

WORKSHOP PÓS DOUTORAMENTO 2015

Universidade do estado do Rio de Janeiro

Faculdade de Geologia

Geotecnologias Aplicadas ao Estudo de Localização de Repositórios de Rejeitos Radioativos de Alto Nível em Ambientes Geológicos no Estado do Rio de Janeiro

Corbiniano Silva

Monica da Costa Pereira Heilbron

Paulo Fernando Lavalle Heilbron

FGEL



Panorama sobre as Atividades Nucleares

Energia Nuclear

▶ Geração de Energia e Usos Diversos

▶ Instalações Radioativas

➤ Na Indústria;

- Controle de processos industriais (medidores de nível, gramatura, etc);
- Análise e inspeção de peças (ensaios não destrutivos: gamagrafia e neutronografia);
- Modificação e produção de polímeros;
- Monitoração e determinação de desgaste de refratários de altos fornos;

➤ Na Medicina;

- No Tratamento do Câncer;
- Na Medicina Diagnóstica;
- “Instalações de Medicina Nuclear são importantes usuários de radioisótopos, principalmente com fins diagnósticos, atendendo anualmente a 1.000.000 pacientes, dos quais 80% em hospitais do INSS.”

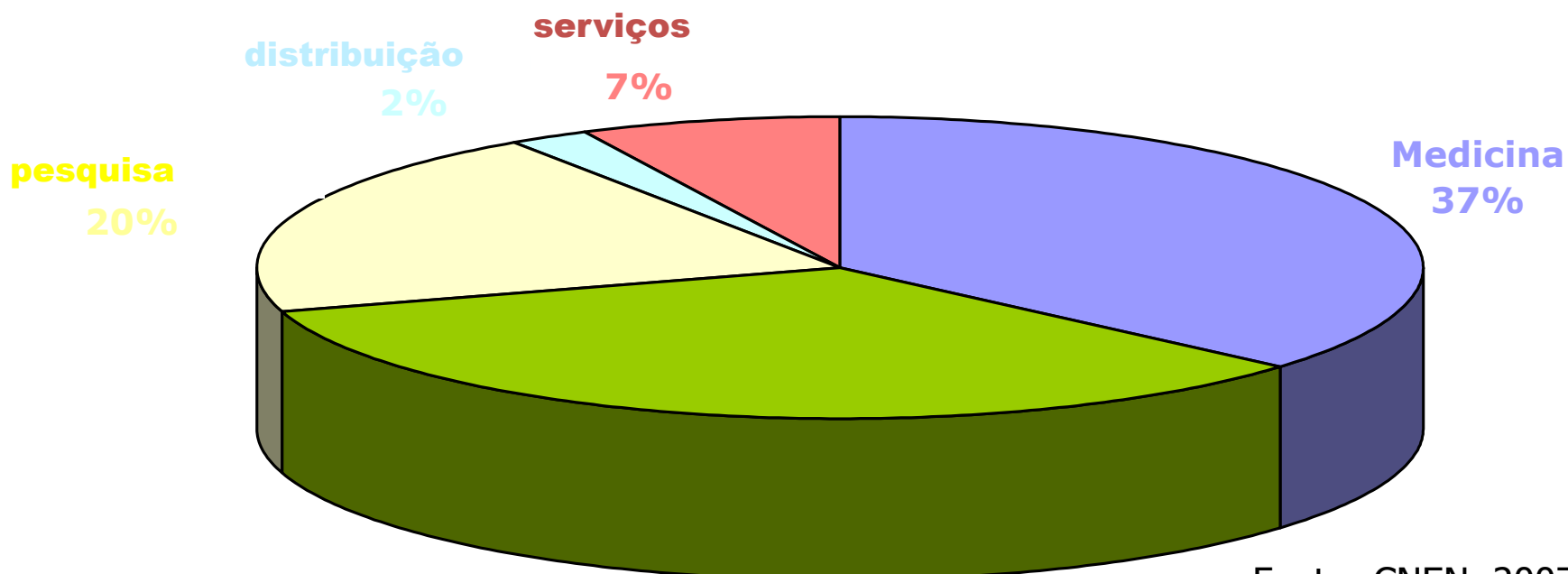
Os Rejeitos Radioativos

▶ A Geração de Rejeitos Radioativos no Brasil

- ▶ **Duas** usinas nucleares em operação e uma em construção (RJ);
- ▶ **Duas** minas de urânio (Uma em operação na Bahia a outra parada em Poços de Caldas);
- ▶ **Um** complexo para enriquecimento de urânio e montagem de combustível (RJ);
- ▶ **Quatro** reatores de pesquisa (1 RJ, 2 SP e 1 MG);
- ▶ **Uma** Planta Piloto do ciclo do combustível incluindo a parte de conversão de urânio em UF₆ e outra para enriquecimento (Marinha – SP);
- ▶ **3455** Instalações médicas, industriais e de pesquisa que utilizam materiais radioativos(todos os estados);
- ▶ **Uma** planta para processamento das areias monazíticas (ES);
- ▶ Exploração de petróleo NORM (vários estados);
- ▶ Atividades Minero-industriais (Niobium, tantalum, zirconita, etc – (Vários estados).

Os Rejeitos Radioativos

3455 Instalações Radiativas licenciadas no Brasil

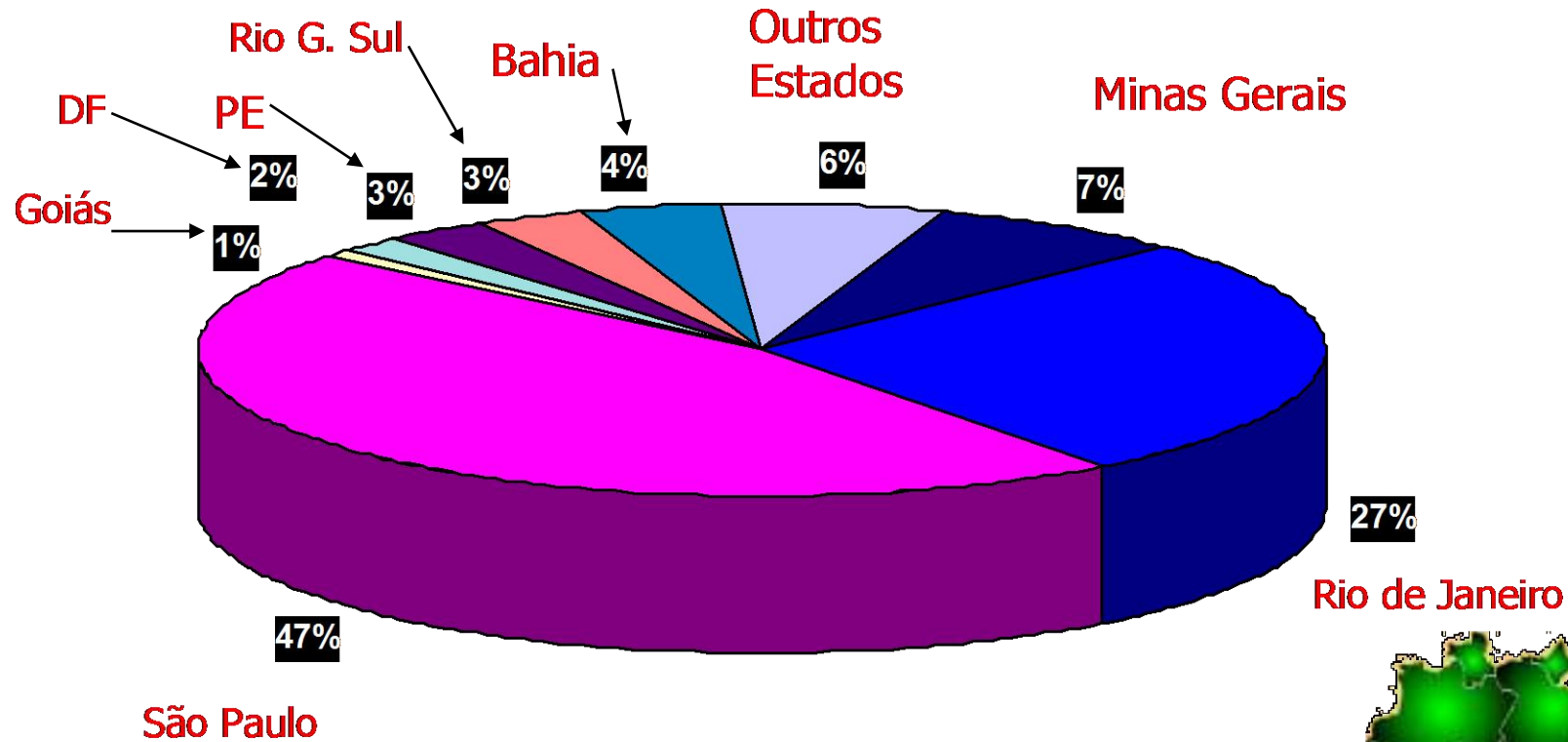


Instalação	Total (unidades)
Medicina	1259
Indústria	1167
Pesquisa	70
Distribuição	75
Serviços	248
Total:	3455

Fonte: CNEN, 2007.

Os Rejeitos Radioativos

ESTADOS QUE MAIS GERAM REJEITOS RADIOATIVOS



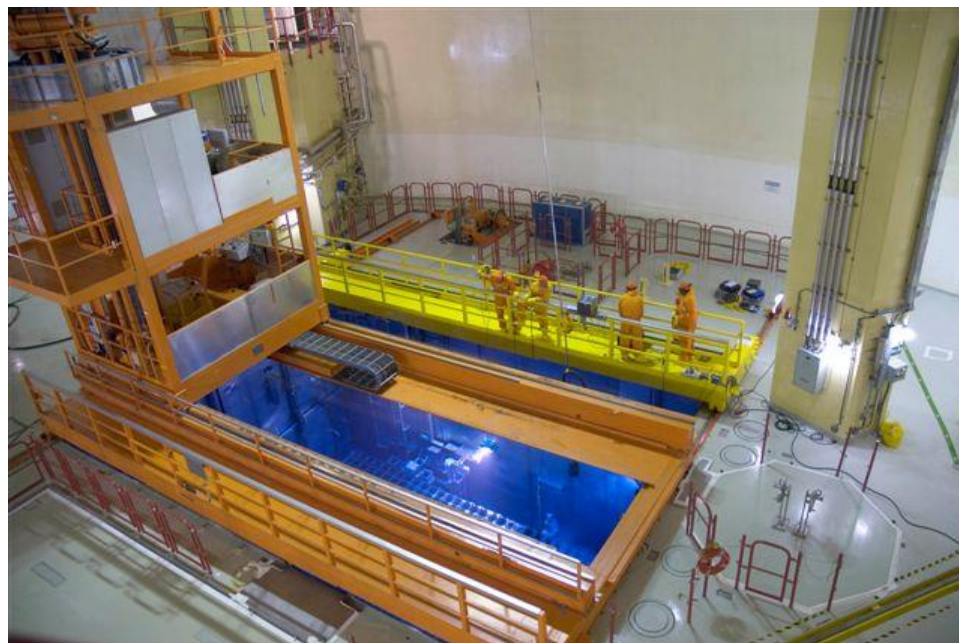
Fonte: CNEN 2007

Os Rejeitos Radioativos

Rejeitos e combustível irradiado das usinas

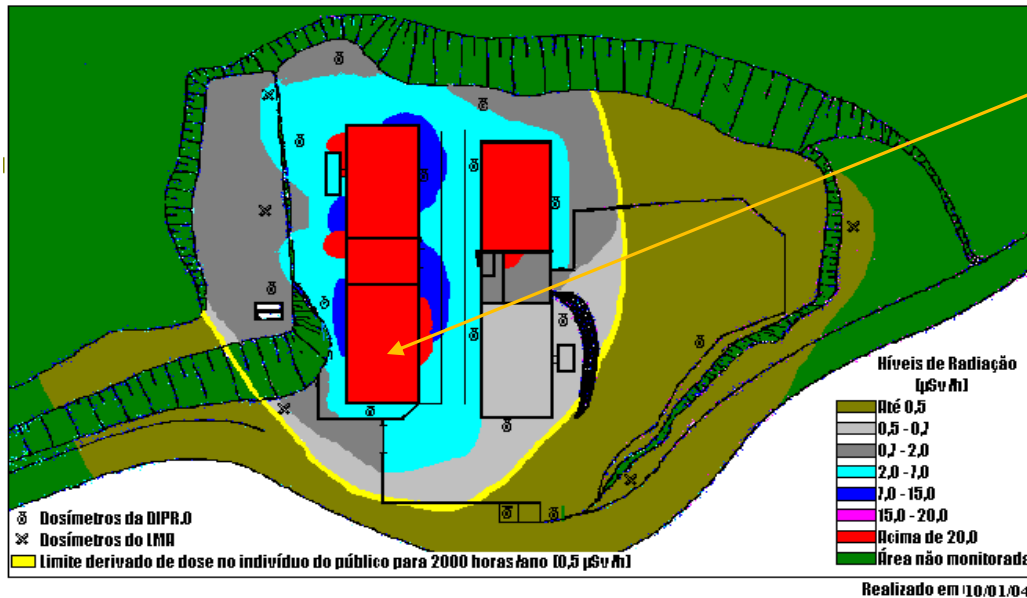


Local de Armazenagem	Inventário de Rejeitos de Alto Nível			
	Angra 1		Angra 2	
	Capacidade	Ocupação	Capacidade	Ocupação
Nova Sala de Armazenagem	45	0	75	0
Região 1 da Piscina	252	125	264	63
Região 2 da Piscina	1000	427	820	88
Vaso do Reator	121	121	193	193



Os Rejeitos Radioativos

Rejeitos de Baixo e Médio Níveis das Usinas Nucleares



Os Rejeitos Radioativos

Classificação dos Depósitos de Rejeitos no Brasil, conforme Lei 10.308 e IAEA

- 1. DEPÓSITOS INICIAIS** (LOCALIZADOS NA PRÓPRIA INSTALAÇÃO GERADORA DE RESPONSABILIDADE DO OPERADOR);
- 2. DEPÓSITOS INTERMEDIÁRIOS** (PARA ONDE SÃO LEVADOS PARA SEREM TRATADOS E ACONDICIONADOS PARA ESTAREM PRONTO PARA A DEPOSIÇÃO FINAL DE RESPONSABILIDADE DA CNEN-DPD – LOCALIZADOS NOS INSTITUTOS DA CNEN);
- 3. DEPÓSITOS PROVISÓRIOS** (EM CASO DE ACIDENTE);
- 4. DEPÓSITOS FINAIS**, CUJA SELEÇÃO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO É DE RESPONSABILIDADE DA CNEN/DPD, E CUJO LICENCIAMENTO É DE RESPONSABILIDADE DA CNEN/BAMA.

Os Rejeitos Radioativos

Classificação dos Rejeitos para Fins de Deposição Final

IAEA Safety Standards

for protecting people and the environment

Classification of Radioactive Waste

General Safety Guide
No. GSG-1



Categoria	Características	Opção de Deposição
1. Rejeito Isento	Níveis de atividade igual ou inferior aos limites de isenção que foram baseados em uma dose anual para os membros do público inferior a 0,01 mSv.	Sem restrição radiológica
2. Rejeito de Baixo e Médio Níveis	Níveis de atividade superior ao limite de isenção e geração de calor inferior ou da ordem 2 kW/m ³ .	
2.1. Vida Curta	Concentração de emissores alfa de meia vida longa restrita (radionuclídeos igual ou inferior a 4000 Bq/g sendo que a média de todos os radionuclídeos no embalado inferior a 400 Bq/g).	Depósitos próximo à superfície ou geológicos.
2.2. Vida Longa	Concentração de radionuclídeos emissores alfa, superiores aos valores anteriores	Depósitos geológicos
3. Rejeito de Alto Nível	Geração de calor superior a 2kW/m ³ e concentração de radionuclídeos emissores alfa superiores as estabelecidas para os rejeitos de meia vida curta (item 2.1)	Depósitos geológicos

Motivação da Pesquisa

Rejeitos Radioativos de Alto Nível

Principal gargalo no Brasil em relação à sua disposição Final, sobretudo porque a Norma atual da CNEN (NE-6.06) até o momento não contempla esse tipo de rejeito.

Objetivos

- ▶ Desenvolver Metodologias para auxiliar o processo de seleção, visando a construção de um repositório final para os rejeitos radioativos de alto nível;
- ▶ Desenvolver um modelo de avaliação multicritérios (MCE) para a seleção de áreas adequadas;
- ▶ Aplicar o modelo para a região do Rio de Janeiro e examinar a adequação de uma instalação de resíduo nuclear no estado;
- ▶ Elaboração de um Banco de Dados Geográficos a partir da implementação de um Sistema GIS;
- ▶ Utilização de Modelos Computacionais para avaliar a dispersão atmosférica das regiões de interesse;
- ▶ Diretrizes Geoambientais e Aspectos Legais.

Aspectos Regulatórios

Sistema Normativo Nacional

NORMA CNEN-NE-6.06

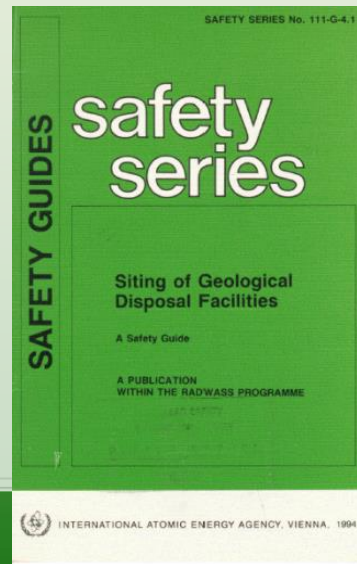
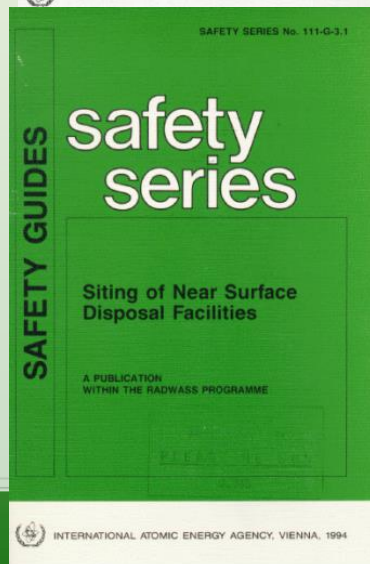
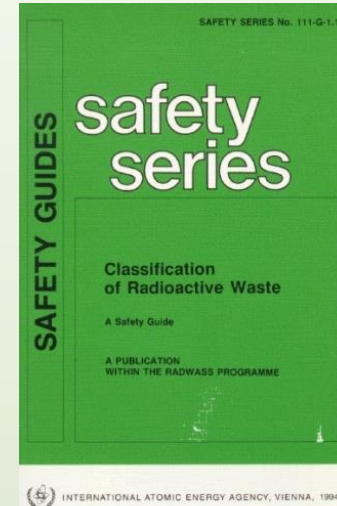
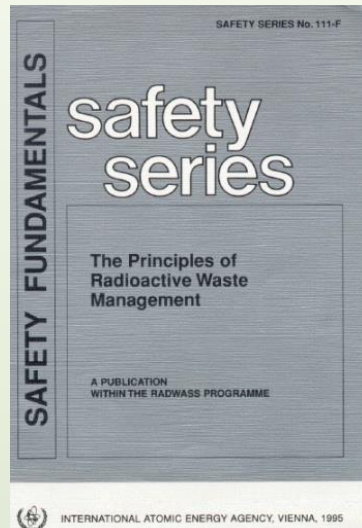
“SELEÇÃO E ESCOLHA PARA LOCAIS DE DEPÓSITOS DE REJEITOS RADIOATIVOS”.

Lei nº 10.308 (20/11/2001)

Estabelece normas para o destino final dos rejeitos radioativos produzidos em território nacional, incluídos a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos radioativos.

Aspectos Regulatórios

Sistema Normativo Internacional



Aspectos Regulatórios

Sistema Normativo Internacional

<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Final Disposal Management of Radioactive Waste, Including Decommissioning</p> <p>SAFETY REQUIREMENTS</p> <p>No. WS-R-2</p> 	<p>IAEA Safety Standards for protecting people and the environment</p> <p>Geological Disposal of Radioactive Waste</p> <p>Jointly prepared by IAEA and EC</p> <p>Safety Requirements</p> <p>No. WS-R-4</p> 	<p>IAEA Safety Standards for protecting people and the environment</p> <p>Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material</p> <p>Safety Requirements</p> <p>No. WS-R-5</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Remediation of Areas Contaminated by Past Activities and Accidents</p> <p>SAFETY REQUIREMENTS</p> <p>No. WS-R-3</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-1.1</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-1.2</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Safety Assessment for Near Surface Disposal of Radioactive Waste</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-1.1</p> 
<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-2.1</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-2.2</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-2.3</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle Facilities</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-2.4</p> 	<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Final Disposal Management of Low and Intermediate Level Radioactive Waste</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-2.5</p> 	<p>IAEA Safety Standards for protecting people and the environment</p> <p>Management of Waste from the Use of Radioactive Material in Medicine, Industry, Agriculture, Research and Education</p> <p>Safety Guide</p> <p>No. WS-G-2.7</p> 	<p>IAEA Safety Standards for protecting people and the environment</p> <p>Storage of Radioactive Waste</p> <p>Safety Guide</p> <p>No. WS-G-6.1</p> 
<p>IAEA SAFETY STANDARDS SERIES</p> <p>Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores</p> <p>SAFETY GUIDE</p> <p>No. WS-G-1.2</p> 	<p>Safety Reports Series No. 35</p> <p>Surveillance and Monitoring of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste</p> 	<p>Safety Reports Series No. 34</p> <p>Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry</p> 	<p>Safety Reports Series No. 27</p> <p>Monitoring and Surveillance of Residues from the Mining and Milling of Uranium and Thorium</p> 	<p>Safety Reports Series No. 19</p> <p>Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment</p> 	<p>Disposal of Low Activity Radioactive Waste</p>  <p>Proceedings of an International Symposium, Córdoba, Spain, 13–17 December 2004</p> 	<p>Safety of Radioactive Waste Disposal</p> <p>Proceedings of an International Conference Tokyo, 3–7 October 2005</p>  

Repositórios Existentes no Mundo

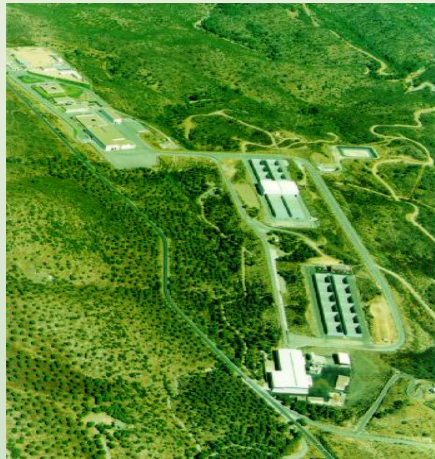
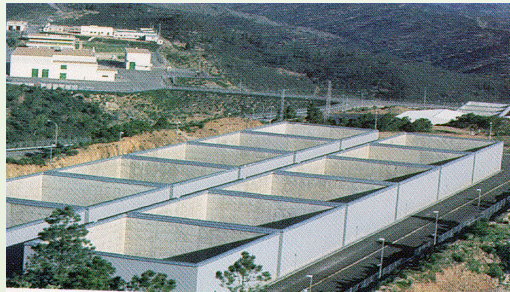


Repositórios Geológicos Mundiais Planejados

País	Tipo (Ano)
Finlândia	Rochas Cristalinas (2020)
Canadá	Rochas Cristalinas (2010) Não concluído
Suécia	Rochas Cristalinas (2020)
Suíça	Rochas Cristalinas (2020)
Bélgica	Formação Argilosa (2025)
Estados Unidos	Formação Vulcânica (2010) Não concluído
França	Várias Opções (2010) Não concluído
Alemanha	Formação Salina

Repositórios Existentes no Mundo

El Cabril (Espanha) - Próximo à Superfície



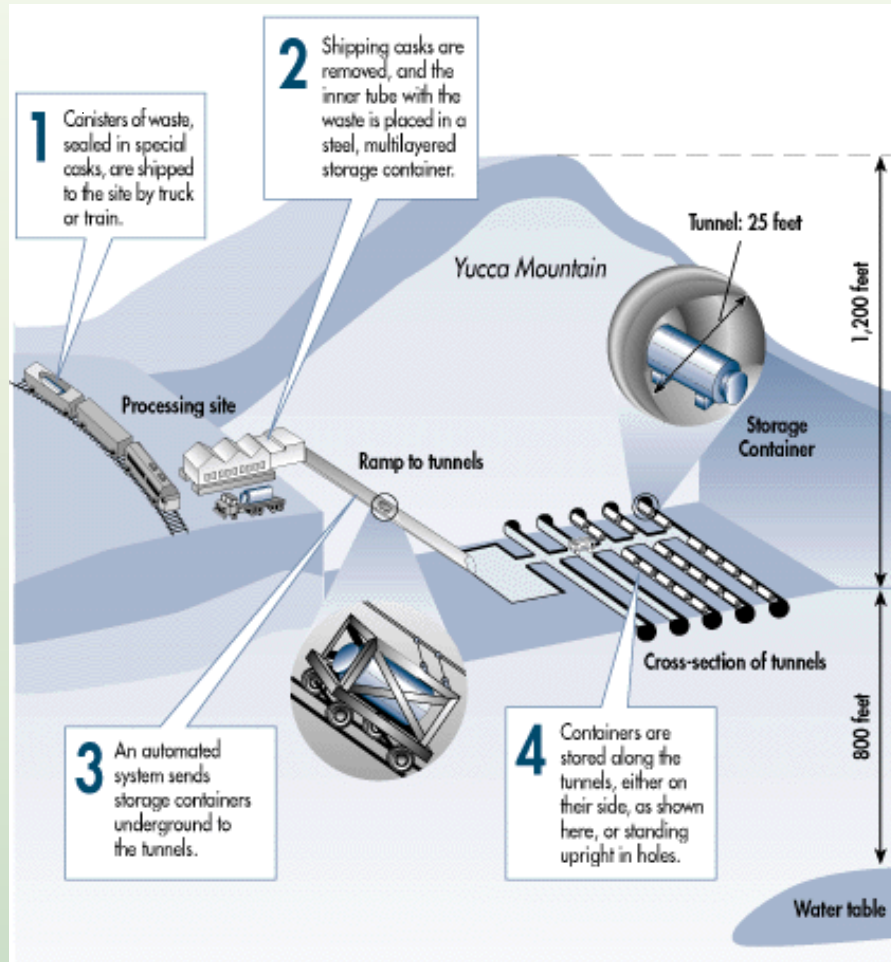
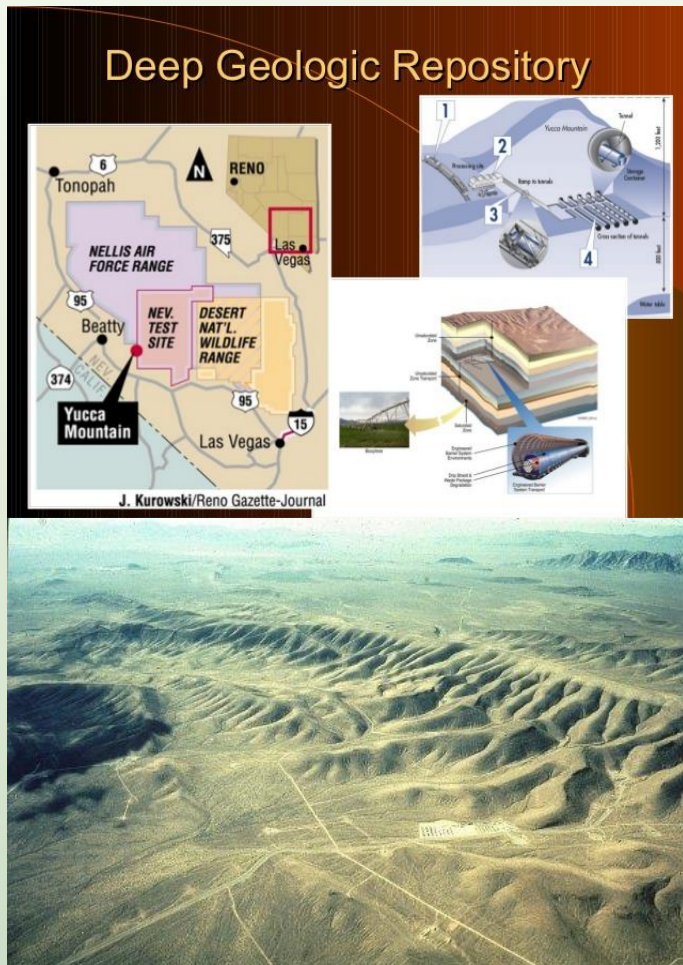
Repositórios Existentes no Mundo

Alemanha (Asse, Konrad, Gorleben e Morsleben) - Geológico



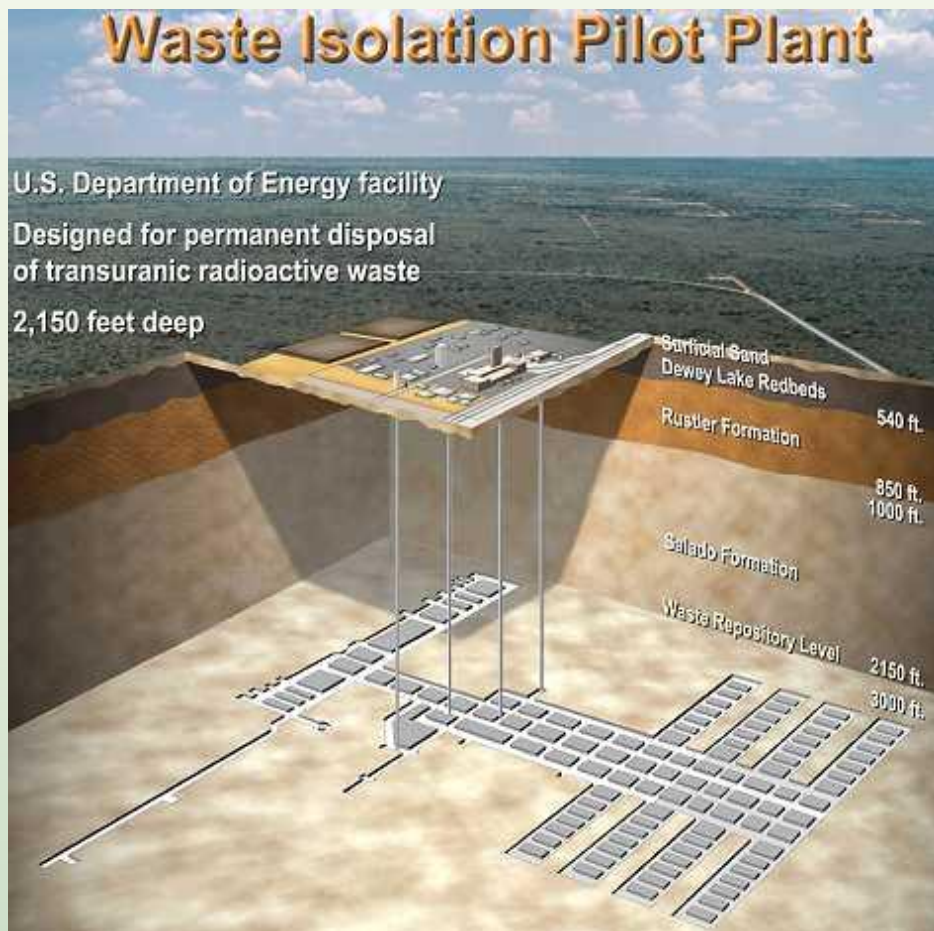
Repositórios Existentes no Mundo

Yucca Mountain (EUA) – Geológico



Repositórios Existentes no Mundo

WIPP (EUA) - Geológico



Repositórios Existentes no Mundo

França (L'Aube, La Manche e La Hague) - Superfície

REPOSITÓRIOS FRANCESES

L'Aube (França)

em operação: capacidade de 1 milhão de m³
+/- 54 campos de futebol de área total



La Manche (França)

fechado após 25 anos de operação
54 reatores - 650.000 m³: +/- 30 campos de futebol

Armazenagem de resíduos de alta atividade:

Usina de La Hague, França



Repositórios Geológicos

De acordo com IAEA (2003), sua importância se justifica pelos seguintes fatores:

1. Isolamento de processos próximos à superfície;
2. Proteção da biosfera;
3. Isolamento de atividades humanas;
4. Contenção Inicial;
5. Limitação das liberações.

Etapas do Processo de Seleção

Critérios de Exclusão

A região de interesse é avaliada através de critérios de exclusão, visando eliminar áreas onde a instalação de repositórios é inviável devido a impedimentos regulatórios, institucionais, de projeto, ambientais e outros.

- Adensamento Populacional
- Razões Ecológicas (APA's, Unidades de Conservação)
- Estruturas geológicas e falhas
- Terrenos alagados.

Critérios de Adequação

Identificação e classificação de um número pequeno de áreas candidatas para estudos mais detalhados.

Nesta etapa, as informações sobre os sítios são mais detalhadas, requerendo investimentos maiores.

Identificação do Local Preferido

O objetivo é selecionar a área mais adequada entre os locais candidatos.

Avaliações adicionais dos locais candidatos são realizadas com dados mais detalhados e graus mais elevados de confiança.

Critérios para Seleção de Áreas

No processo de seleção, segundo diretrizes de segurança e proteção radiológica (IAEA, 1994), os critérios e atributos a serem considerados são:

Segurança

Estruturas, Recursos Minerais, Litologia, Hidrogeologia, Relevo.

Ambiental

Uso e Cobertura do Solo, Vegetação, Áreas Especiais, Recursos Minerais, Hidrogeologia.

Socioeconômico

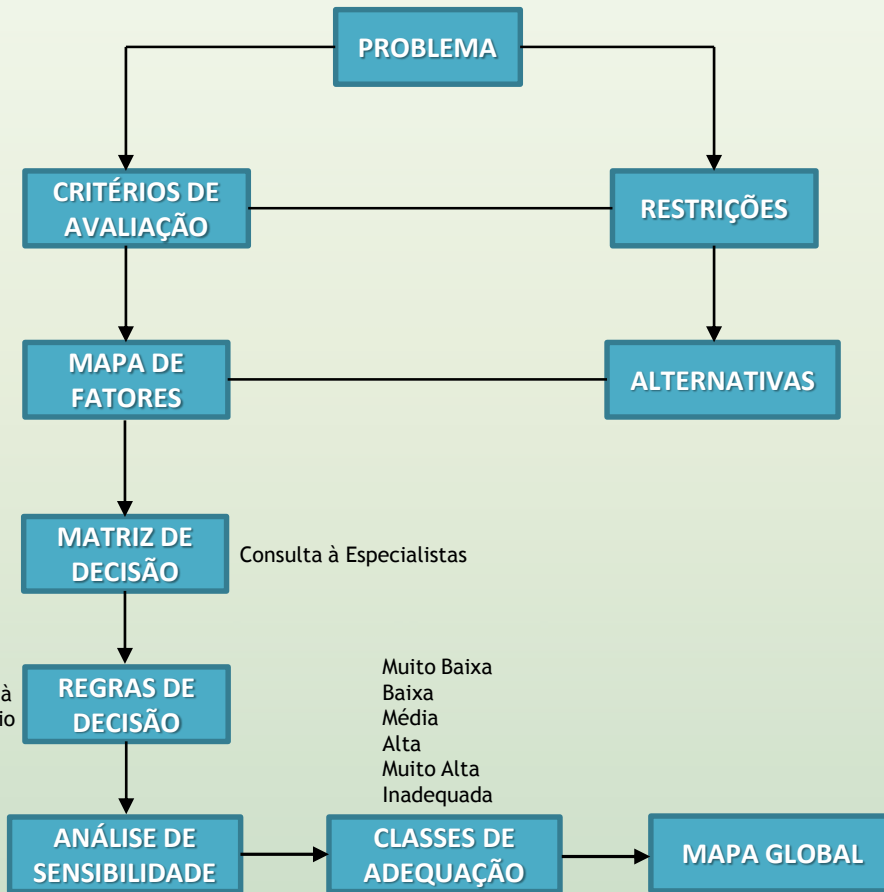
Uso e Cobertura do Solo, Recursos Minerais, Hidrogeologia

Viabilidade Técnica

Estruturas, Litologia, Hidrogeologia, Relevo, Uso e Cobertura do Solo, Transporte.

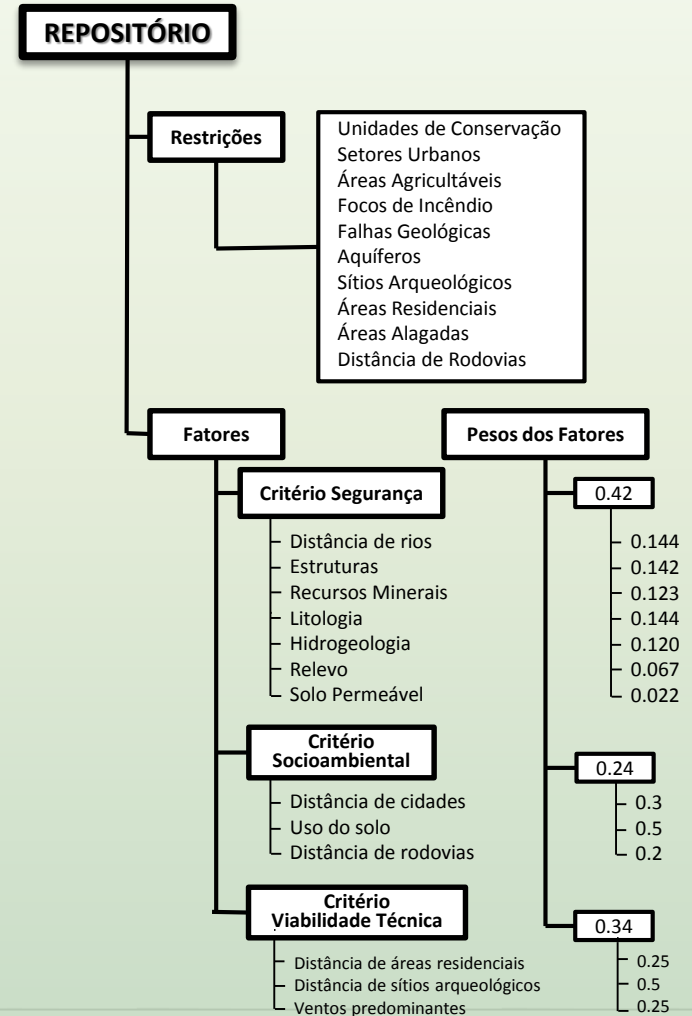
Metodologia

VISÃO GERAL



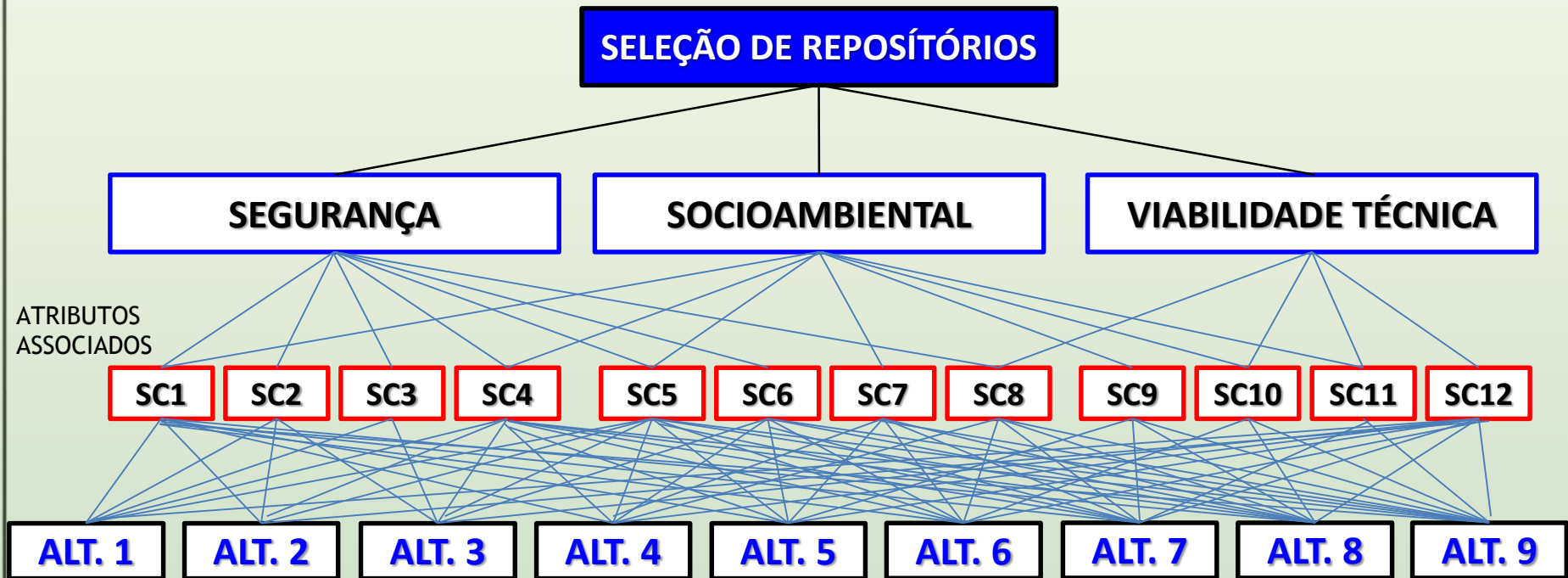
Agregação do GIS à
Análise Multicritério

ANÁLISE ESPACIAL DE DECISÃO MULTICRITÉRIO



Metodologia

Estrutura hierárquica da metodologia AHP (Analytical Hierarchy Process)



Metodologia

Consulta de Especialistas Matriz de Decisão

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

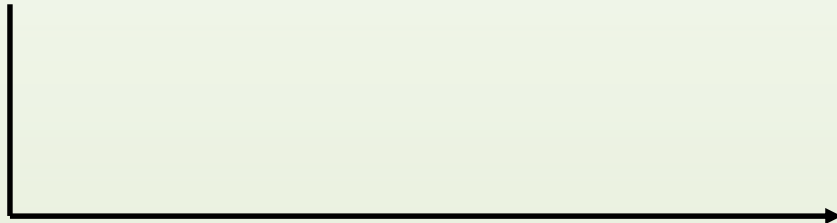
Cálculo dos Pesos de cada um dos Critérios

	Média dos Valores Normalizados		Média Geométrica		Autovetor direito
	Cálculo	Vetor N	Cálculo	Vetor G	
A1	$(7/15+29/56+24/53+7/17+9/34)/5$	0,4227	$(1*2*3*5*9)^{1/5}$	0,4244	0,4263
A2	$(7/30+7/27+16/53+28/85+9/34)/5$	0,2776	$(1/2*1*2*4*9)^{1/5}$	0,2836	0,2809
A3	$(7/45+11/85+8/53+14/85+4/17)/5$	0,1672	$(1/3*1/2*1*2*8)^{1/5}$	0,1685	0,1652
A4	$(7/75+2/31+4/53+7/85+7/34)/5$	0,1043	$(1/5*1/4*1/2*1*7)^{1/5}$	0,0977	0,1007
A5	$(3/58+1/35+1/53+1/85+1/34)/5$	0,0281	$(1/9*1/9*1/8*1/7*1)^{1/5}$	0,0257	0,0269

Metodologia

Modelagem no Sistema GIS

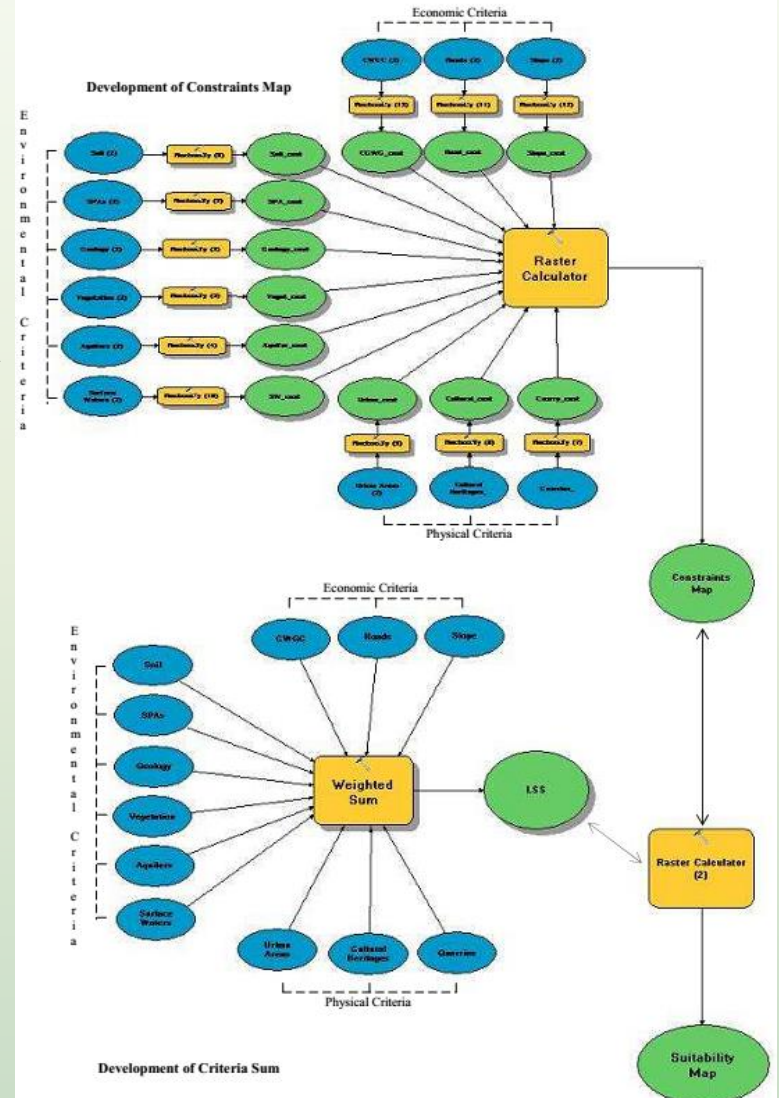
Model Builder



Softwares Utilizados

Modelagem Meteorológica
Modelagem Matemática
Dispersão Radioativa
AHP e AEDM
AEDM e Sistema GIS

WRF
MATHEMATICA
CALPUFF
EXCEL
ARCGIS



Resultados Obtidos

Mapas das Áreas de Exclusão

Banco de Dados Geográficos

Portal de Estudos e Bases de Dados

Parcerias Institucionais

Produções Científicas

2015. Site Selection of a Geological Repository for the Safe Disposal of High-Level Waste in the State of Rio de Janeiro. Revista Internacional de Ciências.

2015. Radioactive Waste Management in Brazil Including Spent Fuel. Berkeley University.

Agradecimentos

Professora Monica Heilbron

Paulo Fernando Heilbron

Faculdade de Geologia

CAPES e FAPERJ