilidade referente ao fator ambiental observa-se claramente a influência dos fatores Distância dos Cursos D'água e Distância das Falhas Geológicas. Ambos os fatores apresentaram uma importância maior frente aos outros, o que é caracterizado nos pesos obtidos durante o processo de comparação (0.4417 e 0.3013, respectivamente).

A imagem de adequabilidade que caracteriza o fator operacional apresenta a influência dos fatores Distância do Sistema Viário e Distância de Custo do Perímetro Urbano. Ambos os fatores apresentaram uma importância maior frente ao outro, o que pode ser observado nos pesos obtidos durante o processo de comparação (0.2790 e 0.6491, respectivamente).

Por sua vez, na imagem de adequabilidade que representa o fator sócio-econômico, observa-se grandes extensões de terras aptas à implantação

do aterro. É notável também a influência dos fatores Distância da Sede e Distância dos Distritos, que apresentaram pesos relativos de 0.4545 e 0.4545, respectivamente, e, principalmente, das restrições, em ambos os critérios.

As figuras 46, 47 e 48, mostram os mapas de aptidão à implantação de aterro sanitário no município de Cachoeiro de Itapemirim, gerados através da análise integrada dos dados disponíveis sobre a área em estudo, segundo os critérios e pesos estabelecidos no 1º nível. Como já comentado, esses mapas não identificam as áreas aptas ou inaptas, mas representam uma superfície de adequabilidade onde todos os pixels possuem um valor de 0 (menos apto) a 255 (mais apto), resultante da aplicação dos critérios e de sua análise ponderada, que indica sua aptidão individual ao propósito desejado.

A partir dessas superfícies é possível estabelecer um limiar para a seleção das melhores áreas, ou efetuar uma hierarquização das células de forma a selecionar apenas os melhores hectares para a implantação de um aterro sanitário, e sobre estes isolar uma ou mais áreas contíguas do tamanho mínimo desejado. Dessa forma, os mapas permitem uma visão de como o território do município se comporta em termos de aptidão à implantação de um aterro, possibilitando a escolha dos locais dentro das áreas mais aptas que merecem um estudo detalhado.

Ao analisar as imagens resultantes *fi & aosr_i* e *fii & aosr_i*, é possível observar que as mesmas apresentam grandes extensões de áreas com baixa aptidão (inferior a 175), sendo que os melhores locais estão presentes nas proximidades dos núcleos populacionais. Estas imagens apresentam como características principais, risco médio (0.50) e máxima compensação (1.00), devido a semelhança no conjunto de pesos ordenados ([0.33 0.33 0.33]). Por sua vez, a imagem *fi & aosr_i* possui um conjunto de pesos relacionais (importância relativa) diferente da imagem *fii & aosr_i*, uma vez que a primeira considera mais importante o fator ambiental (0.50) em detrimento do fator operacional (0.30) e sócio-econômico (0.20).

As imagens *fi & aosr_ii* e *fii & aosr_ii* têm como características principais, risco mínimo (1.00) sem compensação (0.00). Estas características estão intimamente relacionadas com a análise *boolean*, uma vez que as imagens resultantes apresentam um cenário pessimista. Áreas com baixíssima adequabilidade (inferior a 80) são encontradas na região Oeste e Nordeste do município, principalmente nos locais de maior declividade. A diferença entre as duas imagens de aptidão está no conjunto de pesos relacionais.

Dentre as imagens que apresentaram melhores resultados, estão: fii & aosr_vii e fii & aosr_vii. São as imagens que apresentaram as melhores características para implantação do empreendimento (risco médio-alto, 0.35 e, compensação parcial, 0.64). Optou-se por desenvolver uma metodologia de risco médio-alto uma vez que os dados (mapas) são provenientes de fontes confiáveis (IBGE, CPRM e LabSIGEO) aliado ao fato do tipo de empreendimento permitir um maior grau de risco.

Com o objetivo de tomar uma decisão mais criteriosa, também optou-se por desenvolver uma metodologia onde o maior peso é aplicado ao fator operacional em detrimento aos outros fatores. Esta decisão foi baseada em dois critérios: o primeiro, refere-se ao fato de que as restrições adotadas já abordam intensamente os aspectos ambientais e, o segundo, está relacionado com a elevação dos custos operacionais que podem inviabilizar o empreendimento. Desta forma, considerou-se a imagem fii & aosr_vii como a que apresenta as melhores características para seleção de áreas para instalação de aterros sanitários.

Os outros cenários processados foram comparados com os cenários acima e, por não atenderem as características propostas, não foi realizada uma análise mais aprofundada.

5.1. Cálculo da Área Mínima

Atualmente, o município de Cachoeiro de Itapemirim- ES apresenta uma população de aproximadamente 174.227 habitantes. Adotando-se uma produção de lixo *per capita* da ordem de 0,50 Kg/hab/dia, densidade média de lixo de 0,70 t/m³ e uma vida útil de 10 anos (mínimo exigido pela NBR 13896/97) é possível estimar a produção de lixo neste período. Com o auxílio da planilha eletrônica Produção de Lixo (ver figura 49), pode-se entrar com os dados apresentados anteriormente, e assim obter volume total de lixo a ser aterrado.

Microsoft Excel - Planilha_CACHOEIRO

Arquivo Editar Formatação Ferramentas Referências Dados Layout Planilha Ajuda

1 PRODUÇÃO LIXO AO LONGO DOS ANOS

2 CIDADE CACHOEIRO DE ITAPEMIRIM

3

4

5 População Inicial = 174237

6 Taxa de crescimento = 0,5 %/ano

7

8 Crescimento proporcional = 2,0000 %

9 Crescimento geométrico = 1 %

10 População Anual = 82

11 Tempo Anual Total = 11 anos

12

13 Crescimento total = 0,04 %

14

15 Plano de expansão = 0 (Nível)

16

ANO	POPULAÇÃO	GERAÇÃO (kg)	LIQUOR (t/ano)	LIQUOR (t/ano)	ML (m³)	VOL. ACUM. (m³)	% Coberto
1981	177112	0,51	89,36	30388,48	40412,11	43412,11	0,9277
1982	181396	0,51	96,48	31990,34	40688,62	84599,73	0,92647
1983	184094	0,52	89,05	32794,00	40840,65	125390,31	0,9400
1984	186599	0,52	93,33	34067,26	40667,51	164025,82	0,9512
1985	189361	0,53	96,98	35389,95	50465,07	204592,90	0,96917
1986	194208	0,53	100,72	36714,00	52520,00	247112,98	0,9672
1987	200132	0,54	104,62	38191,39	54558,13	291662,00	0,9750
1988	204135	0,54	108,70	39674,21	56677,44	338339,45	0,98345
1989	208212	0,55	112,92	41214,69	58877,59	387217,45	0,9917
1990	212362	0,56	117,30	42814,79	61169,98	438381,43	1
1991							
1992							
1993							
1994							
1995							
1996							
1997							
1998							
1999							
2000							
2001							
2002							
2003							
2004							
2005							
2006							
2007							
2008							
2009							
2010							
2011							
2012							
2013							
2014							
2015							
2016							
2017							
2018							
2019							
2020							
2021							
2022							
2023							
2024							
2025							
2026							
2027							
2028							
2029							
2030							
2031							
2032							
2033							
2034							
2035							
2036							
2037							
2038							
2039							
2040							
2041							
2042							
2043							
2044							
2045							
2046							
2047							
2048							
2049							
2050							
2051							
2052							
2053							
2054							
2055							
2056							
2057							
2058							
2059							
2060							
2061							
2062							
2063							
2064							
2065							
2066							
2067							
2068							
2069							
2070							
2071							
2072							
2073							
2074							
2075							
2076							
2077							
2078							
2079							
2080							
2081							
2082							
2083							
2084							
2085							
2086							
2087							
2088							
2089							
2090							
2091							
2092							
2093							
2094							
2095							
2096							
2097							
2098							
2099							
2100							
2101							
2102							
2103							
2104							
2105							
2106							
2107							
2108							
2109							
2110							
2111							
2112							
2113							
2114							
2115							
2116							
2117							
2118							
2119							
2120							
2121							
2122							
2123							
2124							
2125							
2126							
2127							
2128							
2129							
2130							
2131							
2132							
2133							
2134							
2135							
2136							
2137							
2138							
2139							
2140							
2141							
2142							
2143							
2144							
2145							
2146							
2147							
2148							
2149							
2150							
2151							
2152							
2153							
2154							
2155							
2156							
2157							
2158							
2159							
2160							
2161							
2162							
2163							
2164							
2165							
2166							
2167							
2168							
2169							
2170							
2171							
2172							
2173							
2174							
2175							
2176							
2177							
2178							
2179							
2180							
2181							
2182							
2183							
2184							
2185							
2186							
2187							
2188							
2189							
2190							
2191							
2192							
2193							
2194							
2195							
2196							
2197							
2198							
2199							
2200							
2201							
2202							
2203							
2204							
2205							
2206							
2207							
2208							
2209							
2210							
2211							
2212							
2213							
2214							
2215							
2216							
2217							
2218							
2219							
2220							
2221							
2222							
2223							
2224							
2225							
2226							
2227							
2228							
2229							
2230							
2231							
2232							
2233							
2234							
2235							
2236							
2237							
2238							
2239							
2240							
2241							
2242							
2243							
2244							
2245							
2246							
2247							
2248							
2249							
2250							
2251							
2252							
2253							

áreas devem possuir para que atendam às exigências impostas durante o processo. Acredita-se que adequabilidades acima de 200 atendam aos critérios estabelecidos e que acima de 220 são ideais.

Utilizando-se uma MACRO desenvolvida no Software GIS Idrisi32, Version 132.2, denominada SITESELECT, foi possível encontrar os melhores locais (adequabilidade acima de 220) que apresentam áreas superiores a 20 ha. Com o objetivo de comparação, procurou-se aplicar a mesma MACRO com adequabilidades acima de 200 e área mínima de 20 ha. As imagens resultantes deste procedimento podem ser vistas na figura 50.

É notável a diferença entre as duas imagens, uma vez que a primeira apresenta uma quantidade de áreas adequadas inferior à segunda. Esta situação advém do fato de que a segunda imagem apresenta uma faixa de adequabilidade aceitável (200-255) maior que a primeira (220-255).

Percebe-se também que o depósito atual de lixo (aterro sanitário) encontra-se sobre uma pequena área de aptidão nula, distante das áreas com aptidão maior que 220 (ver figura 50). A localização sobre uma área que não é a melhor, associada aos potenciais impactos inerentes ao aterro, sugerem que a destinação final dos resíduos sólidos seja deslocada para locais mais apropriados, utilizando-se o mapa de aptidão como guia. Existem inúmeras alternativas, incluindo áreas não muito distantes da localização atual que podem ser utilizadas caso o deslocamento para locais mais distantes incorram em transtornos não previstos no presente estudo. Além de mudar a localização, ressalta-se a necessidade de todas as outras medidas desejáveis para uma adequada disposição de resíduos sólidos urbanos.

5.3. Avaliação do Uso e Cobertura do Solo

Ao analisar a sobreposição das áreas mais adequadas (aptidão maior que 220 e área maior que 20 ha) com a imagem LANDSAT 7 da região em estudo (ver figura 51), é possível observar que algumas destas áreas encontram-se sobre regiões cuja cobertura vegetal é intensa, sobretudo com a presença de florestas nativas, ainda remanescentes da Mata Atlântica. Aliado a isso, tem-se o fato de que um número considerável de áreas apresentam-se distantes do principal centro gerador de resíduos sólidos: a cidade de Cachoeiro de Itapemirim.

Diante desta abordagem, optou-se por não considerar adequadas as áreas, anteriormente aptas, que estão situadas sobre as regiões de cobertura vegetal primária (vegetação nativa) e muito distantes do centro gerador de lixo. A figura 52 mostra a imagem final das áreas consideradas mais adequadas à implantação do aterro sanitário.

Com essa abordagem, é possível limitar o número de áreas a serem analisadas através de estudos superficiais e subsuperficiais localizados. Abordagens como esta aqui descrita permitem racionalizar a aplicação de recursos financeiros e escolher alternativas mais adequadas do ponto de vista ambiental, operacional e sócio-econômico. Análises como a utilizada no presente trabalho, realçam as potencialidades do geoprocessamento para a tomada de decisão em empreendimentos relacionados ao meio ambiente. O processo de ponderação, além de permitir a compensação de uma variável pela outra, pode ser usado para gerar vários cenários para o mesmo objetivo através da simples alteração dos pesos ou da inclusão ou exclusão de variáveis. Aliado a outras ferramentas inovadoras, como a geoestatística, recursos como a classificação contínua representam uma capacidade analítica até há pouco inimaginável para sistemas “desktop”, hoje acessíveis a qualquer usuário.

6. Conclusões e Sugestões

Como conclusões do presente trabalho, têm-se:

- O crescimento da população e da produção de lixo se depara com a redução do número de áreas adequadas à implantação de aterro sanitário disponíveis no município de Cachoeiro de Itapemirim- ES, que hoje tem aproximadamente 174.224 habitantes, e terá, em 10 anos, produzido cerca de 518.381,430 m³ de lixo, com um volume acumulado (lixo + cobertura de solo) de 622.057,70 m³;
- Sabe-se que áreas disponíveis para a instalação de aterro sanitário são cada vez mais escassas devido, principalmente, à intensa urbanização;
- Os mapas de adequabilidade gerados não identificam áreas aptas ou inaptas, mas representam uma superfície de adequabilidade onde todos os pixels possuem um valor de 0 (menos apto) a 255 (mais apto), resultante da aplicação dos critérios e de sua análise ponderada, que indica sua aptidão individual ao propósito desejado;
- As imagens resultantes fi & aosr_i e fii & aosr_i apresentam grandes extensões de áreas com baixa aptidão (inferior a 175), sendo que

os melhores locais estão presentes nas proximidades dos núcleos populacionais;

- As imagens *fi & aosr_ii* e *fii & aosr_ii* estão intimamente relacionadas com a análise *boolean*, uma vez apresentam um cenário pessimista. Áreas com baixíssima adequabilidade (inferior a 80) são encontradas na região Oeste e Nordeste do município, principalmente nos locais de maior declividade;
- Com a imagem de adequabilidade final (*fii & aosr_vii* - risco médio-alto e compensação parcial) e a área mínima necessária (20 ha) definidas, selecionou-se algumas áreas aptas à implantação do empreendimento;
- Utilizando-se a MACRO desenvolvida no Software GIS Idrisi32, Version 132.2, denominada SITESELECT, foi possível encontrar os melhores locais (adequabilidade acima de 220) que apresentam áreas superiores a 20 ha;
- O depósito atual de lixo (aterro sanitário) encontra-se sobre uma área de aptidão nula, distante das áreas com aptidão maior que 220;
- Utilizando-se o mapa de aptidão como guia, existem inúmeras alternativas, incluindo áreas não muito distantes da localização atual que podem ser utilizadas caso o deslocamento para locais mais distantes incorram em transtornos não previstos no presente estudo;
- Foram encontradas 15 áreas entre 20 e 200 ha que apresentam adequabilidade superior a 220;

- Os resultados obtidos no presente estudo revela o SIG como uma ferramenta útil e ágil na integração de informações espaciais para tomada de decisão no processo de avaliação e seleção de áreas aptas à implantação do empreendimento;
- O método utilizado demonstra a potencialidade das análises avançadas disponíveis em alguns programas de SIG, entre eles, o Software GIS Idrisi32, Version 132.2, que possibilitam análises multi-critérios com elevado rigor matemático;
- O presente trabalho propõe uma metodologia simples de análise espacial que agrega três critérios (ambiental, operacional e sócio-econômico) de dados digitais (mapas cartográficos e temáticos e imagem de satélite) espacialmente georeferenciados;
- Espera-se que a metodologia venha orientar a avaliação e seleção de áreas potenciais à instalação de aterros sanitários, visando, sobretudo, a redução de custos operacionais e ambientais, fundamental em um país carente de saneamento básico e proteção ambiental.

Como sugestões de futuros trabalhos, têm-se:

- Atestar a viabilidade definitiva das áreas selecionadas, com levantamentos adicionais de caráter local como, por exemplo, os estudos de superfície e subsuperfície e também os de natureza socio-econômica. Esses estudos visam a verificação *in situ* das potencialidades de cada área para a priorização de cada uma delas;
- Executar o levantamento das condições hidrogeológicas do município de Cachoeiro de Itapemirim- ES, com o objetivo de gerar um mapa que caracterize a profundidade do lençol freático;

- Executar o levantamento das condições de vulnerabilidade geotécnica da município de Cachoeiro de Itapemirim- ES, a fim de atestar a qualidade do solo local;
- Desenvolver o levantamento dos dados referentes ao vetor de crescimento populacional;
- Experiências internacionais comprovam que a valorização excessiva das terras e a indisponibilidade de grandes áreas, torna-se um fator complicador a mais. Por isso, é necessário o levantamento do valor venal das terras assim como a disponibilidade das mesmas;
- Inclusão na análise desenvolvida neste trabalho dos fatores sugeridos anteriormente, a fim de gerar novas imagens de adequabilidade.

7. Referências Bibliográficas

ABGE, (1998). **Geologia de Engenharia**. São Paulo, SP, Brasil. 515p;

ABNT, (1987). **Resíduos sólidos: classificação (NBR 10.004/87)**.
ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

ABNT, (1992). **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (NBR 8.419/92)**. ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

ABNT, (1997). **Aterros de resíduos não perigosos: critérios para projeto, implantação e operação (NBR 13.896/97)**. ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

ANDRADE, F. S., (1999). **Uso de sistemas de informação geográfica na identificação de áreas potenciais para a instalação de aterros sanitários no Distrito Federal**. Tese (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências/UnB. Brasília, DF, Brasil. 131p;

ANDRADE, F. S., (2000). **Uso de sistemas de informação geográfica na identificação de áreas potenciais para a instalação de aterros sanitários no Distrito Federal**. Congresso Brasileiro de Geoprocessamento (GISBRASIL-2000). Salvador, BA, Brasil. 29p;

BAGCHI, A., (1994). **Design, construction and monitoring of landfills**. 2nd ed. Wiley-Interscience, New York, NY, USA. 359p;

BIDONE, F. R. A. & POVINELLI, J., (1999). **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. Projeto REENGE. EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil. 120p;

BRAGA, F. S., NÓBREGA, C. C., HENRIQUES, V. M., (2000). **Estudos da composição dos resíduos sólidos domiciliares em Vitória-ES**. Revista Limpeza Pública. Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP). Edição 55. São Paulo, SP, Brasil. p. 11-17;

CALIJURI, M. L. **Treinamento em Sistemas de Informações Geográficas**. Núcleo SiGEO. Universidade Federal de Viçosa, 156p., 2000;

CANSONI, A. J., PERES, C. S., CASTRO, A. P., (1995a). **Origem e composição do lixo**. In: JARDIM, N. S. (ed.). Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. IPT, São Paulo, SP, Brasil. Capítulo IV, p. 22-35;

CANSONI, A. J., BENVENUTO, C., PARZANESE, G. A. C., SILVA, I. C., ALBUQUERQUE FILHO, J. L., CUNHA, M. A., (1995b). **Disposição final do lixo**. In: JARDIM, N. S. (ed.). Lixo municipal : manual de gerenciamento integrado. IPT, São Paulo, SP, Brasil. Capítulo IV, p. 73-124;

CHARNPRAATHEEP, K. & GANER, B. Z. Q., (1996). **Preliminary landfill site screening using fuzzy geographical information systems**. Waste Management & Research. V15. p. 197-215;

CONRAD, J., (2000). **Protecting groundwater resources using geographic information systems – case study: regional waste site identification, Western Cape**. Freshwater Resource. 8p;

COELHO, A. G., (2000). **Requisitos geotécnicos dos locais para a implantação dos aterros de resíduos urbanos**. Seminário sobre aspectos

geotécnicos do projecto e construção de aterros de resíduos. Sociedade Portuguesa de Geotecnia, LNEC, Lisboa, Portugal. p. 1-10;

CPRM, (1993). **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Cachoeiro de Itapemirim - Folha SF.24-V-A-V – Estado do Espírito Santo (texto explicativo)**. CPRM. Brasília, DF, Brasil. 176p;

DANIEL, D. E., (1993). **Clay liners. Geotechnical practice for waste disposal**. Chapman & Hall. London, UK. Cap. 7, p. 137-163; (*in* KATAOKA, 2000)

EASTMAN, J. R.; JIANG, H., (1996). **Fuzzy measures in multi-criteria evaluation**. Proceedings, Second Internacional Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Studies. May 21-23, Fort Collins, Colorado, EUA. p. 527-534;

EASTMAN, J. R.; JIANG, H.; TOLEDANO, J., (1998). **Multi-criteria and multi-objective decision making for land allocation using GIS**. p. 527-534 (*in* RAMOS & MENDES, 2001);

EASTMAN, J. R., (1997). **IDRISI for Windows: User's Guide. Version 2.0**. Worcester: Clark University - Graduate School of Geography;

EGLOFFSTEIN, T., (1994). **Fundamentals. Properties and test methods to assess bentonite used in geosynthetic. Geosynthetic Clay Liners**. Proceedings of an International Symposium. A. A. Balkema/Rotterdam/Brookfield. Nürnberg, Germany. Cap. 2, p. 51-72;

EMCAPA, (1999). **Mapa digital das unidades naturais do Município de Cachoeiro de Itapemirim (escala 1:400.000)**. Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária. Vitória, Espírito Santo, Brasil;

IBGE, (1978). **Carta digital plani-altimétrica (escala 1:50.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1983a). **Mapa digital de geologia (escala 1:100.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1983b). **Mapa digital de geomorfologia (escala 1:250.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1983c). **Mapa digital de pedologia (escala 1:250.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1983d). **Mapa digital de hidrografia (escala 1:250.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1997). **Mapa digital político-administrativo**. Malha digital político-administrativo do Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1992). **Carta digital plani-altimétrica (escala de 1:50.000)**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, RJ, Brasil;

IBGE, (1991). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), 1989**. SEPLAN. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 70p;

IPT, (1995). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. Anexo B - Normas. IPT, São Paulo, SP, Brasil., p. 259-262;

IPT, (2000). **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. 2ª edição. IPT, São Paulo, SP, Brasil., 370p;

KATAOKA, S. M., (2000). **Avaliação de áreas para disposição de resíduos: proposta de planilha para gerenciamento ambiental aplicado a aterro sanitário industrial**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil. 326p;

KURTENER, D. & BADENKO, V., (1999). **A gis methodological framework based on fuzzy sets theory for land use manegement**. Fuzzy sets and systems. V8. p. 155-181;

LANGE, M., (1998). **Geoenvironmental aspects of waste disposital**. **Environmental Geology**. v. 35, n. 1. p 1-18;

LIMA, G. S., (1999). **Seleção de áreas para implantação de aterros sanitários: uma proposta baseada na análise do valor e lógica fuzzy**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil - Geotecnia). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 153p;

LIMA, L. M. Q., (1995). **Lixo: tratamento e biorremediação**. Ed. Hermus. 3ª edição. São Paulo, SP, Brasil. 261p;

LOPES, M. L., (2000). **Problemas relativos à estabilidade de aterros de resíduos**. Seminário sobre Aspectos Geotécnicos do Projeto e Construção de Aterros de Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Lisboa, Portugal. Cap. 2, p. 1-55;

MAHLER, F. C. & LEITE, E. L., (1998). **Metodologia de seleção de áreas para implantação de aterros sanitários**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, SP, Brasil. Volume 3. p. 155-160;

MALCZEWSKI, J., (1999). **GIS and multicriteria decision analysis**. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA;

MARQUES, E. T., (2001). **Identificação de áreas potenciais para a disposição de resíduos de mármore e granitos em Cachoeiro de Itapemirim - ES**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). DEC/UFV. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 103p;

MASSUNARI, I. S., BOAVENTURA, M. A., FONTES, U. P., NASCIMENTO, M. C. B., KARMANN, I., HAMANA, J., FARIAS, R. L., (2000a).

Seleção de áreas para aterro sanitário: implantação de um aterro sanitário em Ilhéus-BA. Revista Limpeza Pública. Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP). Edição 54. São Paulo, SP, Brasil. p. 17-22;

MASSUNARI, I. S., BOAVENTURA, M. A., FONTES, U. P., NASCIMENTO, M. C. B., KARMANN, I., HAMANA, J., FARIAS, R. L., (2000b). **Seleção de áreas para aterro sanitário: implantação de um aterro sanitário em Ilhéus-BA (continuação).** Revista Limpeza Pública. Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP). Edição 55. São Paulo, SP, Brasil. p. 21-23;

Mc BEAN, E. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J., (1995). **Solid waste landfill engineering and design.** Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 521p.

MENDONÇA, R., (2000). **Operação de aterros sanitários. Curso básico sobre aterros sanitários.** Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP). São Paulo, SP, Brasil. p. 82-97;

MENEZES, D. B., (1995). **Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos – S.P, no meio físico.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil), EESC-USP, São Carlos, São Paulo, Brasil. 102p;

ORTH, M. H. A., (2000). **Legislação ambiental federal e licenciamento ambiental de aterros sanitários.** Curso básico sobre aterros sanitários. Associação Brasileira de Limpeza Pública (ABLP). São Paulo, SP, Brasil. p. 13-41;

RAMOS, R. A. R. & MENDES, J. F. G., (2001). **Avaliação da aptidão do solo para localização industrial: o caso de Valença.** Revista Engenharia Civil. Número 10, Universidade do Minho, Minho, Portugal. p. 7-29;

RAMOS, R. A. R., (2000). **Localização industrial: um modelo para o noroeste de Portugal.** Tese (doutorado). Braga: Universidade do Minho, Minho, Portugal; (*in* RAMOS & MENDES, 2001)

REDDI, L. N. & INYANG, H. I., (2000). **Geoenvironmental engineer: principles and applications**. Marcel Dekker. New York, NY, USA. 494p;

RIBEIRO, A. R., (1996). **Fuzzy multiple attribute decision making: a review and new preference elicitation techniques**. Fuzzy sets and systems. V78. p. 155-181;

VIEIRA, S. J., & LAPOLLI, F. R., (2001). **Escolha de áreas para o tratamento e disposição final de resíduos sólidos: Florianópolis- SC**. 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES-RIO99. III – 009. p. 1681-1690;

VOOGD, H., (1983). **Multicriteria evaluation for urban and regional planning**. Pion Ltd. London, UK; (*in* RAMOS & MENDES, 2001)

WINTERFELDT, D. Von & EDWARDS, W., (1986). **Decision analysis and behavioural research**. Cambridge University Press. Cambridge, UK; (*in* RAMOS & MENDES, 2001)

YAGER, R. R., (1988). **On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Volume 8 (1). p. 183-190; (*in* RAMOS & MENDES, 2001)

ZADEH, L. A., (1965). **Fuzzy sets. Information and control**. V8. p. 338-353;

ZUQUETTE, L. V., (1993). **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração**. Tese (Livre Docência). Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), USP, São Carlos, SP, Brasil. 368p;