



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE – FACE  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

**MESTRADO EM GESTÃO ECONÔMICA DO MEIO AMBIENTE**

**CUSTOS INVISÍVEIS: A EQUIDADE INTERGERACIONAL E O CUSTO  
AMBIENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NUCLEARES DE ANGRA 3**

**ILANA DALVA FERREIRA**

BRASÍLIA-DF  
2014



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE – FACE  
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

**MESTRADO EM GESTÃO ECONÔMICA DO MEIO AMBIENTE**

CUSTOS INVISÍVEIS: A EQUIDADE INTERGERACIONAL E O CUSTO  
AMBIENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NUCLEARES DE ANGRA 3

ILANA DALVA FERREIRA

Dissertação apresentada como requisito para a  
obtenção do título de Mestre em Gestão  
Econômica do Meio Ambiente do Programa de  
Pós-Graduação em Economia do Departamento  
de Economia da Universidade de Brasília.

**Orientadora: Profa. Dra. Denise Imbroisi.**

BRASÍLIA-DF  
2014

CUSTOS INVISÍVEIS: A EQUIDADE INTERGERACIONAL E O CUSTO  
AMBIENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NUCLEARES DE ANGRA 3

ILANA DALVA FERREIRA

Dissertação aprovada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Gestão Econômica do Meio Ambiente do Programa de Pós-Graduação em Economia – Departamento de Economia da Universidade de Brasília, por intermédio do Centro de Estudos em Economia, Meio Ambiente e Agricultura (CEEMA). Comissão Examinadora formada pelos professores:

---

Profa. Dra. Denise Imbroisi  
Departamento de Economia da Universidade de Brasília  
Orientadora

---

Prof. Dr. Jorge Madeira Nogueira  
Departamento de Economia da Universidade de Brasília

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Zuchi da Conceição  
Departamento de Economia da Universidade de Brasília

Brasília, 02 de setembro de 2014.

À Laís.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais por todo o esforço e dedicação que me permitiram chegar até aqui. Vocês sempre primaram pela minha educação e esse é o maior patrimônio que um filho pode receber.

À minha irmã Gisele e ao meu cunhado Henrique pelo amparo e incentivo. Eu não teria concluído esse trabalho sem o carinho de vocês.

Aos amigos que sempre se demonstraram acessíveis para me acudir nos momentos mais difíceis. Ivna, João, Pedro e Natalia, obrigada por tudo. Agradeço ao Fred pelo carinho e paciência. Ao Matheus pela parceria e por ter tornado esse processo mais divertido. Cabe também agradecer a todos os colegas do mestrado com quem compartilhei os desafios dessa etapa.

Ao Rafael e Waneska, pela paciência e colaboração.

Aos professores do curso, André, Bernardo Mueller, Charles Mueller, Jorge, Jorginho, Júnia e Pedro Zuchi, pelo conhecimento transmitido. Em especial à Professora Denise Imbroisi pela paciência, dedicação e estímulo intelectual.

Faço também um agradecimento especial ao Gerente Executivo de Infraestrutura da CNI, Wagner Cardoso, por permitir que esse mestrado fosse realizado e por sempre me incentivar a concluí-lo. Sem o seu apoio, nada disso seria possível.

Finalmente, agradeço a quem deu um novo significado a esse trabalho, Laís, meu eterno estímulo a ser uma pessoa melhor e a querer contribuir para que esse mundo seja melhor.

# **CUSTOS INVISÍVEIS: A EQUIDADE INTERGERACIONAL E O CUSTO AMBIENTAL DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS NUCLEARES DE ANGRA 3**

## **RESUMO**

Este trabalho avaliou como se pode incluir o conceito de equidade intergeracional na mensuração do custo ambiental da disposição de rejeitos nucleares de Angra 3. São analisados os conceitos de equidade intergeracional na Economia e as formas encontradas para incluir esse aspecto na definição da taxa de desconto utilizada na mensuração econômica dos custos ambientais com impactos de longo prazo. Foram consideradas as propostas apresentadas por Padilla (2002) e a aplicação da Fórmula de Ramsey com segurança equivalente. Foi realizada uma análise qualitativa da avaliação dos impactos ambientais do depósito de *Yucca Mountain*, nos Estados Unidos, com foco na equidade intergeracional. O trabalho também avaliou como as diferentes formas de cálculo da taxa de desconto influenciam na mensuração do custo ambiental da disposição de rejeitos nucleares de Angra 3. As análises conduzidas apontaram que a limitação da disponibilidade da informação e as incertezas científicas no longo prazo fazem com que os impactos relevantes sejam desconsiderados na análise ambiental dos empreendimentos. A aplicação da taxa de desconto de segurança-equivalente gerou um custo não desprezível no longo prazo e que precisaria ser considerado na análise do projeto.

Palavras-chaves: Angra 3, desenvolvimento sustentável, equidade intergeracional, resíduos nucleares, taxa de desconto.

# **UNSEEN COSTS: INTERGENERATIONAL EQUITY AND ENVIRONMENTAL COSTS OF NUCLEAR WASTE DISPOSAL OF ANGRA 3**

## **ABSTRACT**

This study evaluated how to include the concept of intergenerational equity in the provision of the nuclear plant named Angra 3. It was also analyzed the concepts of intergenerational equity in the Economics and how to include this aspect in the definition of the discount rate used in measuring the economic costs of environmental impacts in the long term. The proposals made by Padilla (2002) and the application of the Ramsey certainty-equivalent discount rate were applied in the analysis. A qualitative analysis of the environmental impacts of the Yucca Mountain deposit in the United States was performed. The study also evaluated how different ways of calculating the discount rate influences the consideration of intergenerational equity to measure the environmental cost of nuclear waste. The analysis showed that the limiting availability of information and the scientific uncertainties about the impacts in the long-term are not considered in the environmental analysis of projects. The application of the certainty-equivalent discount rate showed a non-negligible cost in the long term and would need to be considered in project analysis.

Keywords: Angra 3, discount rate, intergenerational equity, nuclear waste, sustainable development.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Doses estimadas de radiação e os impactos na saúde dos trabalhadores nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de <i>Yucca Mountain</i> .....	62
Tabela 2 - Doses estimadas de radiação e os impactos na saúde da população externa ao projeto nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de <i>Yucca Mountain</i> .....	63
Tabela 3 - Impactos radiológicos anuais estimados para o Indivíduo com Razoável Exposição Máxima – Cenários combinados.....	71
Tabela 4 - Impactos potenciais para os Cenários 1 e 2 de não construção do repositório de <i>Yucca Mountain</i> .....	73
Tabela 5 - Estimativa de produção de rejeitos sólidos de baixo e médio nível de radioatividade em Angra 3.....	88
Tabela 6 - Redução da Radioatividade e da Taxa de Dose de Superfície de um Elemento Combustível (EC) Irradiado removido do Núcleo de um Reator do Tipo PWR, submetido a uma “queima” de 33.000 MWd/t de U.....	89
Tabela 7 - Estimativa das quantidades de urânio e plutônio a serem acumulados após 40 anos de operação de um reator do tipo de Angra 3 .....	90
Tabela 8 - Impactos radiológicos à saúde da população durante a operação do depósito.....	93
Tabela 9 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em US\$ do ano 2000 .....	94
Tabela 10 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2000 .....	94
Tabela 11 - Inflação observada e projetada no Brasil (1995-2016).....	95
Tabela 12 - Intervalo de confiança para a inflação brasileira com 90% de confiança.....	96
Tabela 13 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2018 .....	97



Tabela 14 – Resumo estatístico da estimativa da taxa de crescimento do consumo das famílias.....	100
--	-----

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos autores que tratam de Equidade Intergeracional .....	32
Quadro 2 - Resumo dos métodos propostos para a definição da taxa de desconto.....	41
Quadro 3 - Impactos potenciais durante a construção, operação e encerramento do depósito.....	56
Quadro 4 - Impactos potenciais após o fechamento do depósito.....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do repositório de <i>Yucca Mountain</i> .....	54
Figura 2 - Armazenagem dos pacotes de resíduos.....	64
Figura 3 - Horizonte temporal de análise do depósito de rejeitos nucleares ....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Custo econômico anual em Reais de 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários).....	98
Gráfico 2 - Custo econômico anual descontado com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários).....	99
Gráfico 3 - Evolução da taxa de desconto calculada pela Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente.....	101
Gráfico 4 - Custo econômico anual descontado pela Fórmula de Ramsey estendida de segurança equivalente com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários).....	101
Gráfico 5 - Custo econômico anual com taxa de desconto igual a zero com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários).....	102
Gráfico 6 - Valor Presente calculado pela taxa de desconto definida pelo mercado, pela Fórmula de Ramsey e com taxa de desconto igual a zero .....	103

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACB - Análise Custo-Benefício

AID - Área de Influência Direta

All - Área de Influência Indireta

CE - Concentrado do Evaporador

CNAAA - central Nuclear Almirante Álvaro Alberto

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

DIRR - Depósitos Intermediários de Rejeitos Radioativos

DOE - U.S. Department of Energy (Departamento de Energia dos Estados Unidos)

EIA - Estudo de Impacto Ambiental

EPA - Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental Americana)

F - Filtro

IAEA - International Atomic Energy Agency (Agência Internacional de Energia Atômica)

IREM - Individuo com Razoável Exposição Máxima

NRC - Governmental Nuclear Regulatory Commission (Comissão Reguladora Nuclear)

NWPA - Nuclear Waste Policy Act (Lei de Resíduo Nuclear)

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

RC - Rejeito Compactado

rem - Roentgen equivalent in man

RNC - Rejeito Não Compactado

RP - Resina do Primário

STPR - Social Time Preference Rate (Taxa Social de Preferência Temporal)

TSPA-LA - Total System Performance Assessment – License Application

VE - Valor de Existência

VERA - Valor Econômico de um Recursos Ambiental

VO - Valor de Opção

VPL - Valor Presente Líquido

VPLE - Valor Presente Líquido Esperado

VUD - Valor de Uso Direto

VUI - Valor de Uso Indireto

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1. Equidade Intergeracional e Economia</b> .....	21
1.1 Principais visões da equidade intergeracional na Economia na década de 1970 e 1980. ....	21
1.2 Principais visões da equidade intergeracional na Economia na década de 1990. ....	24
1.3 Principais visões da equidade intergeracional na Economia pós anos 2000. ....	25
<b>2. Taxa de desconto e Equidade Intergeracional</b> .....	34
<b>3. <i>Yucca Mountain</i>: Um caso de disposição final</b> .....	50
3.1. A decisão por <i>Yucca Mountain</i> . ....	50
3.2. Impactos durante a construção, operação e encerramento do depósito. ....	55
3.3. Impactos ambientais após o encerramento do depósito geológico de <i>Yucca Mountain</i> .....	64
3.4. Impactos ambientais da não construção do depósito geológico de <i>Yucca Mountain</i> .....	71
3.5. A análise ambiental de <i>Yucca Mountain</i> e a equidade intergeracional .....	75
<b>4. A mensuração econômica e a equidade intergeracional do Custo Ambiental da Disposição de Resíduos Nucleares de Angra 3.</b> .....	78
4.1. Métodos e Procedimentos. ....	78
4.2. ACB - Etapa 1: Geração e o gerenciamento dos resíduos nucleares na Usina Nuclear de Angra 3 que necessitam de armazenamento .....	86
4.3. ACB - Etapa 2: Os impactos ambientais da disposição hipotética dos resíduos da Usina Nuclear de Angra 3 .....	90
4.4. ACB - Etapa 3: Impactos economicamente relevantes .....	92
4.5. ACB - Etapas 4 e 5: Quantificação e mensuração econômica dos impactos ambientais da disposição de resíduos das Usinas Nucleares de Angra 3 .....	92
4.6. ACB - Etapas 6 e 7: A equidade intergeracional e os custos ambientais da disposição de resíduos da Usina Nuclear de Angra 3. ....	98
4.7. Comentários conclusivos sobre o capítulo .....	104
<b>COMENTÁRIOS FINAIS</b> .....	108
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	112

APÊNDICE A - IMPACTOS AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO, MONITORAMENTO E ENCERRAMENTO DO DEPÓSITO GEOLÓGICO DE <i>YUCCA MOUNTAIN</i> .....	119
APÊNDICE B - IMPACTOS AMBIENTAIS APÓS O ENCERRAMENTO DO DEPÓSITO GEOLÓGICO DE <i>YUCCA MOUNTAIN</i> .....	138
APÊNDICE C - INCIDÊNCIA ANUAL DE FATALIDADE POR CÂNCER, DE CÂNCER NÃO FATAL E DE EFEITOS SEVEROS HEREDITÁRIOS.....	141



## INTRODUÇÃO

A Análise Custo-Benefício (ACB) é uma importante ferramenta de análise de projetos e políticas públicas. Ela permite decompor os impactos a uma mesma unidade de análise (monetária) para então avaliar se uma determinada ação deve ser adotada. Apesar da amplitude da aplicação da ferramenta, algumas limitações ainda são presentes e necessitam de uma apreciação mais detalhada.

Dentre elas, está a inabilidade do instrumento em mensurar impactos em horizontes temporais longos. A necessidade de descontar os impactos a uma taxa positiva faz com que, no longo prazo, tais valores (em valor presente) se tornem insignificantes. Assim, tanto os benefícios quanto os custos que seriam observados somente pelas gerações futuras acabam não sendo considerados com a mesma relevância dos impactos imediatos. Essa limitação pode acabar subestimando impactos potencialmente graves, como é o caso de usinas nucleares. No curto prazo, os benefícios oriundos da geração nuclear já são conhecidos: segurança energética, baixo custo de manutenção, desenvolvimento tecnológico, entre outros. No entanto, ainda há grandes desafios envolvendo os custos potenciais desse tipo de empreendimento. O horizonte temporal e a incerteza que envolvem tais impactos dificultam uma mensuração adequada.

Nesse sentido, a aplicação do conceito de desenvolvimento sustentável em políticas públicas tem sido um desafio. Apesar da consolidação legal e regulatória da variável ambiental na elaboração de políticas públicas, ainda falta clareza na relevância que os impactos ambientais apresentam na consolidação de projetos. Uma das justificativas para a não consideração desses impactos estaria na limitação das ferramentas de avaliação existentes na economia.

De acordo com o Relatório "Our Common Future" das Nações Unidas (1987), o desenvolvimento sustentável seria o desenvolvimento que considera as necessidades da população presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de saciarem suas necessidades. Por necessidade, o relatório prioriza o consumo mínimo para que a população com menor renda possa

superar a pobreza. O conceito exige também que as gerações futuras sejam consideradas nas decisões atuais.

Como o processo produtivo interfere nos processos naturais, a maioria dos problemas ambientais estaria associada ao consumo e despejo de resíduos ao meio ambiente. Essa preocupação é pertinente já que as interações ecológicas não respeitam as fronteiras dos indivíduos ou governos, muito menos as geracionais. Em outras palavras, as externalidades são dinâmicas e intertemporais (BERGH, 2010). Portanto, a depleção dos recursos naturais para a concretização dos processos produtivos que saciam as nossas necessidades podem gerar limitações para a satisfação das necessidades futuras.

Assim, um dilema ocorre na escolha entre prover o desenvolvimento presente em detrimento de gerações futuras ou limitar o desenvolvimento da geração atual com o intuito de preservar as reservas ambientais para as gerações futuras. Em termos econômicos, seria necessário maximizar o bem-estar da geração atual sem limitar o bem-estar das gerações futuras.

No caso da geração de energia elétrica, a crescente preocupação com os impactos causados ao meio ambiente tem influenciado o planejamento energético. A escolha da estrutura de uma matriz elétrica envolve também a escolha de quais impactos ambientais serão considerados menos nocivos pela sociedade. A atual preocupação com as mudanças climáticas tem levado os governos a se preocuparem em planejar uma matriz energética com menor emissão de gases de efeito estufa. Conforme projeções do *UK Energy Research Center* (2013), a matriz elétrica seria largamente "descarbonizada" em 2030 com uma redução de 90% no nível de emissão de 2010. A intensidade cairia à zero (isto é, "descarbonização" completa) a partir de 2035 por conta da enorme implantação de energia nuclear pós-2025.

De acordo com Mez (2012), há atualmente 63 reatores nucleares em construção nos seguintes países: China (26), Rússia (10), Índia (6), Coreia do Sul (5), Ucrânia (2), Japão (2), Eslováquia (2), Bulgária (2), Taiwan (2), Argentina (1), Brasil (1), Finlândia (1), França (1), Paquistão (1) e Estados Unidos (1) e 156 usinas nucleares em planejamento no mundo. Na política energética nacional, a geração nuclear está presente no Plano Decenal de Energia 2022 (Empresa de Planejamento Energético, 2013) pela Usina de

Angra 3 com previsão para entrada em operação em 2016. Esta usina, com capacidade instalada de 1.405 MW, cuja contratação já foi autorizada, aumentará o parque nuclear atualmente existente em 70%, de 2.007 MW para 3.412 MW.

Contudo, a busca por uma solução (emissão dos gases de efeito estufa) pode gerar um outro impacto que apresenta uma grande dificuldade de análise: os rejeitos nucleares.

Guimarães (2010), em seu livro “Energia Nuclear e Sustentabilidade”, apresenta com detalhes o processo de geração de resíduos em usinas nucleares. Guimarães ressalta que são necessários 300 anos para que a toxicidade do combustível irradiado atinja valores do minério natural de urânio. E a alocação desses resíduos é um desafio que ainda não foi equacionado<sup>1</sup>. Os autores Rosenkranz (2006), Vandebosch e Vandebosch (2007) e Alley e Alley (2012) mostram os desafios existentes na gestão dos resíduos nucleares no mundo. Os autores também questionam e discutem se de fato os rejeitos radioativos poderiam ficar isolados com segurança da biosfera durante centenas, milhares ou até milhões de anos. E afirmam que é necessário buscar e encontrar soluções técnicas seguras com base no atual estado do conhecimento.

Assim, como é possível estimar o custo ambiental da disposição final de rejeitos que permanecerão ativos durante gerações sem desprezar os potenciais impactos que só serão sentidos no longo prazo? O presente trabalho busca avaliar os custos ambientais da disposição dos rejeitos nucleares de Angra 3 com uma análise específica do aspecto intergeracional no processo de análise.

No primeiro capítulo, é realizada uma revisão teórica sobre o conceito de equidade intergeracional na economia com a análise de qual abordagem seria adequada para o caso dos rejeitos nucleares de Angra 3. O segundo capítulo descreve as diversas formas do cálculo da taxa de desconto aplicada em análises de longo prazo com ênfase na equidade intergeracional. O capítulo 3

---

<sup>1</sup> Já o CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera requer de 50 a 200 anos para ser reabsorvido pelas plantas oceânicas

trata da avaliação ambiental do depósito final de *Yucca Mountain* com uma análise qualitativa de como a equidade intergeracional foi considerada no relatório de impacto ambiental do empreendimento. O capítulo 4 mensura o custo ambiental do depósito dos resíduos nucleares de Angra 3 e avalia as diferenças nos valores com a aplicação de diferentes taxas de desconto. Finalmente, os comentários finais são apresentados.

## 1. Equidade Intergeracional e Economia

A análise da equidade intergeracional dentro da teoria econômica precisa, primeiramente, considerar dois conceitos distintos que guiam os pressupostos dos autores: sustentabilidade fraca e sustentabilidade forte.

Tais conceitos referem-se ao papel e a relação do capital natural com os outros tipos de capital. Quando o capital natural é indefinidamente substituível por outros tipos de capital tem-se a visão denominada sustentabilidade fraca. Essa análise é caracterizada por um maior otimismo da substituição do capital natural pelo capital de produção humana (MUELLER, 2007). Essa substituição naturalmente permitiria a equidade intergeracional já que o capital físico oriundo do desenvolvimento tecnológico substituiria o capital natural e não afetaria as condições das gerações futuras.

Já a sustentabilidade forte defende que a substitutabilidade entre o capital natural e os outros tipos de capital é limitada. A substituição dos capitais é possível até certo ponto, contudo, a relação de complementaridade prevalece quando há escassez relativa do capital natural.

A maior parte dos autores analisados apresentam uma visão otimista quanto à capacidade de substituição do capital natural por outros tipos de capital, como será exposto a seguir.

### 1.1 Principais visões da equidade intergeracional na Economia na década de 1970 e 1980.

Na economia, Solow (1974) discutiu a questão da equidade em formato de crítica ao trabalho de Rawls (1971). O trabalho de Rawls afirmava que a inequidade na distribuição de bem-estar e utilidade só seria justificada se fosse apresentada como condição a melhora da utilidade dos mais pobres. Essa análise seria uma aplicação filosófica do Princípio Max-Min. Esse princípio busca minimizar o custo de um cenário pior (custo maximizado). Pode ainda ser interpretado como a maximização de um ganho já minimizado. Assim, Solow explorou as consequências da aplicação direta do Princípio Max-Min no problema de acumulação ótima de capital entre as gerações.

O trabalho de Solow (1974) é relevante por ser uma tentativa primária de modelagem econômica do conceito de equidade intergeracional. Dentre as conclusões, foi observado que a única maneira de manter o bem-estar social ao longo das gerações seria com a manutenção do estoque de capital de modo a acompanhar o crescimento populacional. Caso a geração presente consuma mais de forma a reduzir o estoque de capital, a geração futura teria uma situação pior. O modelo também considera os recursos naturais exauríveis no processo de análise, porém, esse componente se torna indiferente quando o desenvolvimento tecnológico é incluído na análise.

Para Solow (1974), a elasticidade de substituição entre o capital natural e outros tipos de capital deve ser no mínimo unitária. Ou seja, o capital acumulado seria suficiente para compensar a depleção dos recursos naturais. A visão de Solow é similar à de outros trabalhos da época como "The Optimal Depletion of Exhaustible Resources" (Dasgupta e Heal, 1974) e "Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths" (Stiglitz, 1974).

Uma das principais conclusões da análise de Dasgupta e Heal (1974) é que a maximização da utilidade estaria associada à maximização do Valor Presente Líquido (VPL) por meio de uma taxa de desconto. O interessante é que o trabalho conclui que o resultado do VPL é sombrio para as gerações futuras. Após o alcance de um pico inicial, o consumo e a utilidade eventualmente chegarão a zero no longo prazo. Esse resultado é uma consequência direta de uma taxa de desconto positiva combinada com a escassez inerente da fonte não renovável. Sob essas circunstâncias, o consumo é concentrado em anos anteriores de abundância relativa de recursos e o investimento de capital não é suficiente para compensar os efeitos do esgotamento de recursos. Esse processo claramente não é compatível com o conceito de desenvolvimento sustentável.

Para Stiglitz (1974), uma maneira de evitar esse resultado indesejável seria por meio do progresso tecnológico. Em seu modelo, a taxa exógena do progresso técnico é dada como suficientemente grande para compensar os efeitos do esgotamento de recursos. Este pressuposto implica que o caminho para o VPL ótimo pode ter aumento sustentado do consumo *per capita* (mesmo com uma população crescente, o que é omitido no modelo de Dasgupta e Heal

(1974). No modelo de Stiglitz (1974), a produção como uma função Cobb-Douglas é incompatível com os requisitos mínimos de energia e materiais. O mesmo poderia ser dito sobre uma taxa exponencial sustentada da mudança técnica. Em vez disso, algum limite de possibilidades de produção teria de ser definido em relação ao fluxo de recursos renováveis. Tais limites não são abordados no modelo em questão.

Nos três modelos, os recursos naturais são finitos, não renováveis e essenciais para a produção, não sendo completamente ignorados, como tinha ocorrido em grande parte da teoria de crescimento econômico. No entanto, o capital físico é indefinidamente substituível por outros tipos de capital por meio de uma função Cobb-Douglas. Essa visão de substitutabilidade é dita como de sustentabilidade fraca e apresenta uma visão mais otimista da substituição do capital natural pelo capital de produção humana (MUELLER, 2007). Essa substituição permitiria a equidade intergeracional já que o capital físico substituiria o capital natural e não afetaria as condições das gerações futuras.

O trabalho de Dasgupta e Mitra (1983) mostra uma pequena diferença em relação aos três anteriores. Eles buscaram averiguar se a equidade intergeracional é compatível com a alocação eficiente de recursos exauríveis. Para isso, seria necessário encontrar um patamar em que o consumo das gerações futuras fosse positivo. Os autores pressupõem que a condição necessária e suficiente para que o consumo das gerações futuras seja positivo é a participação do capital no produto superior à participação dos recursos exauríveis no produto. Assim, existiria um nível de produto eficiente e equânime.

Por meio de um modelo, Dasgupta e Mitra (1983) demonstram que há tal patamar quando os recursos exauríveis são relevantes no processo produtivo. O trabalho também demonstra que a equidade intergeracional existe e é eficiente quando há uma sequência de preços em que, a cada período, o valor presente do consumo não exceda o valor presente da renda, o consumo permanente estaria maximizado. A grande diferença no trabalho está na análise de que o investimento não pode ser superior à capacidade de recuperação dos recursos exauríveis em um patamar de equidade eficiente.

## 1.2 Principais visões da equidade intergeracional na Economia na década de 1990.

Outros autores com trabalhos relevantes sobre equidade entre as gerações são Howarth e Norgaard. Em "Intergenerational Resource Rights, Efficiency, and Social Optimality" (1990), os autores mostram que os resultados da teoria neoclássica do bem-estar no que diz respeito a dotação inicial de equidade e eficiência podem ser traduzidos em um modelo estático para um contexto intergeracional. Diferentes dotações de recursos para duas gerações resultaram em diferentes distribuições de riqueza, todas elas eficientes, mas, obviamente, com implicações na equidade. Howarth e Norgaard estenderam seu modelo e em 1992 escreveram "Environmental Valuation under Sustainable Development". A principal conclusão é que o caminho do consumo através do tempo e da valoração marginal da externalidade ambiental (baseada na taxa eficiente de poluição) depende da distribuição da riqueza entre as gerações.

Assim, mesmo em teoria, não há nenhuma noção clara de como valorar um custo ambiental de forma 'correta' entre as gerações. O valor varia de acordo com a mudança da visão da sociedade sobre o futuro e a expressa por uma taxa de desconto ou algum outro critério de sustentabilidade.

Em 1997, Page elaborou um trabalho em que duas abordagens são comparadas para resolver o problema de alcançar os objetivos socialmente escolhidos de eficiência intergeracional e equidade intergeracional. Na primeira, é realizada uma análise custo-benefício padrão e posteriormente considera-se o aspecto da equidade entre as gerações de forma separada. Na segunda abordagem, o aspecto da equidade é considerado desde o começo. Page (1997) define a equidade intergeracional como a manutenção do capital total (naturais e físicos) ao longo do tempo. Page (1997) discute as dificuldades de se manter toda a base de recursos por conta dos limites da substitutabilidade entre os tipos de capital por meio do progresso técnico. O autor aponta que o preceito da sustentabilidade envolve adotar ações tendo como base a manutenção dos recursos naturais.

Apesar da descrença que envolve a aplicabilidade desse preceito, Page (1997) afirma que é possível implementá-la e que tal implementação poderia



ser trivialmente simples. Ele conclui que muitas decisões sociais não são decididas por mercados ou pela análise custo-benefício, mas sim por instituições jurídicas e políticas. A sustentabilidade pode ser implementada de uma forma 'constitucional', porém, a linha divisória entre as decisões sociais a serem tomadas com base em critérios econômicos individualistas e as que utilizam mecanismos coletivos ainda não está clara. Esses questionamentos se aproximam da sustentabilidade ambiental forte em que a substitutabilidade entre os tipos de capital é limitada conforme classificação exposta por Mueller (2007).

### 1.3 Principais visões da equidade intergeracional na Economia pós anos 2000.

O trabalho de Asheim, Buchholz e Tungodden (2001) discute como os modelos que avaliam a equidade intergeracional para infinitas gerações podem não apresentar soluções economicamente ótimas. O estudo mostra que um axioma da equidade de tratamento, combinado com o axioma de Pareto (eficiência) seria suficiente para descartar caminhos não sustentáveis de utilidade intergeracionais como soluções ótimas. Esse resultado depende apenas do pressuposto de que a utilidade de qualquer geração pode ser mensurada, ordenada e comparada com os níveis de utilidade de outras gerações. Por fim, é demonstrado que as preferências sociais são eficientes e equitativas sob a condição de que a tecnologia gera aumento da produtividade. Os autores concluem que a produtividade seria suficiente para garantir a existência de preferências sociais completas com eficiência e equidade, resultando em uma única e sustentável solução para o problema da justiça intergeracional.

De forma mais completa, o trabalho de Padilla (2002) averigua as limitações da análise econômica sobre as questões intergeracionais e analisa as alternativas sugeridas na literatura. O autor esclarece que uma consideração adequada das gerações futuras pressupõe que a análise custo-benefício deve estimar que tais impactos (positivos e negativos) serão sentidos por diferentes gerações. Além disso, a sustentabilidade deve ser adotada, ou

seja, seria preciso considerar que as gerações futuras têm direito a um ambiente econômico e ecológico não deteriorado.

Padilla (2002) ressalta que é primordial superar as limitações da análise econômica convencional em relação ao desenvolvimento sustentável, como por exemplo, no caso de externalidades intergeracionais. Os problemas intergeracionais são oriundos do fato de que as ações atuais determinam a capacidade econômica e ecológica que as gerações futuras usufruirão. Há externalidades porque os custos das decisões da geração atual que impactarão as vidas das gerações futuras não são devidamente contabilizados. Além da não participação das gerações futuras nas decisões, as ações atuais podem causar efeitos irreversíveis.

A análise convencional considera que a externalidade é uma falha de mercado. Nesse caso específico, não há mercado e as soluções convencionais não são válidas. Assim, o Teorema de Coase não pode ser aplicado, porque não existe a possibilidade das partes envolvidas entrarem em um acordo já que as gerações futuras não estarão presentes ou poderão ser representadas.

No caso de uma solução Pigouviana, a valoração futura do mercado seria hipotética também por conta da não participação das gerações futuras, então o valor dado ao futuro seria arbitrário. Além disso, a internalização das externalidades seria administrada por uma instituição em que não há representatividade das gerações futuras. Nesse caso, o questionamento pertinente estaria na legitimidade da análise convencional onde o futuro é avaliado como algo contingente nas preferências atuais (PADILLA, 2002).

O próprio conceito convencional de alocação eficiente dos recursos não inclui o aspecto intergeracional. Isso porque as análises se referem a mercados baseados nas preferências atuais assim como o teste de compensação Kaldor-Hicks que afirma que se os benefícios forem superiores aos custos, seria eficiente adotar tal projeto sem considerar aspectos distributivos. Tal critério perde sua legitimidade na análise intergeracional. Deve-se questionar o direito das gerações atuais de impor impactos ambientais às futuras gerações. Na falta de compensações efetivas, essa parece ser uma contestação cabível.

Tal análise acaba tornando necessária a inclusão de um viés moral na definição das dotações dos recursos e as possíveis distribuições. Padilla (2002) afirma que a análise econômica convencional considera as dotações das

gerações futuras como um aspecto residual no processo decisório. Assim, seria necessário definir os direitos das gerações futuras baseados em aspectos morais.

Outro ponto a ser discutido seria a possibilidade de substituição. Apesar da premissa da economia convencional de que há uma substitutabilidade plena entre os recursos, Padilla (2002) afirma que essa premissa seria apenas uma crença sem critérios científicos. Ele reconhece que a substituição é possível em escalas pequenas na oferta de recursos para o setor produtivo, porém questiona a substitutabilidade quando o sistema ecológico global é afetado. Níveis críticos, assim como preservar certos processos essenciais do ecossistema, devem ser evitados quando busca-se equidade intergeracional. A falta de conhecimento do futuro acerca do desenvolvimento tecnológico, preferências e dos efeitos que as ações atuais exercem no complexo dinamismo dos sistemas naturais sugere que talvez não seja possível compensar qualquer redução na qualidade ou quantidade dos recursos naturais.

Para Padilla (2002) é necessário ir além dos critérios de eficiência previstos na análise econômica tradicional. Essa ressalva segue dois caminhos distintos. O primeiro seria a sustentabilidade fraca. Porém, de acordo com o autor, as incertezas e falta de conhecimento sobre tal nível de substituição tornaria a sustentabilidade fraca um conceito inviável na busca de desenvolvimento sustentável. Substitutabilidade faz mais sentido em um aspecto local ou regional, porém, ao avaliar os impactos ambientais globais, o critério tornar-se-ia não adequado. A dita sustentabilidade forte seria mais adequada por prever reserva de recursos naturais para gerações futuras, em termos quantitativos e qualitativos. Apesar dos questionamentos quanto à aplicabilidade desse critério, o autor expõe duas regras orientadoras no processo decisório.

A primeira seria a Regra da Inalienabilidade que implica a não alteração nos direitos das gerações futuras. A segunda seria a Regra da Compensação que prevê ações atuais com o intuito de retomar a dotação original de direitos das gerações futuras. A primeira impediria qualquer alteração e a segunda permitiria uma forma de compensação. A Regra da Compensação permitiria amenizar as ineficiências da primeira. Porém, como ela prevê certa

substitutabilidade entre os tipos de capital, a sua aplicação tornaria necessária uma maior avaliação dos impactos globais da ação avaliada.

O aspecto intergeracional também precisa ser considerado na avaliação de projetos. A análise padrão não consideraria de forma adequada os impactos futuros já que avalia os benefícios e custos acumulados e trazidos para o presente sem considerar a distribuição temporal dessas incidências. Padilla (2002), então, sugere 4 condutas que precisariam ser adotadas na avaliação de impactos intergeracionais.

Uma postura seria a não adoção da política ou projeto. Caso uma ação gere impactos irreversíveis, que não podem ser evitados ou compensados, o projeto não deve ser adotado (Princípio da Precaução). Dessa forma, os direitos das gerações futuras seriam respeitados pela aplicação da Regra da Inalienabilidade.

A segunda alternativa seria aliar a adoção da precaução a formas de controle para acompanhar se um dano irreversível irá ocorrer. Se a interferência prevista no projeto pode ser evitada, principalmente quando se trata de um projeto rentável, essa postura deve ser adotada.

A terceira alternativa seria a implementação de projetos complementares com o intuito compensatório, como é o caso de reflorestamento, por exemplo. Essa alternativa envolve uma avaliação prévia da eficácia do projeto no que tange à compensação do dano causado.

E, finalmente, pode ser adotada uma compensação financeira para futuras gerações. Um fundo seria criado para que recursos financeiros possam ser utilizados como forma de compensação. Nesse caso, o dano causado precisaria ser mensurado em unidade monetária e precisaria também ser avaliado se o montante previsto seria satisfatório perante o dano causado.

Já Chichilnisky (2009) trouxe o aspecto comportamental para a real implementação do desenvolvimento sustentável e, conseqüentemente, da equidade intergeracional na economia. A autora afirma que o desafio estaria em como definir valores econômicos que vão além das necessidades individuais e atuais identificadas pelo mercado e incluir as necessidades das futuras gerações. Nesse sentido, uma mudança nas preferências da população seria primordial e viria da consciência sobre as reais e novas restrições físicas

de longo prazo dos recursos naturais como, por exemplo, a extinção de alguma espécie.

Chichilnisky (2009) define dois axiomas para o desenvolvimento sustentável. O primeiro requer que o presente não deve ditar a renda em prejuízo do futuro: ele exige sensibilidade para o bem-estar das gerações em um futuro distante. O segundo axioma exige que o critério de bem-estar não deva ser ditado pelo longo prazo e, portanto, requer sensibilidade para o presente. Em outras palavras, haveria um tratamento simétrico entre as gerações em que nem o presente e nem o futuro seriam favorecidos. O mundo tem um horizonte de vida infinito, o que torna necessário tomar decisões compatíveis com uma data final desconhecida. Gerações podem se sobrepor ou não. Por último, a autora mostra que dois problemas de otimização são equivalentes: maximização da utilidade descontada com restrição de sobrevivência a longo prazo e maximização das utilidades tratando com o mesmo peso o futuro e o presente.

Em um trabalho de 2012, Chichilnisky avalia como as premissas do desenvolvimento sustentável, como a equidade intergeracional, vão de encontro aos objetivos do mercado que normalmente focam no curto prazo. O trabalho é desenvolvido com base no conceito de impaciência e com a ideia de que um dólar hoje vale mais do que um dólar amanhã, o que já demonstra um viés da economia pelo presente.

De acordo com Chichilnisky (2012), é possível reverter o viés pelo presente da economia definindo novos tipos de mercado com comerciantes que apresentam preferências sustentáveis. Como o mercado segue o comportamento dos comerciantes, quando eles têm preferências sustentáveis, o mercado se torna sustentável. A nova estrutura de preferências vai além do axioma da impaciência, ela tem como base os axiomas que requerem um tratamento equitativo entre a geração atual e as futuras. Mercados com preferências sustentáveis superam o axioma da impaciência, porque eles não são nem ditatoriais para o presente, nem para o futuro.

Na realidade, os mercados são sensíveis às necessidades de ambos, conforme necessário para o desenvolvimento sustentável. Os preços de mercado em mercados sustentáveis assumem um novo papel em que representam o valor de consumo instantâneo, bem como o valor do consumo

futuro. Essa abordagem resolve o conflito entre os objetivos de curto prazo e de sustentabilidade, sem eliminar a organização do mercado.

Para conciliar necessidades do presente e do futuro, muitas vezes opostas, estabelece-se a existência de um equilíbrio em mercados sustentáveis. Mostra-se que, quando os mercados têm preferências sustentáveis, uma única condição, a arbitragem limitada, é necessária e suficiente para a existência de um equilíbrio eficiente em Pareto. Isso garante a consistência lógica dos mercados sustentáveis. O papel dos preços no mercado sustentável atribui valor econômico, tanto para o consumo atual quanto para o de longo prazo, proporcionando uma ligação com o axioma da escolha, que é a base da matemática nessa proposta.

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o aspecto intergeracional na disposição final de rejeitos nucleares, é relevante avaliar a aplicabilidade dos referenciais teóricos nas análises de custo que serão desenvolvidas na pesquisa. O Quadro 1 resume o posicionamento dos autores citados. Apesar da relevância dos trabalhos apresentados, o estudo de Padilla (2002) apresenta uma visão mais aplicável de equidade intergeracional por definir ações a serem adotadas no processo decisório de execução de projetos tendo como base os impactos ambientais averiguados.

O trabalho de Chichilnisky (2012), por exemplo, apesar de relevante e inovador na análise da sustentabilidade, apresenta limitações na aplicação da análise de resíduos nucleares. Como a disposição de resíduos nucleares não se trata da utilização de um recurso ambiental, o impacto ambiental não é transacionado em mercado.

Em outras palavras, não é possível estruturar mercados tendo como base as preferências reveladas dos potenciais consumidores, diferentemente do caso de emissão de gases de efeito estufa, em que quotas são definidas e transacionadas. Mesmo que se cogitasse um mercado hipotético relacionado à disposição final de rejeitos nucleares (como terrenos), as limitações técnicas e legais, e conseqüentemente a limitação de comercializadores, que envolvem a definição de depósitos para a destinação final não permitiram a estruturação

desse mercado. Dessa forma, a pesquisa irá adotar os critérios expostos por Padilla na avaliação intergeracional de projetos.

**Quadro 1 - Resumo dos autores que tratam de Equidade Intergeracional**

Autor	Visão de Sustentabilidade e de Equidade Intergeracional	Apresenta proposta de análise de projetos
Solow (1974)	Sustentabilidade Fraca. O desenvolvimento tecnológico seria suficiente para atender a necessidade das gerações futuras.	Não
Dasgupta e Heal (1974)	Sustentabilidade Fraca. O desenvolvimento tecnológico seria suficiente para atender a necessidade das gerações futuras.	Não
Stiglitz (1974)	Sustentabilidade Fraca. O desenvolvimento tecnológico seria suficiente para atender a necessidade das gerações futuras.	Não
Dasgupta e Mitra (1983)	Sustentabilidade Fraca com reconhecimento da importância da limitação da extração dos recursos exauríveis.	Não
Howarth e Norgaard (1990, 1992)	Sustentabilidade Fraca. A utilização de uma taxa de desconto seria suficiente para representar a visão das gerações futuras.	Não
Page (1997)	Sustentabilidade Forte. A equidade intergeracional seria atendida com a manutenção do capital total (naturais e físicos). Contudo, questiona os limites da substitutabilidade.	Não
Asheim, Buchholz, Tungodden (2001)	Sustentabilidade Fraca. As preferências sociais são eficientes e equânimes sob a condição de que a tecnologia gera aumento da produtividade.	Não



Autor	Visão de Sustentabilidade e de Equidade Intergeracional	Apresenta proposta de análise de projetos
Padilla (2002)	Considera a sustentabilidade fraca para impactos em pequenas escalas, locais e regionais, e a sustentabilidade forte para impactos no sistema ecológico global.	Sim
Chichilnisky (2009, 2012)	Sustentabilidade fraca. Foca na mudança comportamental como forma de aumentar a relevância dos impactos ambientais nos mercados.	Não

Fonte: Elaboração própria com base nas referências mencionadas.

## 2. Taxa de desconto e Equidade Intergeracional

A análise econômica de projetos é um importante instrumento na tomada de decisão de gestores públicos. A escassez de recursos torna necessária a priorização de ações como escolha de política, programa ou projeto mais adequado para sanar ou amenizar problemas da sociedade. Porém, esse processo de escolha não é trivial. A adoção de políticas e programas, assim como a execução de projetos, gera múltiplos impactos na sociedade. A definição da ação a ser tomada precisa considerar impactos diversos como os financeiros, sociais e ambientais.

De acordo com Prest e Turvey (1965), a mensuração econômica dos impactos positivos e negativos (Análise Custo-Benefício - ACB) é um instrumento prático para averiguar quão desejável um projeto é por meio da enumeração e quantificação dos custos e benefícios envolvidos na decisão de realizar uma política ou empreendimento. Autores como Lutz e Munasinghe (1994), Arrow (1999) e Revesz e Livermore (2008) ressaltam a importância de mensurar os custos e benefícios dos impactos por permitir a comparação dos efeitos das políticas propostas e ajudar o gestor a melhor compreender as implicações de uma decisão.

A mensuração econômica dos impactos também desempenha um papel importante de subsídio ao processo de tomada de decisão, mesmo quando a informação sobre os benefícios, custos, ou ambos, é altamente incerto, como é frequentemente o caso com os regulamentos que envolvem o meio ambiente. Nesse contexto, a análise de projetos se torna um instrumento crucial para que a sociedade maximize seus benefícios. A preocupação com o meio ambiente reafirma a necessidade de análise ambiental *ex-ante* e também torna necessária a avaliação dos impactos ambientais que ocorrerão após a implementação da política ou projeto.

Apesar de intuitivo, o processo não deixa de ser complexo exatamente por expandir os critérios na tomada de decisão para além do financeiro. Um projeto, por exemplo, pode apresentar elevado retorno financeiro, mas impactos sociais destrutivos. A análise puramente financeira considera apenas o retorno monetário do empreendimento sem avaliar as externalidades

causadas por tal ação. Conforme exposto por Contador (2000), a análise econômica mensura o preço econômico, muitas vezes divergente do preço de mercado e busca exatamente averiguar os efeitos diretos e indiretos que podem ser causados à sociedade.

A ausência de um preço de mercado ou a sua divergência em relação ao preço social torna necessária a valoração econômica. De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2008), valoração ambiental é a identificação do valor de um recurso ambiental ou do custo de reparação de um dano ambiental. Seroa da Motta (1997) em seu "Manual de Valoração Econômica do Meio Ambiente" decompõe o que seria o Valor Econômico de um Recursos Ambiental (VERA) composto pelo:

- Valor de uso direto (VUD): valor associado à utilização atual de um recurso ambiental.
- Valor de uso indireto (VUI): valor associado ao benefício atual das funções ecossistêmicas do recurso.
- Valor de opção (VO): valor associado ao valor de uso direto e indireto que só serão usufruídos no futuro (benefício potencial).
- Valor de existência (VE): valor dissociado do uso dos recursos (embora represente consumo ambiental) e derivado de uma posição moral, cultural ou ética em relação aos direitos de existência dos recursos ambientais.

Assim, a valoração ambiental busca estimar as variáveis da VERA:

$$VERA = VUD + VUI + VO + VE \quad (1)$$

Nesse esforço de tentar estimar “preços” para os recursos ambientais e, dessa forma, fornecer subsídios técnicos para sua exploração racional, inserem-se os métodos (ou técnicas) de valoração econômica ambiental fundamentados na teoria neoclássica do bem-estar. Os métodos de valoração econômica mais difundidos levam em consideração as preferências individuais (através das quais se obtêm as preferências da sociedade) e a simulação de mercados hipotéticos para a valoração de ativos que não possuem mercados.

Para a ABNT (2008), os métodos utilizados para estimar o VERA são classificados em:

- Diretos: Estimam o valor econômico do bem ambiental a partir da própria disposição da população em pagar por bens ambientais. Podem estar diretamente relacionados com os preços de mercado, e são baseados nas relações físicas que descrevem causa e efeito. Parte-se do pressuposto que a variação da qualidade ou da quantidade do bem ambiental irá afetar os padrões de bem-estar das pessoas. Com base nesta variação de bem-estar, pode-se estimar a disposição a pagar das pessoas para evitar, ou a disposição a receber para aceitar as alterações do ambiente.
- Indiretos: Estimam o valor de um bem ambiental, indiretamente por meio de uma função de produção. O objetivo é calcular o impacto de uma alteração do recurso ambiental na atividade econômica, utilizando como referência, produtos no mercado que sejam afetados pela modificação na provisão do recurso ambiental.

A complexidade do processo está justamente na mensuração dos preços sociais. Lutz e Munasinghe (1994) reforçam que no âmbito ambiental há dois desafios na valoração. Primeiramente, os impactos ambientais são difíceis de ser mensurados em termos físicos. Em segundo lugar, mesmo quando a mensuração em termos físicos for possível, a valoração e quantificação também são um desafio.

Embora haja dificuldades, Prest e Turvey (1965) ressaltam que a mensuração econômica dos diferentes tipos de impactos de um projeto permite a redução de um problema com multidimensões para um com menos dimensões por avaliá-los em uma única unidade. Essa redução permite comparar os diferentes efeitos do projeto. A alteração pode ser suficiente para eliminar a confusão criada pelos problemas multidimensionais e fazer com que o processo de escolha seja facilitado.

Assim, a análise econômica de projetos não só facilitaria analisar questões com maior complexidade como também evitaria as formas tradicionais de lidar com problemas numa economia de mercado puro, ou seja, as empresas tomando decisões com relação a seus lucros e ignorando os outros efeitos, tais como impactos negativos sobre o meio ambiente. Mueller

(2007) reafirma que a relevância do instrumento está justamente na análise de aspectos envolvidos no objeto de análise que não são transacionados em mercados, o que torna necessária a aplicação de métodos específicos de valoração.

A análise econômica de projetos e mais especificamente a ACB tem como base a teoria do bem-estar social pertencente à teoria econômica neoclássica. Esse trabalho especificamente estará focado na mensuração do custo ambiental. Conforme exposto anteriormente, os benefícios oriundos da geração nuclear já são conhecidos. No entanto, ainda há uma lacuna científica com grandes desafios no processo de mensuração dos custos potenciais desse tipo de empreendimento.

De acordo com Hanley e Spash (1994), a escolha social e a mensuração do bem-estar consideram uma série de critérios com destaque para dois: Ótimo de Pareto e o Kaldor-Hicks. O Ótimo de Pareto requer que, ao final da política ou projeto, ninguém se encontre em uma situação pior e que pelo menos uma pessoa esteja em uma situação melhor. No entanto, as políticas normalmente melhoram a situação de algumas pessoas, mas piora a de outras.

Já o Critério Kaldor-Hicks tem como princípio a compensação potencial. Aqueles que usufruem de um benefício podem compensar os que arcaram com os custos. Assim, os benefícios precisam ser superiores aos custos e a compensação é concebível.

A grande limitação do critério Kaldor-Hicks e conseqüentemente da análise pelo VPL está na incapacidade de avaliar os aspectos distributivos dos impactos avaliados. Conforme exposto no capítulo anterior, em um contexto sustentável, os impactos intergeracionais e intrageracionais precisam ser considerados na adoção de políticas públicas. O problema prático dessa aplicação está na subestimação dos impactos no futuro. Como ao longo do tempo há uma diminuição da representatividade de um valor monetário (cem reais hoje nos trariam maior satisfação do que cem reais em 5 anos), os impactos que foram transformados em unidade monetária também terão seu valor reduzido ao longo do tempo. Implicitamente, o processo de desconto leva a uma maior valorização da geração presente em detrimento das gerações futuras.

Já na década de 60, Feldstein (1965) afirmava que escolher o tempo de análise dos fluxos de benefícios e custos sociais é um dos problemas mais difíceis e importantes na avaliação de projetos de investimentos públicos. No âmbito das regras de valor presente de investimentos, o cálculo da taxa de desconto define uma relação funcional que faz com que as rendas geradas em pontos diferentes no tempo se tornem comensuráveis entre si, atribuindo-lhes valores presentes equivalentes. Determinar a admissibilidade de um projeto requer comparar seu benefício líquido anual com o consumo que teria ocorrido se os recursos não tivessem sido usados no projeto em particular. Conforme exposto por Mueller, haveria um viés contra o futuro associado à prática do desconto, e que aumenta quanto mais alta for a taxa de retorno usada.

O desconto do futuro reflete a preferência pelo presente dos consumidores e a preferência pelo custo de oportunidade do capital pelos produtores (preferência pura pelo tempo). Outra argumentação que justificaria a utilização de uma taxa de desconto positiva está na utilidade marginal decrescente do consumo com o aumento da renda (elasticidade da utilidade marginal) em que quanto maior for a renda das gerações futuras menor será o valor que darão ao aumento marginal do consumo. Consequentemente, quanto maior for a renda das gerações futuras menor será o valor que darão ao aumento marginal do consumo (HANLEY E SPASH, 1994).

Os impactos da definição da taxa de desconto ficam ressaltados em projetos com benefícios ou custos que só serão resgatados no longo prazo. Quanto maior for o horizonte temporal necessário para o custo ou benefício se concretizarem, menor será o valor presente líquido.

De acordo com Dasgupta (1983), mesmo apresentando preferência pura pelo tempo igual a zero, os custos e benefícios futuros serão descontados quando o consumo for crescente. Isso ocorre porque a poupança é o equivalente a oferta de capital. Assim, adiar o consumo corrente aumenta a renda futura por meio da produtividade marginal do capital. Em um mercado de concorrência perfeita, a taxa marginal de retorno do capital seria equivalente a taxa de desconto, ou seja, diferente de zero.

No contexto intergeracional, a Fórmula de Ramsey define a taxa de desconto que iguala a soma da taxa de desconto utilitarista e a taxa de

crescimento do consumo no período, ponderada pela elasticidade marginal da utilidade do consumo (ARROW *et al.*, 2012):

$$\rho_t = \delta + \eta \cdot g_t \quad (2)$$

Em que:  $\rho_t$  é a taxa de desconto social,  $\delta$  é a taxa pura social de preferência temporal (o que pode ser interpretada como a taxa de desconto da utilidade do indivíduo),  $\eta$  é a taxa de aversão ao risco relativo e  $g_t$  é a taxa de crescimento do consumo (elasticidade marginal da utilidade do consumo).

Porém, há uma série de divergências quanto à forma de determinação da taxa de desconto. Hanley e Spash (1994) enumeram as limitações observadas quando se analisa a taxa social de desconto:

1. A taxa pura social de preferência temporal individual seria diferente da taxa adotada pela sociedade.

A sociedade (de forma coletiva) escolheria poupar mais do que a soma individual das decisões de poupar. Isso ocorre porque poupar agora (e investir agora) gera benefícios de consumo no futuro, o que apresentaria uma oferta inferior ao desejável no mercado por conta do problema dos caronas. Assim, os governos deveriam aplicar uma taxa de desconto inferior a que seria aplicada pelo mercado.

A diferença entre a taxa social de desconto e a individual estaria no fato de que os indivíduos apresentam preferências intertemporais diferentes ao adotarem o papel de cidadão e de consumidor. Provavelmente, os indivíduos adotariam uma taxa de desconto inferior no primeiro papel especialmente no que tange a custos e benefícios ambientais.

A adoção da taxa de desconto do mercado de longo prazo em análises de políticas públicas é questionada pelo fato de que só é considerada a taxa de preferência pelo tempo da geração corrente. O questionamento está no fato de que os indivíduos apresentam expectativas de vida finitas, o que influencia a taxa, diferentemente da sociedade, que apresenta uma noção coletiva de perpetuidade, reduzindo a taxa pura de preferência temporal.

2. A taxa pura social de preferência temporal individual seria inferior à taxa de retorno do capital.

Outro aspecto que limita a definição da taxa social de desconto está no fato de que ela será inferior à taxa de retorno do capital por conta da taxação. Assim, o setor privado realizaria poucos investimentos do ponto de vista da sociedade.

Além dos aspectos filosóficos, a definição de qual taxa de desconto deve ser adotada em políticas públicas (*policies*) está sujeita a uma escolha política (*politics*). Trabalho realizado por Page (1977) analisou o programa de construção de barragens adotado pelos Estados Unidos durante os anos 60 e 70 e observou que caso a taxa de desconto passasse de 2,5% para 8%, cerca 80% dos projetos implantados não teriam sido aprovados. De acordo com o trabalho, a estrutura econômica da época permitiria a adoção de uma taxa de desconto de 8%; porém, a escolha prévia da construção das barragens influenciou a análise dos projetos.

Assim, há uma vasta discussão literária acerca da definição da taxa de desconto. As imperfeições e distorções do mercado em relação às premissas teóricas mostram que não há uma taxa única pré-determinada que deva ser utilizada. Diversos autores vêm propondo formas de se estimar e aplicar a taxa de desconto sem chegar a um acordo aparente. O trabalho de Saez e Requena (2007) organiza as propostas dos autores de acordo com o método sugerido. Essa classificação foi complementada por trabalhos mais recentes e foi organizada no Quadro 2.



**Quadro 2 – Resumo dos métodos propostos para a definição da taxa de desconto**

Proposta e autores	Descrição
<p>Taxa de desconto igual à zero.</p> <p>Autores: Shue, 1999; Harrod, 1948; Ciriary-Wantrup, 1942.</p>	<p>Os autores que propõem a taxa de desconto igual a zero afirmam que esse seria o único valor adequado para garantir o tratamento equitativo entre as gerações. Os autores também discutem o aspecto ético de se calcular taxas de desconto positivas.</p> <p>Essa abordagem tem como foco os impactos ecológicos dos projetos em detrimento das relações econômicas associadas à alocação de recursos para investimentos. O custo de oportunidade do capital, o crescimento potencial de consumo e as preferências da sociedade não são incluídas nesse método. Em termos práticos, seria difícil alocar elevados montantes de recursos para a adoção de um projeto sem que haja a inclusão dos aspectos econômicos na análise.</p>
<p>Taxa de preferência social temporal (<i>Social Time Preference Rate – STPR</i>)</p> <p>Autores: Roemer, 2013; Dasgupta, 2011; Lesser <i>et al.</i>, 1997; Carpenter (1997), Solow, 1991.</p>	<p>Nesse caso, acredita-se que uma taxa de desconto positiva está associada ao acúmulo de capital e tecnologia que será deixado para as futuras gerações. O cálculo da STPR envolve a premissa de que as futuras gerações terão uma renda maior e um impacto causado no futuro seria menor do que o impacto causado pela não realização do projeto no presente.</p> <p>Além disso, a adoção desse método parte do pressuposto de que o capital natural pode ser perfeitamente substituído pelos outros tipos de capital.</p>

Proposta e autores	Descrição
<p>Inclusão de uma restrição à redução do capital natural.</p> <p>Autores: Pearce e Turner, 1990; Barbier, 1990.</p>	<p>Seus defensores propõem que não seria necessário reduzir as taxas de desconto se for incluída na análise uma restrição à redução do capital natural. Tais autores afirmam que, independentemente do impacto, o estoque de capital natural deve ser constante. Em outras palavras, os autores propõem que junto ao projeto devem-se incluir os processos de compensação ambientais adequados para a restauração do meio ambiente.</p> <p>O ajuste proposto na STPR, após a inclusão das externalidades no cálculo dos custos do projeto, não seria adequado por levar à dupla contagem do dano já que os impactos estariam mensurados no custo do projeto e na restrição do capital natural. Essa proposta também apresenta uma dificuldade de operacionalização por conta da definição do limite de redução do estoque natural.</p>
<p>Taxa de desconto linearmente decrescente ao longo do tempo.</p> <p>Autores: Horta, 1998 e Rabl, 1996.</p>	<p>Esse método busca amenizar o viés pelo presente da aplicação da taxa de desconto com a aplicação linearmente decrescente da taxa de desconto. Essa adoção é amplamente criticada por não apresentar critérios claros para a redução da taxa.</p>

Proposta e autores	Descrição
<p data-bbox="185 384 591 464">Obtenção da taxa de desconto de forma empírica.</p> <p data-bbox="185 501 568 683">Autores: Luckert e Admowicz (1993); Cropper <i>et al.</i> (1992); Benzion <i>et al.</i> (1989) e Poper e Perry (1989).</p>	<p data-bbox="618 331 2011 416">Nesse caso, o comportamento e a visão da geração atual seria mensurada para definir a taxa de desconto. Uma das formas sugeridas é por meio de pesquisa de opinião da geração presente.</p> <p data-bbox="618 453 2024 735">O problema desse método estaria na ausência de análise das perspectivas de mercado e de melhoria de bem-estar (consumo) futuro. Além disso, há uma série de dificuldades na aplicação de pesquisas de opinião para algo não associado de forma concreta à vida da população atual. É possível que haja um viés positivo de preocupação com a geração futura já que não haveria custos atuais concretos. Em outras palavras, a pesquisa poderia superestimar o que a geração atual estaria disposta a abrir mão em função do bem-estar das gerações futuras.</p>
<p data-bbox="185 791 584 971">Adoção da taxa de desconto padrão com aumento do valor do meio ambiente ao longo do tempo.</p> <p data-bbox="185 1008 584 1093">Autores: Porter (1982); Krutilla e Fisher (1975)</p>	<p data-bbox="618 815 2002 900">Essa proposta prevê que a taxa de desconto seja estimada com base no mercado financeiro e que o valor mensurado dos impactos ambientais aumente ao longo do tempo.</p> <p data-bbox="618 936 1973 1066">A dificuldade da aplicação desse método está na falta de clareza da taxa de crescimento do impacto ambiental. A proposta ficaria sujeita à visão do gestor público sobre a relevância daquele impacto, o que poderia gerar um viés político (<i>politics</i>) no processo decisório.</p>

Proposta e autores	Descrição
<p>Explicitação das gerações futuras na análise.</p> <p>Autores: Chichilnisky (2009); Sumaila e Walters (2005); Fearnside (2002); Padilla (2001); Kula (1988).</p>	<p>A explicitação das gerações futuras na análise pode ser feita de diversas formas: por meio do cálculo do valor presente líquido ajustado com a incorporação de uma variável intergeracional no modelo (com adoção de um método que buscaria medir o nível individual atual de “altruísmo”) ou pela inclusão de um fator de desconto entre gerações, entre outras. O método apresenta propostas e resultados diferentes dependendo do autor. Ainda não há grande potencial de discussão para o desenvolvimento de um método de aplicação plausível.</p>
<p>Critério utilitarista hierarquizado de desconto.</p> <p>Autores: Zuber e Asheim (2012)</p>	<p>O método sugere a aplicação de um critério utilitarista hierarquizada de desconto na busca da equidade intergeracional. Os autores propõem que o gestor público utilize um elemento da classe da função de bem-estar social utilitarista hierarquizada, ou seja, com a construção de uma função de bem-estar social em um horizonte temporal infinito onde a utilidade da geração seguinte deve ser igual ou superior à utilidade da geração anterior.</p> <p>A proposta não demonstra com clareza como o método poderia ser aplicado. Alguns desenvolvimentos foram realizados no caso de mudanças climáticas, mas sem aplicação clara em políticas públicas.</p>

Proposta e autores	Descrição
<p>Taxa de desconto dual.</p> <p>Autores: Kula e Evans (2011); Saez e Requena (2007).</p>	<p>Alguns autores propõem a aplicação de uma taxa de desconto para os impactos tangíveis e outra para os intangíveis (ambientais).</p> <p>No entanto, o trabalho elaborado por Arrow <i>et al.</i> A pedido da Environmental Protection Agency – EPA (2012) para a construção de um método de definição da taxa de desconto desaconselha a aplicação de taxas de desconto diferentes para um mesmo período no tempo. Essa diferença geraria inconsistências intrageracionais e intergeracionais.</p>
<p>Taxa de desconto baseada no comportamento do mercado.</p> <p>Autores: Arrow <i>et al.</i> (2013), Mertens e Rubinchik (2011); Cline (1999); Azar e Sterner (1996); Cropper <i>et al.</i> (1994); Weitzman (1994); Horowitz (1991); Thaler (1981); Hausman (1979).</p>	<p>A taxa de desconto adotada sofreria variações de acordo com o comportamento atual do mercado perante fatores como risco, propensão a poupar, consumo, entre outros. Em muitos casos, os autores sugerem a adoção de uma taxa decrescente de desconto em formato de hipérbole. Como: Gowdy (2013), Frederick <i>et al.</i> (2002), Loewenstein and Prelec (1992); Sterner (1994); Henderson e Bateman (1995); Azqueta (1996);</p>

Fonte: Elaboração própria com base nas referências mencionadas.

Portanto, uma série de discussões foi desencadeada a respeito da importância e definição da taxa de desconto na análise de projetos. Em 2012, a *Environmental Protection Agency* (EPA) formou um grupo de 12 economistas renomados com o objetivo de estruturar o método mais adequado para a definição da taxa de desconto social. O grupo é formado por Arrow, Heal, Pindyck, Portney, Sterner, dentre outros grandes especialistas.

O método proposto por Arrow *et al.* (2012) afirma que a taxa decrescente de desconto deve ser usada quando há incertezas relacionadas ao estado da economia e quando também há choques de crescimento persistentes. Nesse caso, duas abordagens poderiam ser adotadas. A primeira seria estruturar modelos estocásticos de estimação da taxa de juros de mercado. A segunda seria utilizar a versão estendida da Fórmula de Ramsey em que  $\delta$  e  $\eta$  seriam definidos e uma modelagem seria desenvolvida para definir  $g_t$  conforme exposto na Equação 2 (citada anteriormente):

$$\rho_t = \delta + \eta \cdot g_t \quad (2)$$

A parametrização da Fórmula de Ramsey também é discutida com base em duas abordagens: descritiva e normativa. A abordagem descritiva pressupõe que a taxa de desconto deva refletir o comportamento observado em mercados. A normativa requer que aspectos éticos sejam levados em consideração na estimativa da taxa de desconto da utilidade do indivíduo ( $\delta$ ) e a elasticidade marginal da utilidade do consumo  $g_t$ . De forma relativamente consensual, sugere-se que:

$\delta$  seja próximo de zero por representar a utilidade das futuras gerações. Nesse sentido, seria aceitável apenas um valor que represente a probabilidade das futuras gerações não existirem. Stern (2006) assume que a taxa de risco de extinção da raça humana é de 0,1% ao ano;

$\eta$  determine a velocidade da queda da utilidade marginal do consumo na medida em que o consumo aumenta. Em outras palavras, reflete o sacrifício máximo que uma geração estaria disposta a transferir de renda para outra geração. Esse parâmetro também mede o coeficiente de aversão relativa ao risco e a elasticidade intertemporal da substituição de consumo. Uma forma de

estimar  $\eta$  seria observando as políticas de transferência de renda utilizadas na sociedade, como é o caso da tributação progressiva de renda, por exemplo. Seria possível afirmar que a aversão à inequidade intrageracional seria similar à intergeracional. Quanto menor o valor, maior a propensão da sociedade a poupar para aumentar o bem-estar de futuras gerações. Há também uma visão em que  $\eta$  representaria o coeficiente de aversão ao risco, o que poderia ser observado no mercado financeiro. O problema é que essa abordagem, por ser restrita aos agentes ativos no mercado financeiro, não reflete os *trade-offs* intrageracionais de consumo, o que limita a análise de bem-estar social.

Já  $g_t$  seria a taxa de crescimento do consumo; o trabalho de Baum (2009) sugere que esse valor seja próximo de 2% ao ano no longo prazo.

Porém, como há uma série de incertezas relacionadas à taxa de crescimento de consumo, Arrow *et al.* sugerem uma extensão da Fórmula de Ramsey com taxa de crescimento de consumo incerta:

$$\rho = \delta + \eta\mu_g - 0,5\eta^2\sigma_g^2 \quad (3)$$

Em que a variação proporcional no consumo no momento  $i$  normalmente distribuído com média  $\mu_g$  e variância  $\sigma_g^2$ . Os últimos termos da fórmula apresentam um efeito de precaução onde a incerteza sobre a taxa de crescimento do consumo reduz a taxa de desconto, fazendo com que o gestor público poupe mais no presente. Esse fator, contudo, deverá apresentar baixo valor.

Outros impactos, como grandes choques no consumo oriundos de uma grande crise econômica ou guerras, apresentam impactos significativos na taxa de desconto. Nesse caso, supõe-se que  $x_t$  represente a taxa de crescimento do consumo em porcentagem no ano  $t$ . O crescimento no consumo apresentaria distribuição normal com média  $\mu_g$  e variância  $\sigma_g^2$ . A variável  $\mu_g$  é estimada com base em  $n$  observações sobre  $x_t$ . Isto conduz à seguinte equação para a taxa de desconto de segurança-equivalente:

$$\rho = \delta + \eta\mu_g - 0,5\eta^2\sigma_g^2 - 0,5\eta^2\sigma_g^2(t/n) \quad (4)$$

O quarto termo presente na equação, de acordo com os autores, tem um “efeito de previsão estatística” que faz  $\rho$  diminuir na medida em que  $t$  aumenta condicionada à variância ( $\sigma_g^2$ ). Em outras palavras, a incerteza sobre a taxa média de crescimento do consumo influencia a tendência decrescente da taxa de desconto.

Uma abordagem alternativa seria o Valor Presente Líquido Esperado. Incertezas relacionadas à taxa de desconto justificaria utilizar uma estrutura de taxa de desconto decrescente na atualidade. Mais especificamente, a distribuição da probabilidade da taxa de desconto tendo como base uma taxa de desconto exponencial constante no futuro induziria ao uso de uma estrutura decrescente de taxa de desconto no presente.

$$A(t)Z(t) = E(\exp(-rt))Z(t) \quad (5)$$

Se a taxa de desconto  $r$  é fixa e incerta durante o tempo deve-se aplicar a fórmula acima em que  $A(t)$  é o valor esperado do desconto,  $Z(t)$  são os benefícios esperados.

O trabalho de Arrow *et al.* (2012) conclui que, na Fórmula de Ramsey, a incerteza sobre a taxa de crescimento per capita de consumo pode levar a uma taxa de desconto decrescente de consumo ao assumir que os choques de consumo estão positivamente relacionados. Essa incerteza da taxa de crescimento futuro pode ser estimada econometricamente, baseando-se em observações históricas, ou pode ser derivada da incerteza subjetiva relacionada à taxa de crescimento médio no consumo médio.

O Valor Presente Líquido Esperado é considerado teoricamente menos elegante, além de não medir a taxa de desconto do consumo, o que pode ser obtido na Fórmula de Ramsey. Porém, o VPLE é empiricamente factível.

Outra sugestão relevante feita por Arrow *et al.* (2012) é a ressalva de que não se deve usar taxas de desconto diferentes em um mesmo ano para fatores diferentes. O mais adequado seria adotar uma taxa de desconto decrescente, resultando em uma consistência mais adequada entre os aspectos inter e intrageracionais. Ou ainda pode-se adotar a mesma taxa de



desconto constante e exponencial para todas as categorias de custo de benefício.

A revisão literária permitiu observar que, no caso específico da equidade intergeracional, a economia enfrenta dificuldades na aplicação de taxas de desconto: quando há o conhecimento de impactos no longo prazo, a teoria nos leva a ter um valor menor do que os impactos no presente.

Apesar dos esforços teóricos, o procedimento de desconto precisa ser complementado com análises relacionadas à gravidade do impacto ambiental. Conforme exposto por Padilla (2002), e explicitado no capítulo anterior, também é necessário analisar a escala dos impactos ambientais (escalas locais ou globais). Se, mesmo após a análise dos impactos futuros, o empreendimento ainda for relevante, é também necessário definir formas de compensar tais impactos. Dois aspectos fundamentais a serem considerados seriam reconhecer a necessidade de compensação e começar a considerar a existência de direitos intrínsecos das futuras gerações.

Para o desenvolvimento do trabalho no caso da disposição final de rejeitos nucleares no Brasil, dois tipos de cálculo de taxas de desconto serão aplicados para a análise da equidade intergeracional:

- i. Taxa de desconto de mercado.
- ii. Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente (Equação 4).

A versão estendida de segurança-equivalente seria adequada para a análise por considerar variações mais bruscas no consumo o que pode ser observado no longo prazo, período proposto na análise. Além disso, as informações referentes às variáveis estão disponíveis para o cálculo.

Em seguida, considerações qualitativas quanto à gravidade e escala dos impactos ambientais observados serão realizadas.

### 3. *Yucca Mountain*: Um caso de disposição final

Este capítulo tem como objetivo analisar um dos projetos de disposição de resíduos nucleares mais avançados em termos de análise de impacto ambiental: *Yucca Mountain*. Os critérios avaliados serão usados como base para o desenvolvimento do Capítulo 4, que tratará do custo ambiental da disposição de rejeitos nucleares da Usina Nuclear de Angra 3 no Brasil.

As análises ambientais apresentadas neste capítulo são oriundas do documento *Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada*, elaborada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) de 2008<sup>2</sup>.

#### 3.1. A decisão por *Yucca Mountain*

De acordo com Vandebosch e Vandebosch (2007), tanto a *International Atomic Energy Agency* (IAEA) quanto a Agência de Energia Nuclear da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) discutem as alternativas para a disposição final de rejeitos nucleares tendo como base a equidade intergeracional. Os órgãos internacionais partem do princípio de que as decisões relacionadas à gestão dos resíduos devem considerar que os impactos previstos na saúde das gerações futuras não podem ser superiores ao nível atual de impactos aceitáveis pela legislação e sociedade como um todo. Além disso, a gestão de resíduos não pode impor encargos desnecessários às gerações futuras.

Com base nesses princípios, os depósitos monitorados de resíduos nucleares não seriam uma alternativa adequada para o horizonte temporal que vai além de duas gerações. Vandebosch e Vandebosch (2007) sugerem que os depósitos de confinamento e isolamento seriam a única opção adequada para a disposição de rejeitos nucleares. Além do depósito isolado, há também discussões sobre a viabilidade da transmutação nuclear. Infelizmente, a transmutação ainda apresenta custo elevado por conta das limitações

---

<sup>2</sup> Esse é o documento disponível mais recente que trata dos impactos relacionados ao projeto.

tecnológicas. Além disso, ainda há questionamentos quanto à geração de resíduos desse tipo de processo (VANDENBOSCH E VANDENBOSCH, 2007). Dentre as opções de disposição de rejeitos nucleares apresentados pelos autores, destacam-se:

- 1 armazenamento no próprio reator nuclear;
- 2 armazenamento temporário centralizado; e
- 3 depósito geológico.

O armazenamento dos resíduos na própria Usina Nuclear apresenta uma série de vantagens no curto prazo. Primeiramente, ele evita o transporte dos resíduos. Além disso, o risco de alocar os resíduos estaria geograficamente localizado na região que se beneficiou da instalação da usina. Porém, esse tipo de armazenamento deixa de ser viável quando a usina encerra suas atividades. Além disso, por não ser um depósito centralizado, é necessário construir várias estruturas em diferentes usinas para alocar os resíduos, o que acaba gerando custos elevados.

No caso do armazenamento centralizado temporário, o ganho de escala na centralização de uma estrutura para depósito dos resíduos amenizaria a questão do custo. Por outro lado, a necessidade de transporte dos resíduos para o depósito gera uma série de preocupações. Além da possibilidade de acidentes (como foi o caso do acidente ocorrido com o transporte ferroviário de resíduos perigosos em *Baltimore*, no Estado de *Maryland*, Estados Unidos, em 2001<sup>3</sup>), há também a preocupação de ataques terroristas. Acredita-se que a necessidade de transporte desse tipo de resíduo gera uma vulnerabilidade de segurança.

Finalmente, a estrutura até então proposta envolve a alocação dos resíduos em cápsulas de aço em ‘cascas’ de concreto. Esse tipo de estrutura é considerado seguro para potenciais impactos ambientais em períodos relativamente curtos (décadas) por conta da degradação da própria estrutura. Assim, os resíduos precisarão ser transportados para um novo tipo de depósito. A vida útil desse tipo de armazenamento é curta quando comparada ao período necessário para que a toxicidade do combustível irradiado atinja valores do minério natural de urânio e deixe de ser uma ameaça ao meio

---

<sup>3</sup> Para mais informações, acesse ‘The Baltimore Sun’, [http://articles.baltimoresun.com/2011-07-16/news/bs-md-howard-street-tunnel-20110716\\_1\\_howard-street-tunnel-freight-train-17-mile-tunnel](http://articles.baltimoresun.com/2011-07-16/news/bs-md-howard-street-tunnel-20110716_1_howard-street-tunnel-freight-train-17-mile-tunnel).

ambiente (séculos). Além disso, a área escolhida precisa ser aquela em que não há interesse potencial de utilização no longo prazo como, por exemplo, ausência de fontes minerais e/ou fósseis.

Os depósitos geológicos são propostos para a disposição final e definitiva dos resíduos nucleares. A ideia geral seria a de alocar os resíduos em um ambiente em que não seria necessário ter um acompanhamento contínuo após a disposição dos resíduos e o fechamento dos acessos. Isso faz com que a estrutura das cápsulas e o contexto geológico não permitam que os resíduos causem impactos relevantes ao meio ambiente e gerem impactos à saúde da população. Dentre as estruturas geológicas propícias para esse tipo de depósito destacam-se as de tufo, oriundas de explosões vulcânicas. O depósito de *Yucca Mountain*, em *Nye County*, no Estado de *Nevada* está abaixo de uma camada de tufo.

De acordo com Vandebosch e Vandebosch (2007), esse tipo de rocha estaria sujeita a fraturas e transporte de água da superfície para os resíduos nucleares. Observa-se que ainda há muitas incertezas e limitações científicas na definição do tipo de estrutura mais adequada para o depósito final de resíduos nucleares. Os Estados Unidos têm passado por um longo processo para a concretização do depósito final de *Yucca Mountain*. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) começou a estudar *Yucca Mountain* em 1978 para determinar se o local seria adequado para ser o primeiro repositório geológico de longo prazo do país para mais de 70.000 toneladas métricas de combustível nuclear irradiado e de resíduos altamente radioativos atualmente armazenados em 129 locais em 39 estados em todo o país.

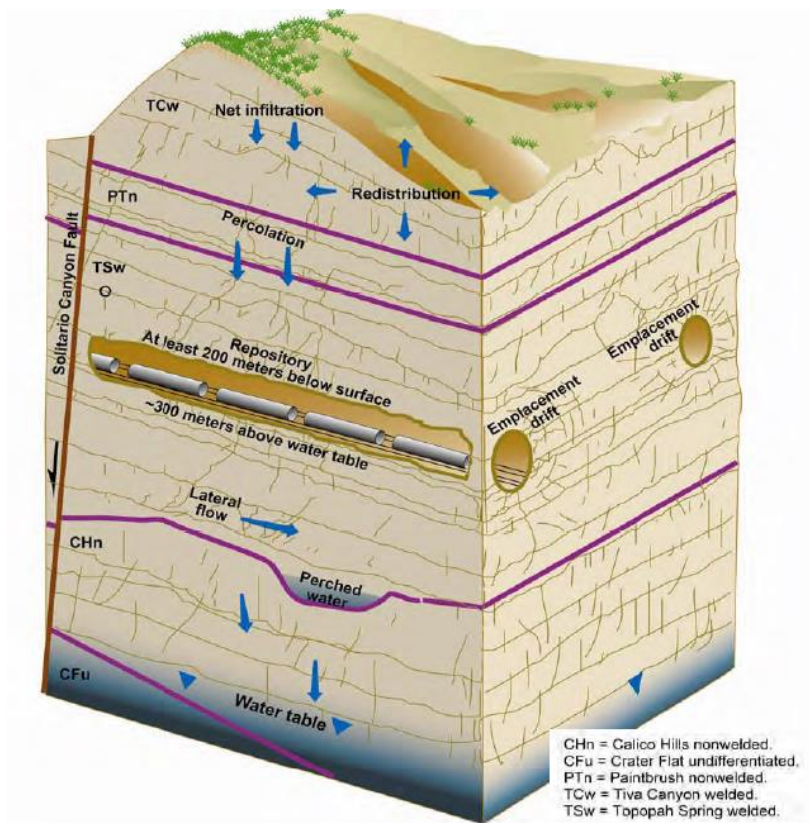
A aprovação pelo Congresso americano em 1982 do *Nuclear Waste Policy Act (NWPA)* estabeleceu o processo de seleção para a destinação final dos resíduos nucleares com um cronograma que definiu a eliminação adequada dos resíduos a partir de 1998. Além disso, criou um fundo monetário para pagar o programa de resíduos a partir de taxas cobradas sobre a geração de eletricidade de centrais nucleares e determinou que os repositórios fossem licenciados pela Comissão Reguladora Nuclear (NRC). Em 1987, *Yucca Mountain* foi definido como o repositório selecionado (SANDERS, 2013). A área passou por uma série de estudos com custos acima dos estimados e com prazos além do esperado. O Estado de Nevada entrou com uma série de ações

nesse período contra o Governo americano, o Departamento de Energia e a Comissão Reguladora Nuclear contrárias à decisão de implantar o repositório de *Yucca Mountain* e pedindo detalhamentos sobre os impactos ambientais potenciais. Em 2004, o Tribunal de Apelação dos EUA, em Washington, adotou o padrão de radiação definido pela Agência de Proteção Ambiental americana (*US Environmental Protection Agency - EPA*) para *Yucca Mountain*, mas descartou as outras ações do Estado de *Nevada*.

O repositório de *Yucca Mountain* está em um ambiente de deserto semiárido. O lençol freático está há mais de 600 metros abaixo da superfície da montanha. O repositório proposto estaria em uma rocha localizada na área central entre a superfície e o lençol freático (Figura 1).

Em 2008, a Declaração Suplementar de Impacto Ambiental do repositório foi concluída. A análise do impacto ambiental do depósito geológico de *Yucca Mountain* foi analisada em 4 aspectos (DOE [a], 2008):

- impactos ambientais na construção, operação, monitoramento e encerramento do depósito;
- impactos ambientais após o encerramento do depósito;
- impactos ambientais no transporte dos resíduos até o depósito (não será discutido nesse capítulo);
- impactos ambientais sem a construção do depósito de *Yucca Mountain* (manutenção dos 76 depósitos temporários já existentes).



CHn: Camada de rocha não fundida *Calico Hills*.

CFu: Camada de rocha tufo indiferenciada *Crater Flat*.

PTn: Camada de rocha não fundida *Paintbrush*.

TCw: Camada de rocha fundida *Tiva Canyon*.

TSw: Camada de rocha fundida *Topopah Spring*.

Solitario Canyon Fault: Falha geológica *Solitario Canyon*

Net infiltration: Rede de infiltração

Redistribution: Redistribuição

Percolation: Filtragem

Repository: Repositório

At least 200 meters below surface: Pelo menos 200 metros abaixo da superfície

~300 meter above water table: ~300 metros acima do lençol freático

Emplacement drift: Estrutura de deslocamento

Lateral flow: Fluxo lateral

Perched Water: Aquífero

Fonte: Doe (2008) com tradução livre.

**Figura 1 - Estrutura do repositório de *Yucca Mountain***

### 3.2. Impactos durante a construção, operação e encerramento do depósito.

A primeira etapa de análise dos impactos ambientais do depósito geológico de *Yucca Mountain* foi referente à construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório. Foram considerados os seguintes períodos para cada etapa:

- Construção: 5 anos.
- Operação do depósito: 50 anos.
- Monitoramento do depósito: 50 anos (esse período envolve o monitoramento do depósito após o recebimento do último pacote de resíduos e antes do encerramento do depósito).
- Encerramento do depósito: 10 anos (se sobrepõe aos últimos 10 anos de monitoramento e inclui atividades relacionadas ao encerramento como a demolição da superfície das instalações, isolamento da área, restauração da superfície à condição aproximada anterior à construção do repositório etc.).

O Quadro 3 resume os impactos durante a construção, operação e encerramento do depósito. De modo geral, o relatório considerou que os impactos previstos não eram potencialmente relevantes. O detalhamento da análise do relatório está apresentado no Apêndice A.

**Quadro 3 - Impactos potenciais durante a construção, operação e encerramento do depósito.**

Tipo de impacto	Características gerais	Conclusão apresentada no relatório
Impactos no uso da terra	A área total impactada seria de 610,6 km <sup>2</sup> .	As atividades do repositório não entrariam em conflito com o uso atual de terras adjacentes.  O estudo considera que os impactos do uso da terra seriam pequenos.
Impactos na qualidade do ar	O DOE avaliou os impactos na qualidade do ar tendo como referência 5 poluentes: monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, ozônio e material particulado. Além desses poluentes, também foram analisados os impactos potenciais da cristobalita, uma forma de pó de sílica, que é o agente causador da silicose (doença respiratória) e pode ser uma substância cancerígena.	A análise realizada mostra que a concentração de gases poluentes atende ao limite legal. Os poluentes não chegam a 43% do limite legal definido pela legislação americana e, portanto, não representam impactos significativos ao meio ambiente.



Tipo de impacto	Características gerais	Conclusão apresentada no relatório
Impactos hidrológicos	<p>A análise dos impactos hidrológicos considerou de forma separada as águas na superfície e as águas subterrâneas. Os critérios utilizados para avaliar os impactos nas águas de superfície foram as descargas de água para a superfície, a possibilidade de eliminação de contaminantes nas águas de superfície, os impactos potenciais nas taxas de escoamento e infiltração, e a possibilidade de alteração dos recursos naturais de drenagem das águas superficiais, o que geraria impacto nas várzeas (ou zonas de inundação).</p>	<p>A possibilidade de liberação de contaminantes nas águas de superfície durante a construção foi considerada remota pela análise. O potencial de os contaminantes alcançarem as águas de superfície seria limitado à ocorrência simultânea de um derramamento ou vazamento e de precipitação intensa ou neve derretida. Não existem águas superficiais perenes naturais na região de <i>Yucca Mountain</i>, nem há fontes prontamente disponíveis de contaminação.</p> <p>A análise conclui que a demanda máxima anual de água atenderia às exigências do Estado de Nevada para que a extração de água não esgote as reservas das bacias hidrográficas. Além disso, os impactos oriundos da retirada prevista da água seriam inferiores se comparados com o nível de extração de água previamente existente na área.</p>

Tipo de impacto	Características gerais	Conclusão apresentada no relatório
Impactos nos recursos biológicos e no solo	A avaliação dos impactos aos recursos biológicos e solos considerou os efeitos potenciais à vegetação e aos animais selvagens incluindo as espécies em situação especial de proteção e seus habitats; os pântanos; as áreas ribeirinhas e os recursos do solo. Também foi analisado o impacto potencial nos padrões migratórios e nas populações de animais de caça.	O DOE avaliou que os impactos globais aos recursos biológicos seriam pequenos. A remoção da vegetação da área para a construção e operação do repositório e as intervenções consideradas pequenas em algumas espécies selvagens não afetaria a biodiversidade regional e tampouco o bom funcionamento do ecossistema.
Impactos à saúde e segurança da população	São descritos os impactos potenciais à saúde e segurança dos trabalhadores do repositório (impactos ocupacionais) e à população não trabalhadora do repositório (impactos públicos).	No total, as atividades previstas para os períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de <i>Yucca Mountain</i> ocasionarão aos trabalhadores 1.800 casos graves, com a ocorrência de 800 dias perdidos de trabalho no período de 105 anos e com a ocorrência de 0,92 fatalidade.

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

Dentre os impactos analisados, merecem destaque os impactos radiológicos potenciais na saúde e segurança para os trabalhadores e para a população externa ao projeto nos períodos de construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório de *Yucca Mountain*.

Os tipos de impactos na saúde e segurança em potencial para os trabalhadores incluem as consequências da exposição à radiação natural e artificial e a materiais radioativos no local de trabalho. Os impactos radiológicos estimados incluem as doses de exposição referentes aos trabalhadores envolvidos com exposição máxima aos materiais radioativos e também considera as doses de exposição para a população total de trabalhadores.

O trabalhador com exposição máxima seria o indivíduo que durante todo o seu período economicamente ativo teria como atividade remunerada o trabalho no repositório de *Yucca Mountain*, com exposição aos resíduos em um período superior a 50 anos. A população de trabalhadores envolvida estaria exposta a doses de exposição estimadas como conservadoras. Essa estimativa é dita conservadora por ser inferior à estimativa utilizada no projeto de blindagem. Contudo, essa abordagem “conservadora” resultaria em uma superestimação dos impactos para os trabalhadores se as doses de exposição forem baseadas nas características médias de combustíveis irradiados.

A Tabela 1 apresenta as doses estimadas de radiação e os impactos na saúde dos trabalhadores nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain*.

O modelo adotado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos estimou que o trabalhador com exposição máxima estaria sujeito a uma dose de radiação estimada de 30 rem<sup>4</sup> se não forem aplicados limites administrativos para reduzir exposições individuais. O aumento da probabilidade de uma fatalidade de câncer latente<sup>5</sup> seria de cerca de 0,02 para essa pessoa. O valor total de incidência de câncer latente e da dose de radiação estimada é similar ao do período de operação do depósito. Nos períodos de construção, manutenção e encerramento, a dose de radiação estimada chega a 30 rem e a incidência de câncer latente não chega a 0,0003.

---

<sup>4</sup> O rem (roentgen equivalent in man) é uma unidade de medida de radiação que considera a efetividade da radiação que causa danos biológicos (UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE, 1977).

<sup>5</sup> Morte resultante de câncer causado pela exposição à radiação ionizante. Há tipicamente um período de latência entre o tempo de exposição à radiação até as células cancerosas se tornarem ativas.

A dose de radiação total estimada para a população de trabalhadores durante o período de 105 anos seria de 5.800 pessoas-rem. Para colocar em perspectiva a dose de exposição de 5.800 pessoas-rem para a população de trabalhadores, a mesma população de trabalhadores receberia 29 mil pessoas-rem de exposição à radiação natural do solo para todo o período do projeto de 105 anos. Portanto, a adição de 5.800 pessoas-rem representaria um aumento de cerca de 20% devido ao depósito.

O aumento estimado em número de mortes latentes por conta do câncer que poderia ocorrer no ambiente de trabalho do repositório seria de 3,5. Isso pode ser comparado com as 17 mortes por câncer latente que poderiam resultar das 29.000 pessoas-rem na mesma população de trabalhadores que normalmente incorrem ao longo de todo o período do projeto expostas à radiação natural.

A população externa ao projeto estaria exposta aos lançamentos que ocorrem naturalmente e aos radionuclídeos artificiais presentes nas atividades do repositório. A análise estima as doses de radiação e os impactos na saúde para o indivíduo externo com exposição máxima na população potencialmente exposta.

O indivíduo externo com exposição máxima seria um membro hipotético do público que viveria durante 70 anos em um ponto na fronteira da área do repositório que receberia a maior dose de radiação e sofreria com o impacto máximo na saúde resultante da exposição. Esse local estaria a 19 km do limite do terreno na direção sul-sudeste para os casos de lançamentos da superfície geológica da área de operações do repositório e a 18 km do limite do terreno na direção sul-sudeste para as emissões das instalações subterrâneas.

A Tabela 2 apresenta as doses estimadas de radiação e os impactos na saúde na população externa ao projeto nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain*.

A dose coletiva estimada para a população localizada em um raio de 84 km para todo período de duração do projeto (105 anos) seria de 13.000 pessoas-rem. O número correspondente de morte por câncer latente para esta dose coletiva seria de 8, em uma população de cerca de 117 mil pessoas projetada em 2067, a 84 km do repositório. Para efeito de comparação, o DOE examinou o número esperado de mortes por câncer que ocorreriam a partir de

outras causas na mesma população durante o mesmo período. A análise calculou o número esperado de mortes por câncer que não estaria relacionada ao projeto com base nas estatísticas do *Centers for Disease Control and Prevention*. Os dados indicaram que, em 1998, 24% de todas as mortes no Estado de Nevada foram atribuídas ao câncer de algum tipo.

**Tabela 1 - Doses estimadas de radiação e os impactos na saúde dos trabalhadores nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain***

Tipo de Trabalhador e Tipo de impacto	Construção	Operação	Monitoramento	Encerramento	Total
Trabalhador com exposição máxima					
Dose anual máxima de radionuclídeos artificiais (rem/ano)					
Trabalhador Envolvido	0,0	1,3	0,20	0,039	1,3
Trabalhador Não envolvido	0,0	0,010	0,00001	0,00001	0,01
Dose total (rem)					
Trabalhador Envolvido	0,49	30	13	1,6	30
Trabalhador Não envolvido	0,052	0,25	0,21	0,028	0,25
Fatalidade por câncer latente					
Trabalhador Envolvido	0,00029	0,018	0,0078	0,00097	0,018
Trabalhador Não envolvido	0,000031	0,00015	0,00012	0,000017	0,00015
População de trabalhadores					
Dose coletiva (pessoa-rem)	38	4.400	930	420	5.800
Fatalidade por câncer latente	0,023	2,6	0,56	0,25	3,5

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

**Tabela 2 - Doses estimadas de radiação e os impactos na saúde da população externa ao projeto nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain***

Dose e impacto na saúde	Construção	Operação	Monitoramento	Encerramento	Total
Indivíduo externo com exposição máxima					
Dose anual máxima de radionuclídeos artificiais (mrem/ano)	0,0	0,055	0,0029	0,0029	0,055
Dose anual máxima (mrem/ano)	1,4	7,6	7,5	7,5	7,6
Total para o período (mrem)	4,2	310	300	41	530
Probabilidade da fatalidade por câncer latente	$2,5 \times 10^{-6}$	$1,9 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-4}$
Exposição da população em um raio de 84 km					
Dose de exposição coletiva (pessoa-rem)	85	6.400	6.100	840	13.000
Fatalidade por câncer latente	0,051	3,8	3,7	0,51	8

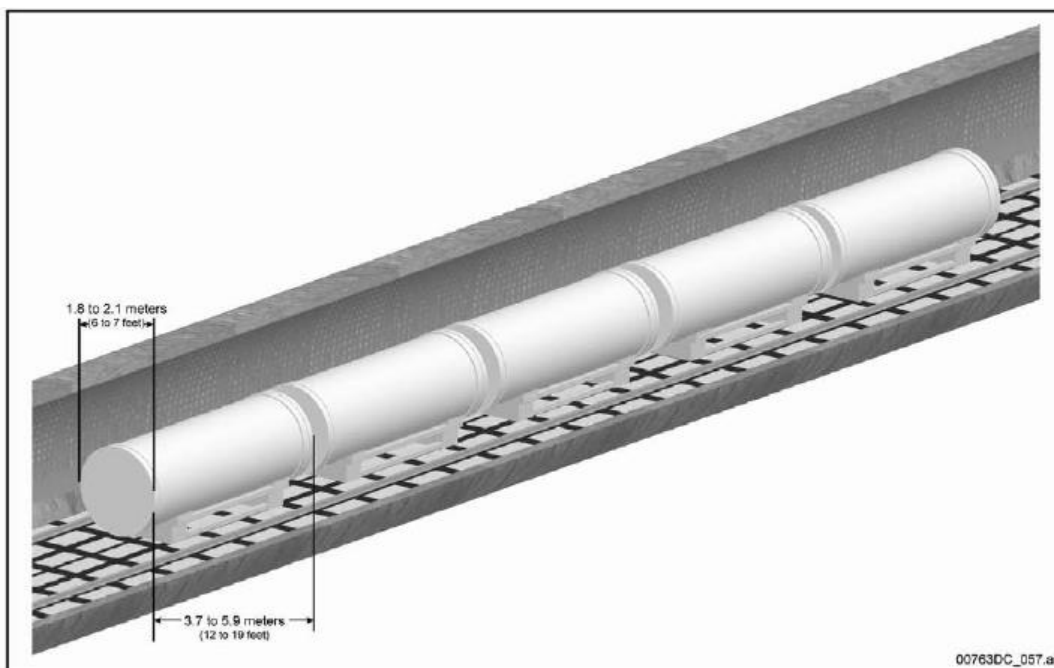
Fonte: DOE (2008).

### 3.3. Impactos ambientais após o encerramento do depósito geológico de *Yucca Mountain*

Esta seção apresenta a análise resumida dos impactos potenciais na saúde humana a partir de lançamentos de materiais radioativos e não radioativos para o meio ambiente após o encerramento do repositório de *Yucca Mountain*. O detalhamento dos impactos está apresentado no Apêndice B.

A disposição final dos resíduos seria realizada por meio de pacotes de resíduos que seriam alocados em uma área de armazenagem, alinhados e apoiados em paletas (Fonte: Doe (2008)).

**Figura 2).**



Fonte: Doe (2008).

**Figura 2 – Armazenagem dos pacotes de resíduos**

O pacote de resíduos é formado pelo recipiente exterior resistente à corrosão, pelos resíduos e quaisquer contêineres internos (tais como os utilizados no transporte, no processo de retenção do combustível nuclear para reduzir a sua produção térmica e na vasilha de eliminação), pela estrutura de espaçamento e pela blindagem integral ao recipiente. O pacote de resíduos



estaria pronto para colocação no repositório quando as soldas da tampa exterior estiverem completas.

O encerramento do repositório incluiria as seguintes atividades:

- Instalação dos escudos de gotejamento<sup>6</sup> sobre os pacotes de resíduos;
- Preenchimento das rampas do subsolo e das aberturas que ligam a superfície ao subsolo;
- Remoção das instalações da superfície; e
- Criação de controles institucionais, o que incluiria a construção de sinalizações na superfície para identificar a localização do repositório e desencorajar a intrusão humana.

Após o repositório ser fechado, haveria poucos trabalhadores em serviço. Não haveria uso mínimo de água, serviços públicos ou energia e a geração de resíduos seria mínima. Não haveria nenhuma mudança na qualidade da água que não fosse relacionada ao transporte de radionuclídeos e contaminantes químicos. Os impactos relacionados ao uso do solo, geração de ruídos, socioeconômicos, recursos culturais ou de qualquer serviço necessário após o encerramento do repositório seriam pequenos.

O DOE avaliou os processos pelos quais os radionuclídeos poderiam ser liberados para o meio ambiente. A análise utilizou programas de computador para avaliar a liberação e movimentação de radionuclídeos e de materiais perigosos no ambiente. Alguns dos programas analisaram o comportamento dos componentes de engenharia, tais como o pacote de resíduos, enquanto outros analisaram os processos naturais, tais como o movimento das águas subterrâneas.

A análise utilizou os dados referentes às atividades de *Yucca Mountain*, aos testes de materiais e aos pareceres de peritos como parâmetros de entrada para estimar os impactos na saúde humana. Muitos parâmetros utilizados na análise não podem ser exatamente medidos ou conhecidos e, portanto, foi utilizado um intervalo de valores. Assim, os resultados representam faixas de impactos potenciais à saúde.

---

<sup>6</sup> O escudo de gotejamento é feito de titânio e tem como objetivo proteger os pacotes de resíduos de gotas de água e da queda de rochas (DOE, 2008).

O Quadro 4 apresenta os impactos potenciais químicos, nos recursos biológicos e no solo após o encerramento do depósito geológico de *Yucca Mountain*. A análise considerou os impactos na saúde humana durante os primeiros 10.000 anos após o encerramento do repositório e a dose de radiação durante o período de 10.000 anos a 1 milhão de anos após o encerramento.

No caso dos materiais radioativos, foi analisado que eles estariam quase inteiramente sob a forma de sólidos com uma fração muito pequena do inventário radioativo na forma de gases aprisionados.

Na avaliação de falhas de gotejamento do escudo, a análise averiguou que os escudos de gotejamento começariam a falhar a partir de aproximadamente 260 mil anos e a maioria dos escudos falhariam em 310 mil anos. No caso da corrosão por tensão dos pacotes de resíduos, foi observado que a corrosão começaria por volta de 15 mil anos, e cerca de 50% das embalagens de resíduos falhariam por corrosão em 100 mil anos.

A avaliação mostra que todos os escudos de gotejamento e os pacotes de resíduos no repositório seriam destruídos caso houvesse a entrada de magma no depósito. Ou seja, todos os escudos de gotejamento e pacotes de resíduos no repositório perderiam sua capacidade de limitar ou impedir o fluxo de água e o movimento de radionuclídeos. No entanto, a probabilidade de acontecimento deste evento seria muito baixa e seus impactos seriam extremamente pequenos. Outro acesso possível dos resíduos à atmosfera seria por meio do vazamento de radionuclídeos gasosos. Isso poderia resultar em impactos extremamente pequenos. Portanto, o acesso e fluxo de água contaminada são as considerações mais importantes na determinação dos efeitos potenciais à saúde.

**Quadro 4 – Impactos potenciais após o fechamento do depósito.**

Tipo de impacto	Características gerais	Conclusão apresentada no relatório
Impactos químicos	<p>Foi realizada uma análise conservadora que assumiu uma taxa constante de liberação de materiais quimicamente tóxicos e considerou que a liberação afetaria diretamente a qualidade da água consumida pelo Individuo com Razoável Exposição Máxima.</p> <p>Ela expressa a dose com base no consumo diário de 2 litros de água por uma pessoa de 70 kg.</p>	<p>A dose de referência representa uma exposição diária que não apresenta risco ao indivíduo mesmo que a água seja consumida durante todo o período de vida.</p> <p>Todos os impactos estimados estariam abaixo do limite definido pela EPA.</p>
Impactos nos recursos biológicos e solo	<p>Foi analisado se o repositório afetaria os recursos biológicos nas proximidades de <i>Yucca Mountain</i> após o encerramento das atividades através do aquecimento da superfície do solo e da exposição à radiação como resultado de migração de radionuclídeos através de águas subterrâneas.</p> <p>No caso do aquecimento do solo, foram</p>	<p>A mudança de temperatura geraria impactos aos recursos biológicos que provavelmente consistiria de um aumento de espécies tolerantes ao calor e uma diminuição de espécies menos tolerantes. Em geral, as áreas que poderiam ser afetadas pelo aquecimento do repositório poderiam experimentar uma perda de espécies arbustivas e um aumento de espécies anuais (apresentam apenas uma geração durante o ano).</p> <p>A mudança na composição de espécies de plantas seria limitada</p>

	<p>analisados os impactos no solo ao sofrer uma carga de calor de 85 toneladas de metais pesados por acre. A variação estimada é de 0,2 °C a 6,0 °C. A temperatura do solo da superfície iria começar a aumentar a partir de 200 anos após o encerramento do repositório e atingiria o pico em cerca de 1.000 anos após o encerramento.</p>	<p>à área num raio de 500 metros da entrada da área do repositório (cerca de 8 km<sup>2</sup>). A mudança na comunidade de plantas provavelmente levaria a mudanças localizadas nas comunidades de animais que dependem delas para alimentação e abrigo.</p> <p>Alterações na comunidade de plantas, devido a variações na temperatura do solo, podem levar a um aumento do escoamento das chuvas e, conseqüentemente, um aumento na erosão dos solos superficiais. Essa alteração aumentaria a carga de sedimentos na água de superfície ao redor de <i>Yucca Mountain</i>. Infelizmente, o impacto dessa carga de sedimentos é indeterminado.</p>
--	---	---

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

Mais uma vez os impactos radiológicos são os mais relevantes na análise. Tais impactos envolvem uma série de incertezas quanto à possibilidade de contaminação por conta da incerteza quanto às tendências químicas e físicas do tipo de material acoplado e também pela falta de conhecimento sobre os instrumentos tecnológicos que permitiriam o acesso ao material radioativo.

A análise considerou que o principal meio para os materiais radioativos e tóxicos entrarem em contato com a biosfera seria ao longo de caminhos subterrâneos. Os materiais poderiam afetar a saúde humana se a seguinte sequência de eventos ocorresse:

- Os pacotes de resíduos e os seus conteúdos forem expostos à água;
- Os radionuclídeos ou materiais tóxicos nos pacotes de resíduos se dissolverem;
- Os radionuclídeos ou materiais tóxicos forem levados até a água de um aquífero e se essa água chegar até a superfície e for usada diretamente por seres humanos.

Para avaliar os impactos de uma possível contaminação da água, foram avaliados os efeitos do uso da água num hipotético Indivíduo com Razoável Exposição Máxima (IREM).

O IREM vive no ponto mais ao sul da área controlada, que é aproximadamente 18 km ao sul do repositório. Ele consome 2 litros de água oriunda de bacias contaminadas e localizadas num raio inferior a 5 km fora do terreno do repositório.

A análise averiguou a dose de exposição anual do indivíduo e converteu para a probabilidade de um câncer fatal se desenvolver. O Departamento de Energia utilizou o modelo probabilístico do *Total System Performance Assessment – License Application* (TSPA-LA). Cada uma das simulações probabilísticas utilizou 300 valores de amostra para parâmetros incertos epistêmicos e gerou 300 ocorrências da dose individual anual em função do tempo para até 1 milhão de anos após o encerramento do repositório. O histórico das doses individuais anuais foi utilizado para determinar a média, mediana e o 95 de percentil de projeções de doses anuais a que o IREM

estaria sujeito. O modelo considerou o volume de 3,7 milhões de m<sup>3</sup> de água subterrânea para avaliar a concentração dos radionuclídeos.

Quatro cenários foram considerados na avaliação:

- Cenário nominal – inclui um único caso de modelagem que considera os processos esperados de corrosão nos escudos de gotejamento e nos pacotes de resíduos.
- Cenário com falha precoce – considera a possível falha prematura dos escudos de gotejamento e dos pacotes de resíduos devido à fabricação, defeitos de material ou manipulação inadequada dos materiais no processo de estocagem como, por exemplo, tratamento térmico inadequado.
- Cenário sísmico – analisa um possível rompimento sísmico no repositório e seu efeito sobre o desempenho do isolamento do depósito.
- Cenário ígneo – inclui características, eventos e processos que descrevem a possibilidade de que alguma atividade ígnea possa afetar o desempenho do repositório. Esse cenário inclui a modelagem nos casos de intrusão ígnea, possibilidade de que o magma (rocha fundida), na forma de um dique (cume de material), invada o repositório e interfira no desempenho do depósito. Também é analisado um caso de erupção vulcânica em que um conduto eruptivo subiria através do repositório, danificaria uma série de pacotes de resíduos e entraria em erupção na superfície.

O modelo TSPA-LA avaliou os diversos casos de modelagem separadamente para calcular as doses anuais e os impactos nas águas subterrâneas no local de consumo do IREM. Em seguida, as quantidades de desempenho de cada cenário foram combinadas e adequadas para calcular a dose de exposição total anual do IREM (Tabela 3).

**Tabela 3 - Impactos radiológicos anuais estimados para o Indivíduo com Razoável Exposição Máxima – Cenários combinados**

Período	Média		Mediana		95-percentil	
	Dose anual (mrem)	Probabilidade anual de câncer fatal	Dose anual (mrem)	Probabilidade anual de câncer fatal	Dose anual (mrem)	Probabilidade anual de câncer fatal
Até 10 mil anos	0,24	$1,4 \times 10^{-7}$	0,13	$7,7 \times 10^{-8}$	0,67	$4,0 \times 10^{-7}$
Após 10 mil anos	2,0	$1,2 \times 10^{-6}$	0,96	$5,7 \times 10^{-7}$	9,1	$5,4 \times 10^{-6}$

Fonte: DOE (2008).

Após 10 mil anos e até 1 milhão de anos, a média e a mediana da dose individual anual seriam, respectivamente, 2,0 mrem e 0,96 mrem. O valor médio estimado é de cerca de 0,3% do limite máximo definido pela EPA que permite a dose anual individual de até 350 mrem para o período pós-10 mil anos. Além disso, os valores médios e os 95-percentis também estão bem abaixo do limite.

#### 3.4. Impactos ambientais da não construção do depósito geológico de *Yucca Mountain*

Uma importante etapa no processo de análise dos impactos ambientais de *Yucca Mountain* está na avaliação da não construção do repositório. Nesse caso, dois cenários foram construídos para análise:

Cenário 1: os resíduos nucleares permanecem dispostos nos 76 depósitos de resíduos espalhados pelos Estados Unidos e tendo controle institucional. As instalações de armazenamento seriam substituídas a cada 100 anos. Elas passariam por uma grande reparação durante os primeiros 100 anos porque este cenário pressupõe que o projeto das primeiras instalações de armazenamento teria uma vida útil inferior a 100 anos. As instalações de substituição seriam construídas em terrenos adjacentes às instalações existentes.

Cenário 2: os resíduos nucleares permanecem dispostos nos 76 depósitos de resíduos espalhados pelos Estados Unidos durante os primeiros

100 anos. Após esse prazo, o cenário assume que deixaria de existir controle institucional. Portanto, após cerca de 100 anos e até 10.000 anos, os depósitos começariam a deteriorar e, eventualmente, materiais radioativos seriam liberados para o meio ambiente.

Como os impactos do Cenário 1 estão relacionados com a reconstrução das instalações de armazenamento a cada 100 anos, a estimativa do impacto para 1 milhão de anos seria uma função do valor de 10.000 anos. Em outras palavras, os impactos anuais seriam os mesmos ou até menores (por conta do decaimento radioativo). Porém, os impactos acumulados ao longo do período de milhões de anos seriam aproximadamente 100 vezes superiores aos impactos observados para o período de 10.000 anos.

No caso do Cenário 2, as estimativas são mais especulativas. A avaliação mostrou que os vasos de contenção e as instalações de armazenamento originais do combustível irradiado e dos resíduos radioativos de alto nível seriam comprometidos e a dissolução desses materiais faria com que os radionuclídeos entrassem em contato com o ambiente externo. A partir de 10.000 anos, a deterioração e dissolução dos materiais iria continuar o que aumentaria os impactos. A crescente incerteza relacionada à localização dos materiais radiológicos, às mudanças climáticas e ao grau de controle institucional ao longo desse período limita a análise quantitativa dos impactos já que inúmeros cenários poderiam ocorrer. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.



**Tabela 4 - Impactos potenciais para os Cenários 1 e 2 de não construção do repositório de *Yucca Mountain***

Tipo de Impacto	Impacto no curto prazo (100 anos)	Impacto no longo prazo (100 a 10.000 anos)	
		Cenário 1	Cenário 2
Uso da terra	Pequeno. O armazenamento continuará ocupando a mesma área.	Pequeno. O armazenamento continuará ocupando a mesma área.	Grande. Contaminação potencial de 0,04 a 0,4 km <sup>2</sup> ao redor de cada depósito.
Qualidade do ar	Pequeno. Lançamentos e exposições bem abaixo dos limites regulatórios	Pequeno. Lançamentos e exposições bem abaixo dos limites regulatórios	Pequeno. Instalações degradadas impediriam grandes emissões atmosféricas
Hidrologia	Pequeno.	Pequeno.	Grande.
Água subterrânea	Pequeno. O uso seria pequeno em comparação com outros tipos de depósito.	Pequeno. O uso seria pequeno em comparação com outros tipos de depósito.	Grande. Contaminação potencial aos redores dos depósitos.
Água de superfície	Pequeno. Poucas alterações nas taxas de escoamento e infiltração.	Pequeno. Poucas alterações nas taxas de escoamento e infiltração.	Grande. Lançamentos radiológicos e contaminação potencial das bacias hidrográficas a jusante dos depósitos.
Recursos biológicos e solo	Pequeno. O armazenamento continuará ocupando a mesma área.	Pequeno. O armazenamento continuará ocupando a mesma área.	Grande. Contaminação potencial de 0,04 a 0,4 km <sup>2</sup> ao redor de cada depósito.

Tipo de Impacto	Impacto no curto prazo (100 anos)	Impacto no longo prazo (100 a 10.000 anos)	
		Cenário 1	Cenário 2
<p>Saúde e segurança ocupacional e pública</p> <p>Público – Probabilidade da ocorrência de câncer letal no Indivíduo com Exposição Máxima</p> <p>Público – Incidência de câncer letal na população geral</p> <p>Público – Não radiológico (fatalidades ocasionadas pelas emissões)</p> <p>Trabalhadores - Incidência de câncer letal</p>	<p>0,0000052</p> <p>0,49</p> <p>Pequeno. Exposição inferior aos limites estipulados.</p> <p>24</p>	<p>0,0000016</p> <p>3,1</p> <p>Pequeno. Exposição inferior aos limites estipulados.</p> <p>15</p>	<p>Praticamente 1.</p> <p>1.000</p> <p>Moderado a grande. Crescimento significativo na emissão de substâncias tóxicas.</p> <p>Como não há trabalhadores, não há impacto.</p>

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

### 3.5. A análise ambiental de *Yucca Mountain* e a equidade intergeracional

O trabalho desenvolvido pelo Departamento de Energia americano demonstra preocupação com os efeitos a longo prazo do depósito de rejeitos nucleares. As análises consideram os impactos para o horizonte temporal de no mínimo 105 até 1 milhão de anos.

No período de construção, operação, monitoramento e fechamento do depósito (105 anos), os impactos foram considerados previsíveis e não representariam uma ameaça ao meio ambiente tendo como base os padrões de segurança definidos pela EPA. Os grandes desafios se apresentam após o fechamento do depósito, justamente quando os impactos potenciais seriam sentidos pelas gerações mais distantes.

Ressaltam-se alguns pontos do estudo que devem ser motivo de reflexão em nosso trabalho. O primeiro ponto está nas limitações científicas e incertezas relacionadas aos impactos. Conforme exposto no relatório, há uma grande incerteza relacionada aos parâmetros no período de longo prazo. Muitos parâmetros utilizados na análise não podem ser exatamente medidos ou conhecidos com a utilização de intervalo de valores. Infelizmente, o segundo prazo avaliado (de 10 mil anos) nos impossibilita averiguar a evolução dos riscos dos impactos e faz com que não seja possível avaliar as consequências do projeto para centenas de gerações que precisarão arcar com potenciais custos de uma decisão tomada na atualidade.

Algumas avaliações apresentadas tendem a minimizar as consequências no longo prazo. Um exemplo é o caso do aquecimento potencial do solo após o fechamento do repositório. A mensuração realizada pela DOE estima uma variação de temperatura no solo entre 0,2 °C e 6,0 °C e ainda afirma que essa alteração causaria impactos em espécies mais sensíveis à variação de temperatura e na comunidade de plantas. Foi averiguado que a eliminação de algumas plantas na área levaria ao aumento na erosão dos solos o que aumentaria a carga de sedimentos na água de superfície ao redor do repositório. Porém, mesmo com a falta de conhecimento sobre as consequências causadas pelo aumento da carga de sedimentos, esse critério de impactos foi considerado como baixo pelo documento.

Outro ponto de questionamento está na relação entre a probabilidade da ocorrência de um fato e o impacto dessa ocorrência. O relatório mostra que mesmo com uma taxa elevada de corrosão das barreiras de acesso, a intrusão humana só seria possível após 200 mil anos. E mesmo que a intrusão ocorra, a dose média anual estimada de uma intrusão humana 200.000 anos após o encerramento do repositório é de menos de 0,01 mrem, ou cerca de 0,003% do limite estimado pela EPA (350 mrem). A intrusão avaliada no relatório considera a ação de uma pessoa como resultado de perfuração exploratória em águas subterrâneas.

Contudo, não foi realizada uma análise do nível de exposição caso a intrusão ocorresse em períodos diferentes. Mesmo com a baixa probabilidade de ocorrência, os impactos potenciais podem ser elevados. Essa avaliação seria relevante já que não há conhecimento da evolução do tipo de equipamento utilizado em perfuração exploratória de águas subterrâneas no longo prazo. Em outras palavras, a análise atual, tendo como base os equipamentos atuais, considera que a intrusão só será possível em 200 mil anos, o que pode não ser definitivo.

Finalmente, à ausência de cálculo da incidência de fatalidade por câncer latente após o fechamento do repositório cabem questionamentos. No período de construção, operação, manutenção e fechamento do repositório, a incidência estimada é de 8 mortes por câncer da população externa ao projeto, somado aos trabalhadores diretos e indiretos, essa incidência passa a ser de 11 mortes. O relatório ressalta que, para o período de 105 anos, essa incidência é baixa. Para o período após o fechamento do repositório, a incidência não é calculada. Há somente a estimativa da probabilidade após 10 mil anos de  $1,4 \times 10^{-7}$  (DOE [b], 2008, p. 72), sem avaliação da população envolvida. Além disso, não há uma análise da incidência em diferentes períodos. Sendo assim, é preciso avaliar a equidade nesse tipo de raciocínio.

Cabe lembrar que o conceito de equidade envolve a análise da relação entre os agentes que usufruem dos benefícios gerados e os agentes que arcam com o custo para que o benefício ocorra. Conforme exposto anteriormente nesse trabalho e tendo como base o trabalho de Padilla (2002), os problemas intergeracionais são oriundos do fato de que as ações atuais determinam a capacidade econômica e ecológica que as gerações futuras

usufruirão. Convencionalmente, as externalidades são analisadas como falhas de mercado e podem ser internalizadas por uma série de instrumentos como é o caso dos impostos Pigouvianos. Nesse caso específico, não há mercado e as soluções convencionais não são válidas. Sendo assim, e conforme exposto por Padilla (2002), as análises acabam tornando necessária a inclusão de um viés moral no processo decisório.

O repositório de *Yucca Mountain* terá um período de construção, operação, monitoramento e fechamento de 105 anos. De forma geral, é possível inferir que, apesar de não terem feito parte do processo de decisão, as gerações que viverem no período ativo do repositório estarão usufruindo dos benefícios do depósito, relacionados à alocação de resíduos nucleares oriundos de variados tipos de uso, como a geração de energia elétrica e a de exames e pesquisas médicas. Essas gerações terão sido beneficiadas pelo uso do combustível nuclear que gerou os resíduos. Os resíduos gerados são consequência de ações que as beneficiaram e o depósito é uma forma de conclusão desse uso.

Porém, após o encerramento das atividades, várias gerações seguintes arcarão com o custo do depósito. Dentre eles, destaca-se a incidência de câncer consequente da existência do repositório (excluindo falhas técnicas, acidentes, invasões etc.) por causa da emissão de radionuclídeos, sem que esse dado sequer tenha sido analisado no processo de decisão. Assim, a falta de importância dada a uma variável que representa um custo de inequidade relevante para as gerações futuras reforça o viés das escolhas para o presente.

A análise aqui proposta não busca e nem tem condições de avaliar a qualidade técnica da avaliação ambiental elaborada pelo Departamento de Energia americano. O objetivo é ressaltar os desafios e limitações da análise no que diz respeito aos impactos intergeracionais do projeto. No próximo capítulo, uma análise quantitativa será realizada para o caso brasileiro com a análise das diferenças de custo para as gerações atual e futura no depósito dos rejeitos nucleares de Angra 3.

## **4. A mensuração econômica e a equidade intergeracional do Custo Ambiental da Disposição de Rejeitos Nucleares de Angra 3.**

Nesse capítulo serão analisados os impactos ambientais da disposição dos rejeitos nucleares da Usina Nuclear de Angra 3 tendo como foco o aspecto intergeracional. Cabe esclarecer que o objetivo do trabalho não é analisar os impactos ambientais das Usinas Nucleares, mas sim as externalidades causadas pela disposição dos resíduos gerados por elas.

### **4.1. Métodos e Procedimentos**

#### **4.1.1. Estudo de caso**

De acordo com a Lei nº 10.308/2001<sup>7</sup>, o projeto, a construção, a instalação e a operação dos depósitos iniciais são de responsabilidade do operador e beneficiário da autorização concedida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para a operação da unidade onde são gerados os rejeitos. Cabe a CNEN projetar, construir, instalar e operar os depósitos intermediários e finais.

A remoção de rejeitos dos depósitos iniciais para os depósitos intermediários é atribuição do operador ou proprietário da unidade nuclear, cabendo-lhe arcar com todas as despesas diretas e indiretas decorrentes e responder ainda por danos radiológicos pessoais, patrimoniais e ambientais causados durante a operação. O transporte de rejeitos dos depósitos intermediários para os depósitos finais é atribuição da CNEN, que responde ainda por eventuais danos radiológicos causados durante a operação.

Os depósitos podem ser operados por terceiros, desde que preencham os requisitos estabelecidos pela CNEN e ofereçam garantias para cobertura de eventuais indenizações por danos radiológicos. Neste caso, cabe à CNEN

---

<sup>7</sup> A Lei nº 10.308 de 20 de novembro de 2001, dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências.

fiscalizá-los em suas áreas de competência, sem prejuízo da fiscalização das atividades da empresa prevista na legislação e exercida por outros órgãos.

A seleção de locais para a disposição final de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação foi iniciada em 1978, pela CNEN. Com base em critérios adotados pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) para a disposição final de rejeitos radioativos em trincheiras, foram definidas cinco regiões de interesse e, dentre elas, foram selecionadas áreas relativamente homogêneas quanto a critérios ambientais (ecossistema, uso do solo, recursos minerais, demografia), de engenharia (relevo, hidrogeologia), sociais, institucionais e econômicos. Os rejeitos radioativos e subprodutos contendo materiais nucleares gerados ao longo dos últimos 40 anos no Brasil encontram-se armazenados em depósitos pertencentes ou supervisionados pela CNEN.

O Plano Decenal de Energia 2022, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, prevê a entrada em operação de uma Usina Nuclear no horizonte temporal da análise: Angra 3. A usina, com capacidade instalada de 1.405 MW, está prevista para entrar em operação em junho de 2018 e terá uma vida útil de 40 anos.

A usina nuclear de Angra 3 ficará localizada na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), próxima às usinas de Angra 1 (640 MW) e Angra 2 (1.350 MW)<sup>8</sup>. A CNAAA, com área aproximada de 1.250 hectares, fica situada no distrito de Cunhambebe, município de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro, a cerca de 133 km da cidade do Rio de Janeiro e 216 km da cidade de São Paulo.

O Estudo de Impacto Ambiental (2005, p. 22) de Angra 3 previa que:

O depósito inicial de Angra 3, onde serão acondicionados os embalados com os rejeitos sólidos radioativos, será localizado no Edifício Auxiliar do Reator, da mesma forma como é feito atualmente na similar Angra 2; enquanto que os rejeitos sólidos radioativos de Angra 1 são armazenados no Centro de Gerenciamento de Rejeitos - CGR, localizado em área interna à CNAAA.

---

<sup>8</sup> Informações disponíveis no sítio eletrônico da Eletronuclear: < <http://www.eletronuclear.gov.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2014

A disposição intermediária e final desses rejeitos são de responsabilidade da CNEN, cujos estudos para o projeto definitivo desses rejeitos se encontram em andamento com levantamentos preliminares já realizados por empresas com experiência internacional.

Até abril de 2014, foram construídos três Depósitos Intermediários de Rejeitos Radioativos (DIRR) na área da CNAA para recebimento dos resíduos de baixo e médio nível de radioatividade de Angra 1 e 2. Estão em operação: a Unidade I, Unidade II (A e B<sup>9</sup>) e Unidade III.

O Estudo de Impacto Ambiental da Unidade IIB do DIRR foi elaborado em 2006 (posterior ao EIA de Angra 3) e afirmava que o seu funcionamento seria até 2009 quando o depósito definitivo de resíduos estaria concluído (p. 14). Porém, não se identificaram documentos públicos oficiais com informações sobre o projeto definitivo de resíduos. Tampouco, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) se pronuncia sobre a existência e/ou andamento de tal projeto. Assim, para fins acadêmicos, este estudo considerou a atual disposição intermediária de rejeitos nucleares existente na CNAAA como uma *proxy* da disposição definitiva. No caso de Angra 3, o depósito permanecerá no Edifício Auxiliar do Reator, ou seja, um depósito próximo à superfície.

#### 4.1.2. Procedimentos de mensuração

O cálculo do custo será estruturado tendo como base as etapas propostas por Hanley e Spash (1993) para a Análise Custo-Benefício (ACB):

Etapa 1 - Definição do projeto a ser analisado.

Nessa seção será definido o que será avaliado e quais são os agentes envolvidos. Serão apresentados os dados relacionados à geração e gerenciamento dos resíduos nucleares de Angra 3 (sólidos de baixa e média radioatividade e os combustíveis nucleares irradiados). A fonte de dados é o Estudo de Impacto Ambiental de Angra 3 (ELETRONUCLEAR, 2005).

---

<sup>9</sup> A Unidade IIB é referente a uma expansão da Unidade IIA.



## Etapa 2 - Identificação dos impactos do projeto.

Essa etapa envolve a averiguação dos impactos ambientais negativos consequentes da implantação do projeto. O EIA de Angra 3 não avalia os impactos potenciais ao meio ambiente causados pela armazenagem de resíduos nucleares na área por presumir que eles serão posteriormente alocados em um depósito definitivo. Assim, para avaliação dos impactos, também serão usados como referências os critérios analisados para o caso de *Yucca Mountain* (DOE, 2008) nos cenários em que não há a construção de um depósito final centralizado e os impactos ambientais considerados no Relatório de Impacto Ambiental para as Unidade IIB do Depósito Intermediário de Rejeitos Radioativos (ELETRONUCLEAR, 2006).

## Etapa 3 - Definição dos impactos economicamente relevantes.

Com base nas informações analisadas, serão definidos os impactos ambientais negativos que alteram o bem-estar social dos agentes envolvidos.

## Etapa 4 - Quantificação física dos impactos relevantes.

Nessa etapa, será realizada a determinação física dos impactos e o momento de ocorrência. Para a quantificação da incidência de câncer oriunda do depósito de rejeitos nucleares, dois períodos diferentes serão considerados: operação do depósito e pós fechamento do depósito. Nessa etapa, será considerado o estudo realizado por Menzel (2014) sobre a incidência anual de câncer fatal causada pelo funcionamento da Usina Nuclear de Angra 3. Durante o funcionamento do depósito, devido à ausência de dados sobre a incidência de câncer, o valor utilizado será similar ao daquele do funcionamento da Usina. Para o período de monitoramento do depósito, será considerada a fatalidade anual por câncer calculada para uma pessoa adulta pelo trabalho de Aguiar (2006). O trabalho de Aguiar mostra que a incidência de câncer fatal é decrescente ao longo do tempo. Assim, iremos considerar uma incidência constante durante a operação do depósito e decrescente com o fechamento, já que não há aumento no estoque depositado.

Para o caso de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários, iremos considerar a mesma taxa de decrescimento, já que tais critérios não foram avaliados para o período de monitoramento do depósito.

Etapa 5 - Valoração dos efeitos relevantes.

Nessa etapa será realizada a valoração monetária dos impactos físicos previamente definidos. A *International Atomic Energy Agency*, por meio do programa *Simpacts*, estima o valor econômico unitário dos impactos radioativos à saúde humana (MENZEL, 2014). Para conversão e atualização dos valores serão utilizados os dados do Banco Central do Brasil (2000, 2014) e da Fundação Getúlio Vargas (2014).

Etapa 6 - Desconto dos fluxos.

Essa etapa envolve a aplicação da taxa de desconto aos valores monetários dos custos para trazê-los ao valor presente (Valor Presente Líquido – VPL).

O VPL, de acordo com Contador (2000), é a “soma algébrica dos valores de fluxo de um projeto atualizados à taxa ou taxas adequadas de desconto”. O cálculo ocorre da seguinte forma:

$$\begin{aligned} VPL &= F_0 + \frac{F_i}{(1+r_i)^{t_i}} + \frac{F_{i+1}}{(1+r_i)^{t_i}(1+r_{i+1})^{t_{i+1}}} \\ &+ \frac{F_{i+2}}{(1+r_i)^{t_i}(1+r_{i+1})^{t_{i+1}}(1+r_{i+2})^{t_{i+2}}} + \dots + \frac{F_j}{\prod_i^j (1+r_i)^{t_j}} \\ VPL &= F_0 + \sum_i^j \frac{F_i}{\prod_i^j (1+r_i)^{t_i}} \end{aligned} \quad (6)$$

Em que  $F_i$  representa o fluxo líquido no período  $t_i$ , a taxa de desconto em  $t_i$  é representada por  $r_i$ ,  $\prod$  representa o produto das parcelas,  $\sum$  o somatório, os períodos de análise variam entre  $i$  e  $j$ .

Contudo, nesta dissertação será analisado somente o valor presente dos custos, já que não será feita a análise dos benefícios.

Será aplicada a taxa de desconto adotada no planejamento do setor elétrico. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2014), a taxa de desconto do setor é de 12%.

Etapa 7 - Análise de sensibilidade.

Na análise de sensibilidade será avaliado o aspecto intergeracional da taxa de desconto. Com esse intuito, os custos ambientais serão inicialmente distribuídos no horizonte temporal com a taxa de desconto padrão de mercado e novamente com a taxa de desconto da Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente, conforme discutido no Capítulo 2:

$$\rho = \delta + \eta\mu_g - 0,5\eta^2\sigma_g^2 - 0,5\eta^2\sigma_g^2(t/n) \quad (4)$$

Onde:

$\rho$ : taxa de desconto social.

$\delta$ : probabilidade das futuras gerações não existirem.

$\eta$ : aversão à inequidade intertemporal.

$\mu_g$ : média da taxa de crescimento do consumo.

$\sigma_g^2$ : variância da taxa de crescimento do consumo.

t: período analisado

n: tamanho da amostra

A variável  $\delta$  foi estimada por Stern (2006) como 0,1% ao ano.

Conforme exposto por Arrow *et al.* (1996), o valor de  $\eta$  pode ser medido pelas decisões que a sociedade toma com o intuito de dividir a renda, como é o caso de modelos tributários progressivos. Os autores ainda afirmam que a disposição à redistribuição de renda dentro de um país é similar à redistribuição entre países e ao longo do tempo. A definição de  $\eta$  terá como base o trabalho de Tol (2010), que estimou a aversão à desigualdade internacional no consumo como expressa na ajuda ao desenvolvimento dada pelos países ricos aos países pobres entre 1965 e 2005. O valor encontrado foi de 0,7.

Para calcular a média e o desvio padrão da taxa de crescimento do consumo, iremos considerar a variação real das famílias entre 1993 e 2013 (IPEADATA, 2014).

Uma análise complementar será incluída, com a avaliação do custo ambiental mediante a aplicação da taxa de desconto igual a zero.

#### 4.1.3. Premissas adotadas

Para a realização da análise dos impactos ambientais, quatro premissas foram adotadas:

- Premissa 1: A disposição dos rejeitos de Angra 3 permanecerá na área do CNAAA.
- Premissa 2: O edifício para a disposição dos rejeitos terá dimensões apropriadas para a alocação de todos os resíduos gerados na vida útil de Angra 3.
- Premissa 3: O edifício para a disposição dos rejeitos terá edificações resistentes para a alocação dos resíduos durante o período de 100 anos (conforme referência apresentada no capítulo anterior) e terá os materiais realocados em uma nova estrutura sem incidentes prejudiciais ao meio ambiente.
- Premissa 4: O depósito ficará sob a administração de um órgão responsável (como o CNEN) mesmo após o encerramento das atividades do CNAAA até o prazo necessário para o encerramento das atividades do depósito (na análise definido como 10.000 anos).

Foi considerado pertinente definir premissas que garantissem uma situação responsável e controlada para o depósito de rejeitos nucleares, já que instrumentos de monitoramento permitiriam a adoção de políticas que viabilizassem uma estrutura de depósito segura e adequada. Contudo, é importante ressaltar que tais premissas tornam a análise otimista quanto à capacidade de gestão e planejamento do depósito dos resíduos nucleares.

A premissa 3, por exemplo, é relevante já que ainda não há clareza sobre a durabilidade dos materiais utilizados no isolamento de resíduos nucleares. Os Depósitos Intermediários de Rejeitos Radioativos presentes na CNAA são feitos de cimento. Contudo, trabalho realizado em 2013 pela IAEA sobre o comportamento de materiais a base de cimento em depósitos de longo prazo mostra que, apesar de notória a existência de um prazo para o início de corrosões nesse tipo de material, os processos interativos de degradação do

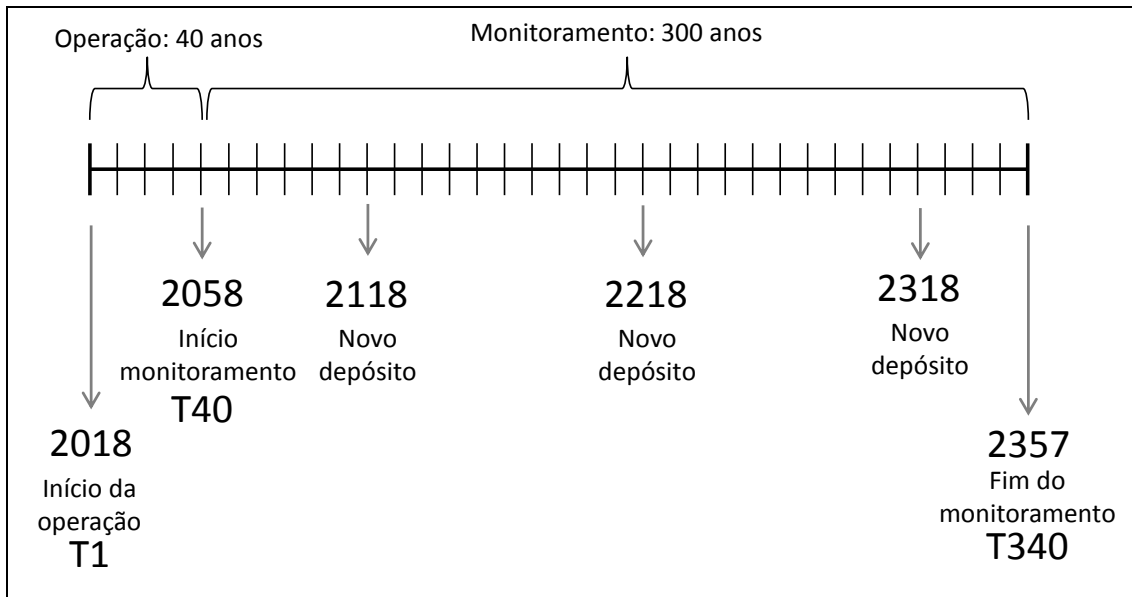
material ainda não são claros. Além disso, o local de disposição pode impor restrições específicas na evolução do desempenho da barreira no longo prazo.

Dessa forma, é possível avaliar o impacto ambiental simplesmente associado à manutenção de resíduos nucleares durante séculos sem interferências indevidas ou imprecisas que pudessem potencializar os impactos. Os impactos aqui citados estariam subestimados e não considerariam os riscos de que alguma(s) das premissas não seja(m) atendida(s), já que as premissas adotadas são otimistas.

#### 4.1.4. Período de análise

De acordo com a *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 1999), os depósitos finais de resíduos nucleares precisam de acompanhamento ativo também no período após o encerramento das atividades (conforme avaliação apresentada no Capítulo 3). O acompanhamento ativo tem o intuito de poder gerar interferências (monitoramento e remediação) para sanar ou amenizar eventuais impactos gerados. A IAEA (2002) sugere que esse acompanhamento institucional seja realizado durante 300 anos, período equivalente a 10 meias-vidas de alguns importantes rejeitos de médias e baixas atividades como o Césio e o Estrôncio.

Dessa forma, o período de análise do depósito será de 2018 (início da operação de Angra 3) até o ano 2358, com encerramento das atividades em 2058. A Figura 3 mostra o horizonte temporal com o momento de análise (Ti) e a equivalência com o ano corrente e os principais eventos considerados na análise.



Fonte: Elaboração própria.

**Figura 3 - Horizonte temporal de análise do depósito de rejeitos nucleares**

#### 4.2. ACB - Etapa 1: Geração e o gerenciamento dos resíduos nucleares na Usina Nuclear de Angra 3 que necessitam de armazenamento

##### 4.2.1. Geração e gerenciamento dos rejeitos sólidos

Os rejeitos sólidos de baixo e médio nível de radioatividade produzidos durante a operação da Usina de Angra 3 são classificados como:

- Concentrado do Evaporador (CE): são rejeitos frutos dos sistemas de tratamento de efluentes líquidos radioativos das usinas. O rejeito é solidificado em betume.
- Resina do Primário (RP): é a resina utilizada na purificação do sistema de refrigeração do reator. O rejeito é misturado em betume para solidificação do conteúdo.
- Filtro (F): são equipamentos usados nos sistemas de purificação e tratamento do refrigerante do reator. São imobilizados em betume.

- Rejeito Compactado (RC): são materiais triturados e compactados por prensa hidráulica. Os rejeitos são constituídos de materiais plásticos, papéis, luvas, sapatilhas, roupas e etc.
- Rejeito Não Compactado (RNC): são materiais compressíveis como o caso de peças, tubos, materiais metálicos e etc. Os rejeitos são imobilizados em betume.

Antes de serem enviados para os depósitos iniciais, os rejeitos são estocados temporariamente na Estação de Encapsulamento inicial dentro da área controlada. Esta tem por função encerrar completamente os conteúdos radioativos em embalagens apropriadas, para garantir assim seu isolamento do meio ambiente, bem como para evitar choques mecânicos.

Os materiais compactáveis, ao serem encapsulados, são prensados antes do fechamento das embalagens, para redução de volume. Os materiais compactáveis, inclusive filtros, são imobilizados em seus recipientes. As trocas de filtros ocorrerão através de equipamentos mecânicos, a exemplo do que já ocorre em Angra 2. Os demais tipos de rejeitos (concentrado do evaporador, resinas do circuito primário) são encapsulados em matriz de betume para garantir solidificação e imobilização do conteúdo.

Após o encapsulamento e contabilização, os embalados produzidos aguardam na Estação de Encapsulamento a transferência para o depósito inicial, localizado no próprio Prédio Auxiliar do Reator.

De acordo com o Estudo de Impacto Ambiental da Usina Nuclear de Angra 3 (ELETRONUCLEAR, 2005), serão produzidos anualmente cerca de 129 tambores de rejeitos nucleares sólidos de baixo e médio nível de radioatividade (Tabela 5).

**Tabela 5 - Estimativa de produção de rejeitos sólidos de baixo e médio nível de radioatividade em Angra 3**

Tipo de rejeito	Concentração (Bq/m <sup>3</sup> )	Volume anual (m <sup>3</sup> )	Volume vida útil (m <sup>3</sup> )
Compactáveis	3,7 x 10 <sup>8</sup> a 3,7 x 10 <sup>9</sup>	6,0	240,0
Não compactáveis	3,7 x 10 <sup>8</sup> a 3,85 x 10 <sup>11</sup>	2,0	80,0
Concentrados do evaporador	3,7 x 10 <sup>9</sup> a 1,85 x 10 <sup>11</sup>	7,2	288,0
Resinas	3,7 x 10 <sup>11</sup> a 1,48 x 10 <sup>13</sup>	9,6	384,0
Filtro	3,7 x 10 <sup>10</sup> a 1,85 x 10 <sup>12</sup>	1,0	40,0
Total	-	25,8	1.032,0

Fonte: Elaboração própria com dados da Eletronuclear (2005).

#### 4.2.2. Geração e gerenciamento dos combustíveis nucleares irradiados

O combustível irradiado oriundo do funcionamento da Usina Nuclear de Angra 3 contém cerca de 30 diferentes elementos químicos e mais de 100 isótopos diferentes. A Tabela 6 apresenta as radioatividades (em Bq/EC) e as taxas de dose correspondentes a 1 elemento combustível de reator tipo PWR submetido a uma “queima” (*burn-up*) média de 33.000 MWd/t de urânio (U), removido do núcleo desse reator. A radioatividade sofre sensível redução com o passar dos anos, como também a taxa de dose na superfície do elemento combustível.



**Tabela 6 - Redução da Radioatividade e da Taxa de Dose de Superfície de um Elemento Combustível (EC) Irrradiado removido do Núcleo de um Reator do Tipo PWR, submetido a uma “queima” de 33.000 MWd/t de U.**

Tempo (anos)	Radioatividade (Bq/EC)	Taxa de dose na superfície (Sv/h)
1	$9,25 \times 10^{16}$	2.340
5	$2,22 \times 10^{16}$	468
10	$1,48 \times 10^{16}$	234
50	$3,70 \times 10^{15}$	86,4
100	$1,85 \times 10^{15}$	21,5
500	$9,25 \times 10^{13}$	0,58
1.000	$6,29 \times 10^{13}$	0,0096
5.000	$2,22 \times 10^{13}$	0,025
100.000	$1,66 \times 10^{13}$	0,018

Fonte: Eletronuclear (2005).

A usina de Angra 3 tem uma vida operacional prevista para 40 anos, com *burn-up* entre 30.000 MWd/t e 40.000 MWd/t de urânio (U). A Tabela 7 apresenta a estimativa das quantidades de urânio e plutônio acumuladas nos elementos combustíveis durante a operação da usina como referência para as quantidades desses materiais nos elementos combustíveis irradiados.

Os elementos combustíveis são utilizados no núcleo do reator por um período de aproximadamente três anos, sendo 1/3 deles anualmente transferidos para uma piscina situada dentro do envoltório de contenção.

**Tabela 7 - Estimativa das quantidades de urânio e plutônio a serem acumulados após 40 anos de operação de um reator do tipo de Angra 3**

Material	Acúmulo em 40 anos (kg)
Urânio 235	10.880
Plutônio Total	12.640

Fonte: Eletronuclear (2005).

#### 4.3. ACB - Etapa 2: Os impactos ambientais da disposição hipotética dos resíduos da Usina Nuclear de Angra 3

##### 4.3.1. Áreas de influência do depósito hipotético

A Área de Influência Indireta (All) definida no Estudo de Impacto Ambiental da Usina Nuclear de Angra 3 (ELETRONUCLEAR, 2005) e reproduzida para o depósito hipotético foi estipulada como a área limitada por uma circunferência de raio de 50 km a partir da localização da usina. A All abrangeu parcialmente ou totalmente a área de 14 municípios, pertencentes aos Estados do Rio de Janeiro e de São Paulo: Ubatuba, Cunha, Lorena, Silveiras, Areias, São José do Barreiro, Araperi e Bananal, integrantes da mesorregião Vale do Paraíba, e Parati, Angra dos Reis, Mangaratiba, Rio Claro, Barra Mansa e Resende, pertencentes à mesorregião Sul Fluminense.

A Área de Influência Direta (AID) considerada apresentou um raio de 15 km e abrangeu os distritos de Angra dos Reis, Mambucaba, Cunhambebe e Tarituba, situados nos municípios de Angra dos Reis e Parati, no Estado do Rio de Janeiro. Para os estudos do meio físico, a AID-15 km foi estendida até as cabeceiras das bacias hidrográficas cortadas pelo círculo imaginário de raio 15 km.

#### 4.3.2. Impactos ambientais da construção, operação, fechamento e reposição do depósito final hipotético

##### 4.3.2.1. Impactos do uso da terra

Como a área utilizada é a mesma da usina nuclear de Angra 3, não haveria impactos adicionais ao uso da terra.

##### 4.3.2.2. Impactos na qualidade do ar

Conforme apresentado no EIA de Angra 3 (ELETRONUCLEAR, 2005) e na análise ambiental de *Yucca Mountain* (DOE, 2008), depósitos de resíduos nucleares (se adequados) não apresentam impactos na qualidade do ar.

##### 4.3.2.3. Hidrologia

O EIA de Angra 3 (ELETRONUCLEAR, 2005) indica que a atividade pode gerar variações na temperatura da água de até 8,3 °C. Contudo, o aumento médio de temperatura não causaria alterações significativas à temperatura global do corpo receptor. Como o depósito hipotético estará na superfície, pode-se inferir que não causaria impactos ao sistema hidrológico da região, com exceção de casos de vazamento, hipótese excluída pela Premissa 3.

##### 4.3.2.4. Recursos biológicos e solo

As análises apresentadas para *Yucca Mountain* e para Angra 3 mostram que a presença de resíduos nucleares não causa impactos aos recursos biológicos e ao solo caso não haja vazamento. No caso específico da área de Angra 3, não haveria impacto no meio marinho.

##### 4.3.2.5. Impactos radiológicos

Conforme apresentado no Capítulo 3 e reforçado por Aguiar (2006), a principal forma de contaminação humana seria por meio de infiltração de água e migração da água contaminada redirecionada para consumo humano. A contaminação radiológica ocorre por conta de falhas nas barreiras do sistema

repositório. Tais falhas são prováveis de se concretizarem devido ao longo prazo de manutenção dos resíduos.

#### 4.4. ACB - Etapa 3: Impactos economicamente relevantes

Com base nas informações anteriormente apresentadas, o principal impacto econômico potencialmente relevante é efeito da contaminação radiológica por conta da ameaça à vida humana. A liberação de radionuclídeos e consequente consumo humano contribuem para a incidência de câncer. Assim, conforme apresentado na análise ambiental de *Yucca Mountain* e na tese de Aguiar (2006), a avaliação da probabilidade de fatalidade por câncer latente é um aspecto relevante na avaliação dos impactos ambientais.

#### 4.5. ACB - Etapas 4 e 5: Quantificação e mensuração econômica dos impactos ambientais da disposição de resíduos das Usinas Nucleares de Angra 3

##### 4.5.1. Impactos radiológicos

Conforme exposto anteriormente, para a quantificação e mensuração econômica da incidência de câncer oriunda do depósito de rejeitos nucleares, dois períodos diferentes serão considerados: operação do depósito e pós fechamento do depósito.

De acordo com Menzel (2014), a incidência anual de câncer fatal causada pelo funcionamento da Usina Nuclear de Angra 3<sup>10</sup> seria de  $4,19 \times 10^{-3}$  unidade. A incidência anual de câncer não fatal e de efeitos severos não hereditários seria similar e de  $8,38 \times 10^{-4}$  unidade (Tabela 8). Durante o funcionamento do depósito (T<sub>1</sub> a T<sub>40</sub>), devido à ausência de dados sobre a incidência de câncer, o valor utilizado será similar ao daquele do funcionamento da Usina.

---

<sup>10</sup> O trabalho foi desenvolvido com base no Programa *Simpacts* que estima e quantifica os custos do dano ambiental à saúde ocasionados por diferentes formas de geração de energia elétrica. O programa é desenvolvido e gerido pela *International Atomic Energy Agency*.

**Tabela 8 - Impactos radiológicos à saúde da população durante a operação do depósito**

Impacto à saúde	Incidência (casos/ano)
Câncer fatal	$4,19 \times 10^{-3}$
Câncer não fatal	$8,38 \times 10^{-4}$
Efeitos severos hereditários	$8,38 \times 10^{-4}$

Fonte: MENZEL (2014).

Para o período de monitoramento do depósito, será considerada a fatalidade anual por câncer calculada para uma pessoa adulta pelo trabalho de Aguiar (2006). De acordo com a autora, a fatalidade anual por câncer no fim do monitoramento do depósito ( $T_{340}$ ) seria de  $3,25 \times 10^{-14}$ . O trabalho de Aguiar mostra que a incidência de câncer fatal é decrescente ao longo do tempo. Assim, iremos considerar uma incidência constante durante a operação do depósito e decrescente com o fechamento já que não há aumento no estoque depositado.

De forma simplificada, iremos considerar que a queda na incidência será linear de  $4,19 \times 10^{-3}$  no momento  $T_{40}$  a  $3,25 \times 10^{-14}$  no momento  $T_{340}$ . Assim, a taxa anual de queda na incidência será de  $1,40 \times 10^{-5}$ .

Para o caso de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários, iremos considerar a mesma taxa de decrescimento, já que tais critérios não foram avaliados para o período de monitoramento do depósito. Nesse caso, a incidência anual de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários seriam nulas a partir de  $T_{101}$ . Os dados anuais para a incidência de fatalidade por câncer, incidência de câncer não fatal e incidência de efeitos severos hereditários estão apresentados no Apêndice C.

A *International Atomic Energy Agency*, por meio do programa *Simpacts*, estima o valor econômico unitário dos impactos radioativos à saúde humana (MENZEL, 2014). No caso do Brasil, os valores econômicos unitários para o ano 2000 estão descritos na Tabela 9.

**Tabela 9 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em US\$ do ano 2000**

Impacto à saúde	Custo econômico unitário (US\$ do ano 2000)
Câncer fatal	329.355,61
Câncer não fatal	110.023,87
Efeitos severos hereditários	330.548,93

Fonte: MENZEL (2014).

Para atualizar os valores até o início da operação do depósito, iremos converter os valores para reais do ano 2000 e então atualizá-los com base na inflação observada e projetada. A taxa de câmbio anual média do ano 2000 estimada pelo Banco Central (2014) foi de 1,89 R\$/US\$. Assim, a Tabela 10 mostra o custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2000.

**Tabela 10 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2000**

Impacto à saúde	Custo econômico unitário (R\$ do ano 2000)
Câncer fatal	602.525,89
Câncer não fatal	201.278,58
Efeitos severos hereditários	604.708,96

Fonte: Elaboração própria com dados de Menzel (2014) e Banco Central do Brasil (2014).

No processo de atualização e projeção dos custos econômicos anuais até 2018 (início do projeto), foram considerados os seguintes indicadores:

- Período 2000-2013: Inflação anual medida pelo IGP-M da Fundação Getúlio Vargas.
- Período 2014-2016: Projeção realizada pelo Banco Central do Brasil no Relatório de Inflação de março de 2014.

A projeção da inflação para o longo prazo exige complexas modelagens e o uso de programas computacionais. A título de simplificação, iremos estimar um intervalo de confiança para a média da amostra e a iremos aplicar para os anos de 2017 e 2018. Um Intervalo de confiança proporciona um intervalo de valores, de acordo com uma amostra, no qual julgamos, com um risco conhecido de erro, estar o parâmetro da população.

A Tabela 11 apresenta o histórico da inflação de 1995 a 2013 com a projeção do Banco Central (2014) para o período de 2014-2016. O cálculo do intervalo de confiança irá considerar os dados disponíveis a partir de 1995 por se tratar do ano em que uma maior estabilização da inflação foi observada.

**Tabela 11 - Inflação observada e projetada no Brasil (1995-2016)**

Ano	Inflação*
1995	0,152
1996	0,092
1997	0,077
1998	0,018
1999	0,201
2000	0,100
2001	0,104
2002	0,253
2003	0,087
2004	0,124
2005	0,012
2006	0,038
2007	0,078
2008	0,098
2009	-0,017

2010	0,113
2011	0,051
2012	0,078
2013	0,055
2014	0,062
2015	0,055
2016	0,052

Fonte: Elaboração própria com dados da FGV (2014) e do Banco Central do Brasil (2014).

\* Entre 2014 e 2016, projeção do Banco Central do Brasil.

Por se tratar de uma amostra pequena (menos de 30 elementos) e por não conhecermos o desvio-padrão populacional, iremos adotar a distribuição t-student. A Tabela 12 mostra os resultados. Para os próximos anos, temos 90% de chance da inflação variar entre 6,34% e 10,78%. Na aplicação da inflação no longo prazo, iremos considerar a média desses valores: 0,0856 (Tabela 12).

**Tabela 12 - Intervalo de confiança para a inflação brasileira com 90% de confiança**

Critério	Valor
Elementos (n)	22
Média ( $\bar{X}$ )	0,085622
Desvio padrão (S)	0,060375
Intervalo de confiança	90%
Nível de confiança ( $\alpha$ )	10%
Grau de liberdade (n-1)	21
Distribuição t	1,72074
Resultado	$[0,0634 < \mu < 0,1078]_{90\%}$

Fonte: Elaboração própria.



Com as devidas atualizações de valor, o custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2018 seria de R\$ 2.301.095,93 para o caso de incidência de câncer fatal, R\$ 768.699,44 para a incidência de câncer não fatal e R\$ 2.309.433,23 nos casos de efeitos severos hereditários (Tabela 13).

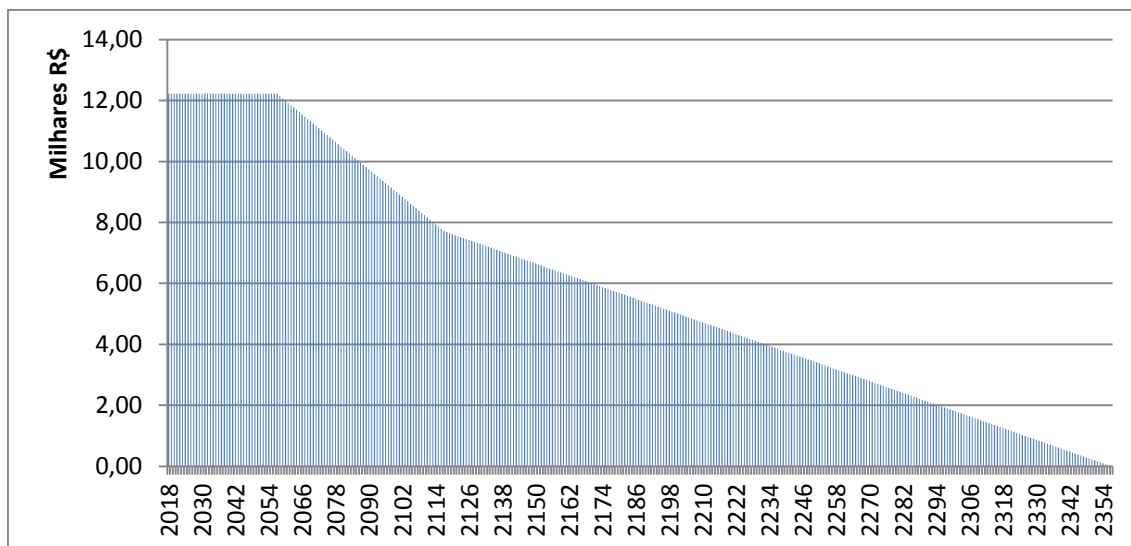
**Tabela 13 - Custo econômico unitário dos impactos à saúde em Reais do ano 2018**

Impacto à saúde	Custo econômico unitário (R\$ do ano 2018)
Câncer fatal	2.301.095,93
Câncer não fatal	768.699,44
Efeitos severos hereditários	2.309.433,23

Fonte: Elaboração própria com dados de Menzel (2014) e Banco Central do Brasil (2014).

O Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 1 apresenta o histórico dos custos econômicos anuais da incidência de fatalidade por câncer, incidência de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários para valores de 2018. A queda na incidência de radionuclídeos e conseqüentemente, queda nas incidências de fatalidade por câncer, câncer não fatal e de efeitos severos hereditários reduz significativamente o custo ambiental.



Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 1- Custo econômico anual em Reais de 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários)**

#### 4.6. ACB - Etapas 6 e 7: A equidade intergeracional e os custos ambientais da disposição de resíduos da Usina Nuclear de Angra 3

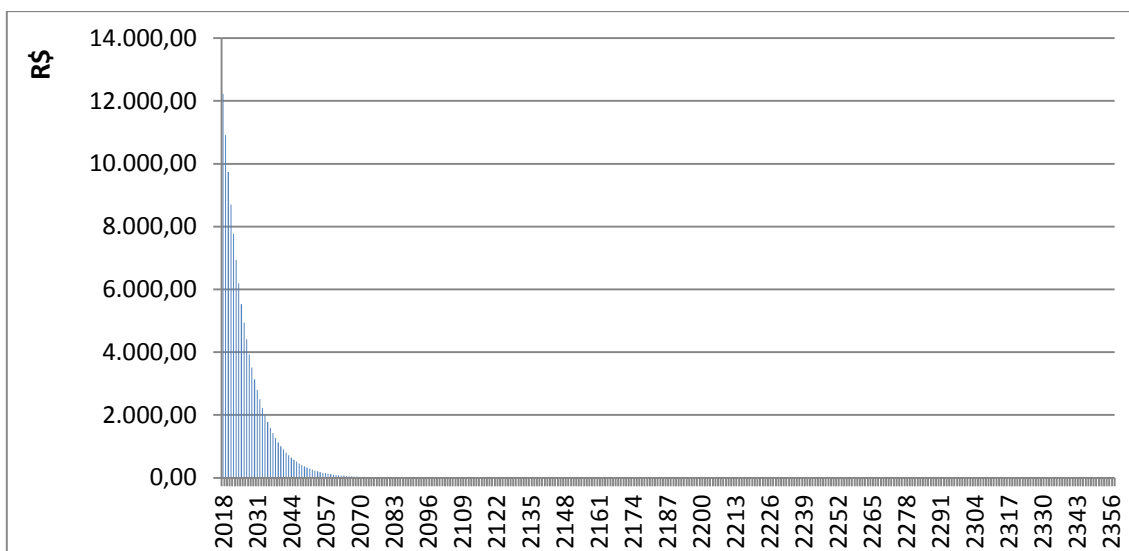
##### 4.6.1. A taxa de desconto de mercado

A taxa de desconto adotada no planejamento do setor elétrico é de 12% ao ano de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica. Contudo, a taxa não é atualizada desde a década de 1990 e foi acatada a sugestão de revisão durante a audiência pública nº 86 de agosto de 2013. A nova taxa de desconto a ser adotada pelo setor ainda não foi definida. Assim, iremos adotar a última vigente (12% a.a.).

Com a adoção da taxa real de desconto de 12% a.a., o Custo Presente Total calculado para 2018 (início do empreendimento) por conta da incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários foi de R\$ 113.993,00. O Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 2** apresenta a distribuição anual do custo descontado.

Com a aplicação da taxa de desconto de mercado, a partir do período 125 (equivalente ao ano 2143), o custo ambiental da saúde ao ser humano se torna igual a zero. Considerando que uma nova geração surge a cada 25 anos, o custo do depósito de resíduos nucleares se tornaria nulo a partir da 5ª geração.



Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 2 - Custo econômico anual descontado com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários)**

#### 4.6.2. A taxa de desconto da Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente

Para a definição da taxa de desconto que limitaria o viés pelo presente característico do processo de desconto, iremos aplicar a Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente. Conforme apresentado no Capítulo 2, a fórmula é a seguinte:

$$\rho = \delta + \eta\mu_g - 0,5\eta^2\sigma_g^2 - 0,5\eta^2\sigma_g^2(t/n) \quad (4)$$

Para calcular a média e o desvio padrão da taxa de crescimento do consumo, iremos considerar a variação real de consumo das famílias entre 1993 e 2013 (IPEADATA, 2014).

**Tabela 14 – Resumo estatístico da estimativa da taxa de crescimento do consumo das famílias**

Variável	Valor
Tamanho da amostra (n – anos)	21
Média amostral da taxa de crescimento ( $\bar{X}$ )	3,7418
Desvio padrão da amostra da taxa de crescimento (S)	2,5341
Variância da amostra da taxa de crescimento (S <sup>2</sup> )	6,4216

Fonte: Elaboração própria.

Com base na Tabela 14 e nos demais parâmetros citados, a Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente ficará:

$$\rho = 0,1 + 0,7 \times 3,7418 - 0,5 \times 0,7^2 \times 6,4216 - 0,5 \times 0,7^2 \times 6,4216(t/21)$$

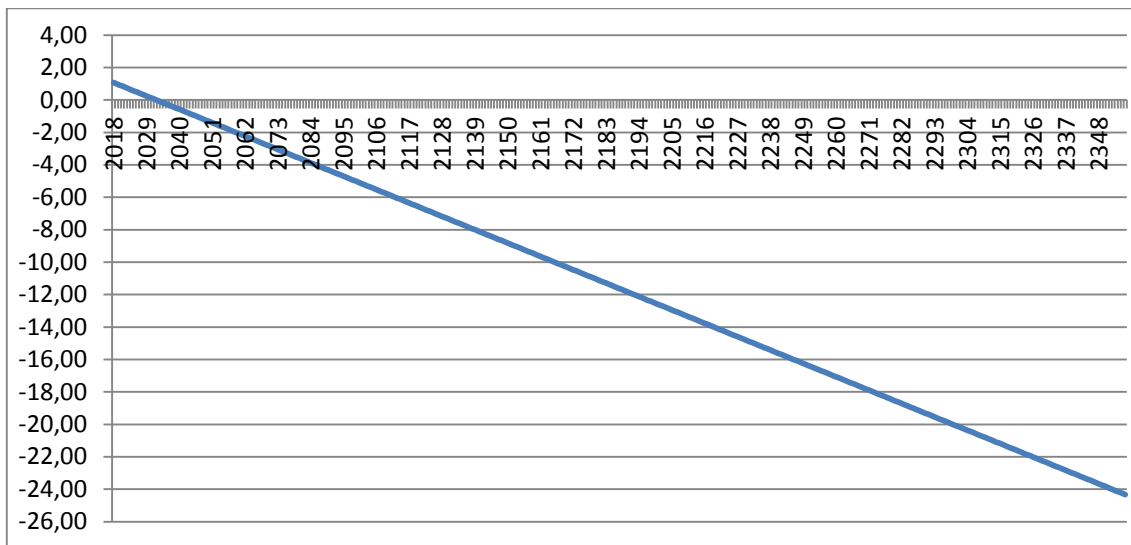
$$\rho = 1,1460 - 1,5733(t/21)$$

O Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 3 apresenta a evolução da taxa de desconto. Observa-se que o valor inicial da taxa é de 1,07 e se torna negativo a partir do ano 2033. Para o cálculo do valor presente do custo econômico dos impactos à saúde do resíduo nuclear de Angra 3, iremos considerar uma taxa de desconto igual a zero a partir desse período.

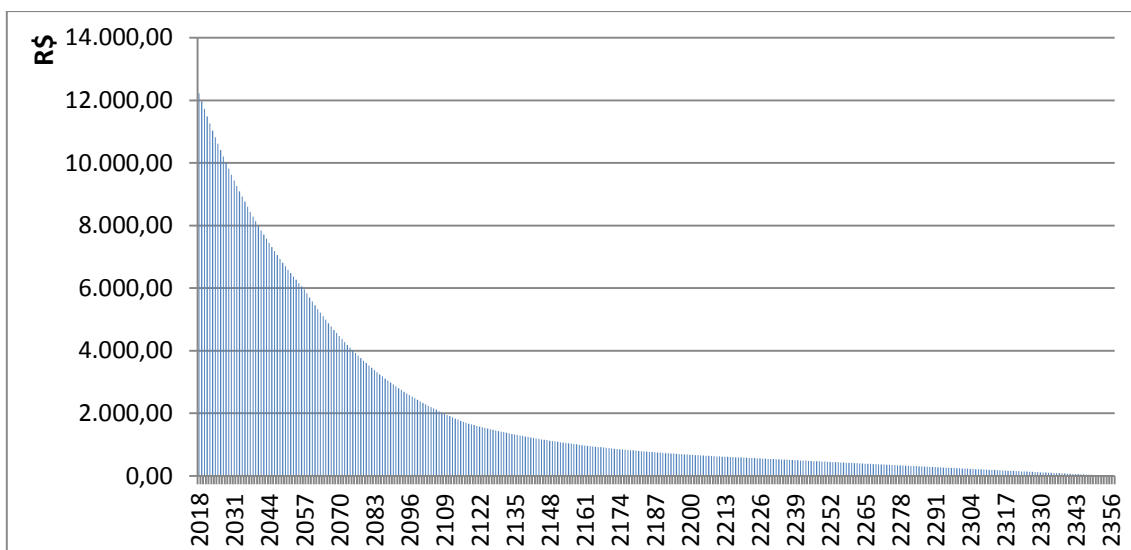
O cálculo do custo ambiental relacionado à incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários por meio da taxa de desconto da Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente totalizou R\$ 1.872.995,29 em valor presente de 2018 (período: 2018 a 2356). O Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 4 mostra a evolução do valor presente anual descontado para 2018.



Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 3 - Evolução da taxa de desconto calculada pela Fórmula de Ramsey estendida de segurança-equivalente**



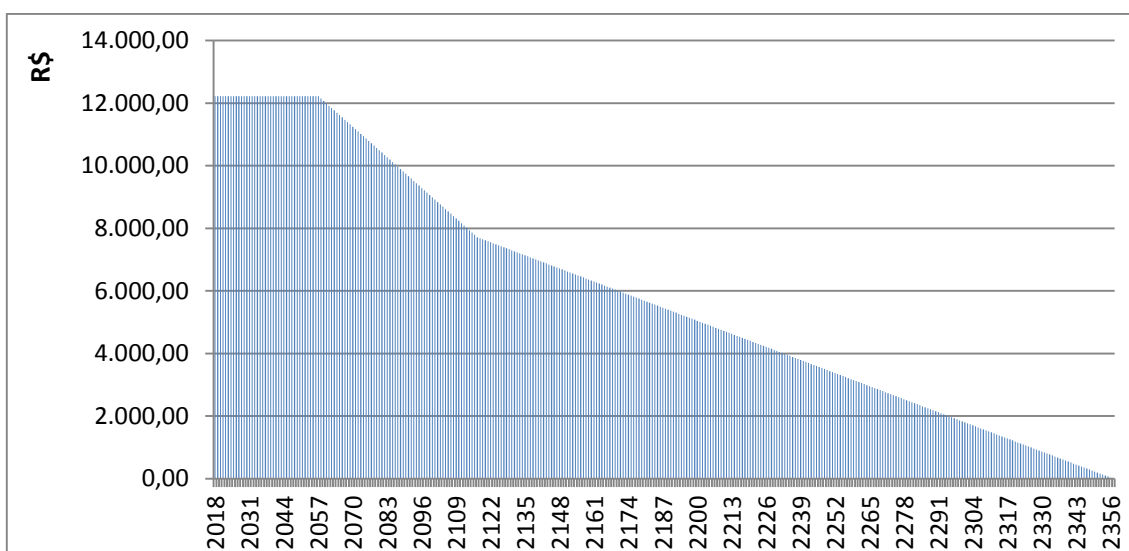
Fonte: Elaboração própria.

**Gráfico 4 - Custo econômico anual descontado pela Fórmula de Ramsey estendida de segurança equivalente com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários)**

#### 4.6.3. A taxa de desconto nula

De acordo com alguns autores, como Ciriary-Wantrup (1942), a taxa de desconto igual a zero seria aquela que garantiria o tratamento equitativo entre as gerações. Essa abordagem tem como foco os impactos ecológicos dos projetos em detrimento das relações econômicas associadas à alocação de recursos para investimentos. O custo de oportunidade do capital, o crescimento potencial de consumo e as preferências da sociedade não são incluídas nesse método.

Com taxa de desconto igual a zero, o cálculo do custo ambiental relacionado à incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários totalizou R\$ 2.006.355,20 em valor presente de 2018 (período: 2018 a 2356). O Gráfico 5 mostra a evolução do valor presente anual descontado para 2018.



Fonte: Elaboração própria.

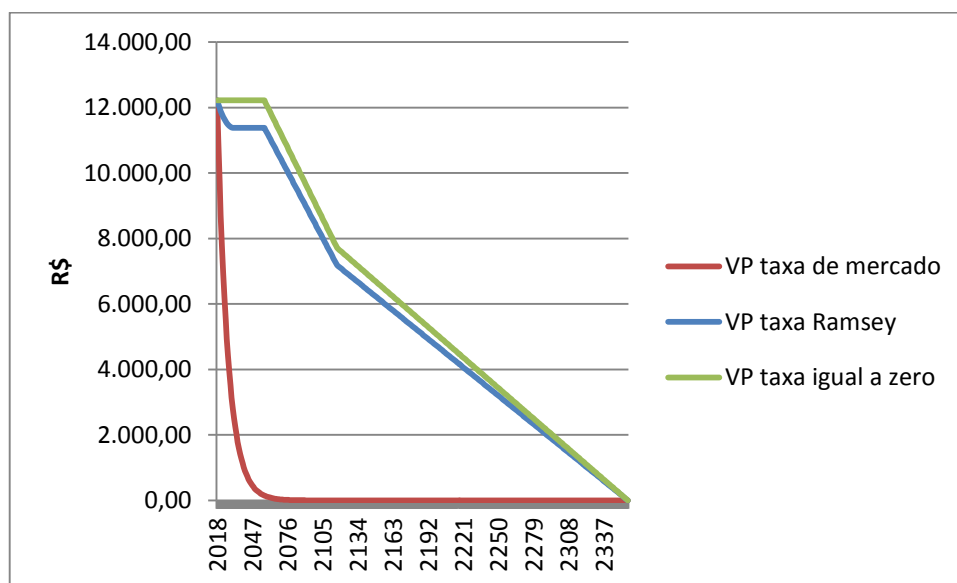
**Gráfico 5 - Custo econômico anual com taxa de desconto igual a zero com valores de mercado para 2018 (incidência de fatalidade por câncer, de câncer não fatal e de efeitos severos hereditários)**

#### 4.6.4. A mensuração do custo ambiental e a equidade intergeracional

A comparação entre os três valores descontados ressalta a influência da equidade intergeracional na análise de projetos. O valor presente para 2018 calculado com a taxa de desconto de mercado foi de R\$ 113.993,00. Na mensuração com a taxa de desconto definida pela Fórmula de Ramsey, o valor

presente chegou a R\$ 1.872.995,29. Já na análise com a taxa de desconto igual a zero, o valor presente alcançou R\$ 2.006.355,20.

O aspecto intergeracional contribuiu para que o valor do custo fosse quase 18 vezes superior ao avaliado pela taxa de desconto do mercado. O Gráfico 6 mostra a comparação anual dos valores mensurados pelas três taxas de desconto.



**Gráfico 6 - Valor Presente calculado pela taxa de desconto definida pelo mercado, pela Fórmula de Ramsey e com taxa de desconto igual a zero**

Como podemos observar, a mensuração do custo ambiental dos danos à saúde humana, quando calculada com a taxa de desconto estimada pela Fórmula de Ramsey, abrange de forma não nula a totalidade dos anos analisados. Assim, o custo gerado no longo prazo, mesmo que pequeno em valores monetários, é considerado no presente e pode influenciar a adoção de um projeto.

Apesar de apresentar um tratamento mais equitativo, a taxa de desconto igual a zero não considera as relações econômicas associadas à alocação de recursos para investimentos. Acredita-se que tais relações não podem ser ignoradas, principalmente em empreendimentos que demandam elevados montantes de investimento e financiamentos governamentais.

Dessa forma, considera-se o custo econômico ambiental estimado com a taxa de desconto definida pela Fórmula de Ramsey estendida de segurança

equivalente como o que melhor atenderia o critério de equidade intergeracional. A título de comparação, só a Usina Nuclear de Angra 3 demandará investimentos de R\$ 13,9 bilhões<sup>11</sup>. O custo econômico ambiental do depósito dos resíduos gerados pela usina (de aproximadamente R\$ 1,9 milhão) representa 0,1% do valor do empreendimento sem considerar o custo financeiro de construção, gestão e manutenção do depósito. Obviamente, empreendimentos de geração de energia elétrica geram uma série de benefícios para a sociedade, contudo, cabe averiguar que os impactos ambientais negativos não são insignificantes se considerarmos a equidade intergeracional.

Com base na análise de Padilla (2002) e na diferença observada na mensuração do custo ambiental quando diferentes taxas de desconto são aplicadas, considera-se relevante que projetos com impactos ambientais irreversíveis no longo prazo incluam em seus cálculos o custo de tais impactos com o uso de uma taxa de desconto apropriada. Assim, a análise de viabilidade do projeto ou sua análise custo-benefício internalizará os custos que serão arcados pelas gerações no longo prazo.

No caso da análise do depósito de rejeitos nucleares, considera-se relevante incluir tal custo e complementar o projeto com ações de acompanhamento para averiguar se algum dano irreversível irá ocorrer. Acompanhamento da emissão de radionuclídeos com avaliação da qualidade do solo e água precisarão ser constantes. Além disso, custos associados ao aprimoramento das estruturas de acordo com a evolução tecnológica dos empreendimentos poderiam ser considerados na análise, porque, apesar de irreversíveis, a probabilidade de ocorrência de tais incidentes ainda é baixa.

#### 4.7. Comentários conclusivos sobre o capítulo

O trabalho desenvolvido permite analisar 3 tópicos distintos e relacionados: a equidade intergeracional, a questão dos custos invisíveis e a análise ambiental do depósito de rejeitos nucleares.

---

<sup>11</sup> ELETRONUCLEAR (2003). Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/Angra3custoseinvestimentos.aspx>>. Acesso em: 26 mai. 2014.



O conceito de equidade intergeracional, como foi citado anteriormente, envolve compreender que os impactos ambientais e as interações ecológicas que são desencadeadas não ficam restritos às delimitações geográficas ou intergeracionais. A busca pela saciedade das necessidades da geração atual gera processos produtivos que podem limitar a busca pela saciedade das gerações futuras e que não fazem parte do processo decisório. Apesar da relevância do tema e dos esforços pela concretização desse conceito dentro do que é idealizado enquanto desenvolvimento sustentável, sua aplicação é ainda incerta.

A aplicação de políticas (*policies*) que respeitem a equidade intergeracional envolve aspectos morais que são de difícil sistematização. Autores mais recentes, como Chichilnisky (2012) e Arrow *et al.* (2012), mostram que a discussão sobre a equidade intergeracional envolve valores individuais. No caso de Chichilnisky, por exemplo, os agentes precisariam ter escolhas mais sustentáveis para apresentar comportamentos mais sustentáveis no mercado. No caso de Arrow *et al.* há uma discussão que envolve as diferenças entre um agente econômico atuando enquanto indivíduo (tempo limitado) e o mesmo agente atuando enquanto membro de uma sociedade (tempo infinito). Esse funcionamento gera uma série de questionamento sobre como definir o que é um impacto inaceitável para as gerações futuras. Ou ainda, de inferir qual seria o nível de qualidade de vida (consumo) suficiente para outras pessoas. Além disso, as dificuldades que envolvem o processo de mensuração prejudicam a análise puramente científica do que é aceitável ou não para as gerações futuras.

No caso do depósito de resíduos nucleares, os impactos de longo prazo são representados em termos de probabilidade de incidência. Não há um impacto certo e garantido que possa ser mensurado e então ter sua gravidade avaliada. Esse seria um exemplo claro do viés moral do conceito de equidade intergeracional. A análise desenvolvida nesse trabalho adotou a probabilidade na mensuração, porém, é possível que um gestor público considere tal probabilidade irrelevante por ser irrisória, como é o caso do Relatório de *Yucca Mountain*. As probabilidades apresentadas foram consideradas baixas na análise do projeto e dificilmente representariam um impasse ao desenvolvimento do depósito. Nesse caso, por se tratar de um valor moral,

sugere-se que a conduta seja adotada de acordo com uma postura política (*politics*) que, teoricamente, representaria a visão da população sobre o tema. Porém, para que essa postura seja adotada ainda é necessário que os instrumentos técnicos e científicos sejam esgotados. E, nesse contexto, a análise de qual taxa de desconto deve ser adotada é primordial.

A questão dos custos invisíveis está relacionada aos limites científicos da mensuração dos impactos ambientais como é o caso de se mensurar aquilo que é incerto ou muito distante dos tomadores de decisão. As limitações científicas e incertezas relacionadas aos impactos no longo prazo geram também incertezas quanto à mensuração dos parâmetros avaliados. Essa falta de informação faz com que a análise subestime ou ignore tais impactos sem que haja uma consideração qualitativa tornando-os custos invisíveis. Essa conduta foi citada no caso de *Yucca Mountain* no capítulo anterior. Contudo, a ausência de informações deveria reforçar a cautela no processo de decisão de empreendimentos como esse e a mensuração de tais impactos, mesmo com suas limitações, ainda é primordial.

Apesar de não ter sido desenvolvido nesse trabalho, a construção de cenários de impactos potenciais pode ser uma via interessante para subsidiar as decisões. Nesse sentido, as regras sugeridas por Padilla (2002) também podem ser úteis na análise dos projetos de infraestrutura.

Outro aspecto relacionado aos custos invisíveis está na taxa de desconto adotada. A mensuração econômica converte vários impactos a uma única unidade, a taxa de desconto também exerce esse papel ao converter uma unidade monetária com diferentes valores (como poder de compra e custo de oportunidade) em uma única unidade monetária ao longo do tempo. Essa conversão ao longo do tempo pode reduzir a zero os impactos potenciais com custo não nulo, como foi o caso do depósito de rejeitos nucleares de Angra 3. Nesse sentido, é importante considerar o método proposto por Arrow *et al.* (2012) em que a taxa decrescente de desconto deve ser usada quando há incertezas relacionadas ao estado da economia e quando também há choques de crescimento persistentes, contexto coerente com análises de longo prazo. A Fórmula de Ramsey seria a indicada para esses casos.

Contudo, há também discussões acerca da forma de se calcular as variáveis previstas na Fórmula. As duas abordagens existentes, a descritiva e a

prescritiva, se diferenciam justamente na forma que se deve aplicar o conceito de equidade intergeracional na análise de projetos. A análise prescritiva pressupõe que aspectos éticos precisariam ser considerados enquanto que a análise descritiva reforça a importância de se parametrizar com base no comportamento dos mercados. O trabalho de Arrow *et al.* sugere variáveis mais consensuais que valem ser atualizadas e calculadas para regiões específicas.

No caso do trabalho desenvolvido, a elevada taxa de crescimento de consumo das famílias no Brasil assim como o elevado desvio padrão apresentam um efeito de precaução onde a incerteza sobre a taxa de crescimento do consumo reduz a taxa de desconto, fazendo com que o gestor público poupe mais no presente. Em outras palavras, a taxa de crescimento do consumo das famílias brasileiras apresenta um comportamento volátil o que aumenta a precaução, já que o impacto negativo pode ser elevado no futuro. Essas variáveis foram fundamentais para que os custos no longo prazo fossem considerados no presente. Conforme exposto anteriormente, os valores encontrados são significativos e não devem ser desprezados no processo decisório de obras desse porte.

Finalmente, cabe uma análise sobre os impactos ambientais dos resíduos nucleares. Ao longo do trabalho desenvolvido, fica clara a falta de detalhamento de tais impactos no EIA/RIMA da Usina Nuclear de Angra 3. Os longos documentos descrevem os biomas da área potencialmente afetada, mas não descrevem como eles seriam afetados nem tampouco quais seriam as consequências. Sabe-se que as incertezas quanto aos impactos potenciais no longo prazo são muitas, contudo no EIA/RIMA não há qualquer exercício ou tentativa de estimativa de como a área seria afetada no curto prazo e muito menos no longo prazo.

## COMENTÁRIOS FINAIS

A escolha de uma matriz energética envolve também a escolha de quais impactos ambientais serão considerados menos nocivos pela sociedade. A atual preocupação com as mudanças climáticas tem levado os governos a se preocuparem em planejar uma matriz energética com menor emissão de gases de efeito estufa. Contudo, outros impactos também precisam ser analisados quando se considera a relevância da equidade intergeracional no conceito de desenvolvimento sustentável.

O trabalho desenvolvido focou nos custos do depósito de rejeitos nucleares, já que há uma carência de literatura científica de como tais custos se desenvolveriam e também de como eles poderiam ser incluídos na análise de projetos.

O processo político do planejamento da matriz energética deveria idealmente refletir as escolhas da sociedade que representa, mas para que a decisão seja tomada é importante que todas as possibilidades de custos e benefícios das fontes de energia disponíveis sejam consideradas e tornadas claras e disponíveis. No entanto, o caso dos resíduos nucleares envolve uma série de incertezas quanto aos custos potenciais, o que afeta os instrumentos técnicos que deveriam ser utilizados no processo de decisão.

A Alemanha, por exemplo, após o incidente de Fukushima ocorrido em 2011, decidiu desativar completamente as usinas nucleares (e suspender a expansão desse tipo de geração) até 2022. De acordo com o Governo da Alemanha, o motivo principal para a retirada das usinas nucleares da geração de energia elétrica foi o entendimento de que não seria possível excluir o risco residual desse tipo de geração. O País afirma que “a parcela restante da energia elétrica que seria gerada pela tecnologia nuclear deverá ser compensada a médio prazo por novas e eficientes usinas movidas a combustíveis fósseis, pela expansão e integração progressiva das energias renováveis no mercado, bem como por uma intensificação da eficiência energética”<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> Esclarecimentos disponíveis em português no endereço eletrônico:  
<<http://www.lissabon.diplo.de/Vertretung/lissabon/pt/05/Energiewende/Energiewende.html>>

Essa decisão reflete uma preferência pelo desenvolvimento tecnológico de fontes com impactos já relativamente conhecidos, previstos e controláveis (fontes alternativas) em detrimento da manutenção das tecnologias existentes que envolvem uma grande imprevisibilidade quanto às consequências dos impactos potenciais (nuclear).

No caso brasileiro, além dos fatores expostos no Capítulo anterior, identificou-se que o aspecto ambiental do gerenciamento dos resíduos nucleares também causa preocupação, acentuada pela diferença qualitativa existente entre a análise dos impactos ambientais do depósito de *Yucca Mountain* e aquela apresentada para a Usina Nuclear de Angra 3 e seus depósitos temporários, no EIA/RIMA.

As análises realizadas no Brasil não avaliam os impactos potenciais, apenas citam os biomas que poderiam ser afetados, mas não descrevem como eles seriam afetados ou quais seriam as consequências. Também não há clareza do horizonte temporal considerado, aspecto primordial na análise do meio ambiente já que a depleção contínua dos recursos naturais pode causar diferentes impactos no curto, médio e longo prazo.

Além disso, a ausência de clareza e a indefinição do depósito final dos rejeitos nucleares das usinas nucleares de Angra aumenta a preocupação sobre os impactos potenciais não estimados. No caso dos Estados Unidos, o projeto para o depósito final dos rejeitos nucleares tem como localização uma área desértica e isolada do convívio humano. No caso do Brasil, as usinas nucleares estão localizadas próximas ao mar, na Mata Atlântica e em uma área com grande densidade populacional. Os impactos causados por um possível vazamento, por exemplo, afetariam de forma intensa a hidrologia do local, a grande diversidade do bioma e a vida humana.

Portanto, parece-nos que decisões estão sendo tomadas sem que haja clareza das consequências de tais escolhas. Quando se trata de algo tão relevante para a qualidade de vida da população (energia elétrica) e de impactos potenciais gravíssimos (resíduos nucleares), estudos aprofundados para subsidiar processos decisórios são imprescindíveis. .

Conforme exposto por Padilla (2002), as gerações futuras não participarão do processo decisório de um projeto e acabarão se submetendo às consequências das decisões das gerações anteriores. No caso da análise dos

depósitos de resíduos nucleares, o custo gerado é relacionado a aspectos irreversíveis como a incidência de morte, câncer e efeitos severos hereditários.

Com base na análise de Padilla (2002) e na diferença observada na mensuração do custo ambiental quando diferentes taxas de desconto são aplicadas, considera-se relevante que projetos com impactos ambientais irreversíveis no longo prazo incluam em seus cálculos o custo de tais impactos com o uso de uma taxa de desconto apropriada. Recomenda-se o uso da Fórmula de Ramsey de Segurança Equivalente pela disponibilidade de informações e por considerar eventos possíveis no longo prazo como choques no consumo oriundos de uma grande crise econômica ou guerras. Assim, a análise de viabilidade do projeto ou sua análise custo-benefício internalizará os custos que serão arcados pelas gerações no longo prazo.

Nesse contexto, e com base no trabalho de Padilla (2002) sugere-se 4 condutas que precisariam ser adotadas na avaliação de impactos intergeracionais:

1. Não adotar a política ou projeto. Nesse caso, é preciso avaliar a importância de uma Usina Nuclear dentro da Matriz Elétrica brasileira. Em momentos de baixa pluviosidade, como o atual, com questionamentos sobre a segurança de fornecimento energético, tal decisão precisa ser tomada com análise das fontes alternativas possíveis.
2. Aliar a adoção da precaução a formas de controle para acompanhar se um dano irreversível irá ocorrer. Se a interferência prevista no projeto pode ser evitada, principalmente quando se trata de um projeto rentável, essa postura deve ser adotada. Na situação analisada, seria importante desenvolver um plano de gestão de longo prazo dos resíduos nucleares com clareza dos agentes responsáveis pelo acompanhamento, medição e análise dos impactos atuais e potenciais.
3. Implementar projetos complementares com o intuito compensatório. Essa alternativa envolve uma avaliação prévia da eficácia do projeto no que tange à compensação do dano causado. No caso dos resíduos nucleares, é importante que haja uma maior clareza quanto à implementação e gestão de um depósito definitivo de resíduos

nucleares com um acompanhamento rígido sobre os impactos potenciais. Nesse sentido, a Comissão Nacional de Energia Nuclear precisaria apresentar uma postura mais clara quanto à existência e ao andamento do projeto.

4. Adotar uma compensação financeira para futuras gerações com a criação de um fundo para que recursos financeiros possam ser utilizados como forma de compensação. Essa alternativa exigiria uma segurança jurídica para que os recursos do fundo não acabassem sendo aplicados para outros fins.

Há também uma série de análises complementares que contribuiriam para a discussão da equidade intergeracional na mensuração de custos ambientais de longo prazo. Dentre elas:

- Atualização do cálculo da taxa de risco de extinção da raça humana realizada por Stern (2006).
- Cálculo da aversão à inequidade intergeracional ou da disposição à redistribuição de renda para o Brasil.
- Mensuração dos benefícios da geração nuclear no longo prazo no Brasil, considerando a segurança no fornecimento energético e o desenvolvimento tecnológico potencial com a expansão desse tipo de fonte.
- Mensuração dos impactos ambientais no longo prazo quando houver a definição do depósito definitivo para os rejeitos nucleares de Angra 3.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Avaliação das contribuições da AP 086/2013, que tratou de obter subsídios para a homologação dos programas computacionais de planejamento e formação de preço com internalização de mecanismos de aversão a risco de que trata o art. 1º da Resolução CNPE nº 03/2013.** Nota Técnica nº 059/2013. 26 p., 2013.

AGUIAR, L. **Avaliação de risco de um repositório próximo à superfície na fase pós-fechamento em cenário de liberação de radionuclídeos por infiltração de água.** Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2006. Originalmente apresentada como tese de doutorado em engenharia nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

ALLEY, W.; ALLEY, R. **Too hot to touch. The problem of high-level nuclear waste.** New York: Cambridge University Press, 385 p., 2012.

ARROW, *et al.* **How Should Benefits and Costs Be Discounted in an Intergenerational Context?** Washington: Resources for the future, 34 p., 2012.

ARROW, K. Discounting, morality, and gaming. In: PORTNEY, P. WEYANT, J. **Discounting and Intergenerational Equity.** Washington: Resources for the future, 1999, p. 13-21.

ARROW, K. *et al.* **Benefit-Cost Analysis in Environmental, Health, and Safety Regulation: A Statement of Principles.** Washington: American Enterprise Institute, The Annapolis Center, and Resources for the Future, 1996.

ASHEIM, G.; BUCHHOLZ, W. e TUNGODDEN, B. **Justifying Sustainability.** *Journal of Environmental Economics and Management*, v. 41, p. 252-268, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Avaliação de bens Parte 6: Recursos naturais e ambientais.** Norma ABNT NBR Brasileira 14653-6, 21 p., 2008.

AYRES, R. **Sustainability economics: Where do we stand?** *Ecological Economics*, v. 67, p. 281-310, 2008.



BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Relatório de Inflação**, v. 16, n. 1, 115 p., 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de câmbio**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?txcambio>>. Acesso em: 17 de abr. 2014

BAUM, S. **Description, prescription and the choice of discount rates**. *Ecological Economics*, v. 69, p. 197–205, 2009.

BELTRATTI, A.; CHICHILNISKY, G., HEAL, G. **The Green Golden Rule**. *EL*, v. 49, p. 175-179, 1995.

BOHM, P.; HENRY, C. **Cost-Benefit Analysis and Environmental Effects**. *Ambio*, v. 8, p. 18-24, 1979.

BRASIL. Lei nº 10.308 de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências.

BRUNDTLAND, G. **Our Common Future. The World Commission on Environment and Development**. Oxford University: Oxford University Press, 1987, p. 37.

BERGH, J. **Externality or sustainability economics?** *Ecological Economics*, v. 69, p. 2047-2052, 2010.

CARAJILESCOV, P.; MOREIRA, J. **Aspectos Técnicos, Econômicos e Sociais do Uso Pacífico da Energia Nuclear**. *Ciência e Cultura*, v.60, p. 33-36, 2008.

CHICHILNISKY, G. **Avoiding extinction: equal treatment of the present and the future**. *Economics: The Open-Access, Open-Assessment E-Journal*, v. 3, 32 p., 2009.

CHICHILNISKY, G. **Sustainable markets with short sales**. *Economic Theory*, v. 49, p. 293-307, 2012.

CLINE, W. Discounting for the very long term. In: PORTNEY, P. WEYANT, J. **Discounting and Intergenerational Equity**. Washington: Resources for the future, 1999, p. 111-129.

CONTADOR, C. Cálculo dos benefícios e custos sociais. In: \_\_\_\_\_. **Projetos sociais: avaliação e prática**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2000. p. 78-101.

DASGUPTA, S.; MITRA, T. **Intergenerational Equity and Efficient Allocation of Exhaustible Resources**. *International Economic Review*, v. 24, p. 133-153, 1983.

DASGUPTA, P.; HEAL, G. **The Optimal Depletion of Exhaustible Resources**. *Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources*, v. 41, p. 3-28, 1974.

ELETRONUCLEAR. **Central Nuclear de Angra dos Reis**. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

ELETRONUCLEAR. **Estudo de Impacto Ambiental da Unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – ANGRA 3**. 2162 p., 2005.

ELETRONUCLEAR. **Relatório do Impacto Ambiental do Depósito 2-B e prédio de monitoramento do centro de gerenciamento de rejeitos**. 93 p., 2006.

EMBAIXADA DA REPÚBLICA DA ALEMANHA EM LISBOA. **Energia Nuclear na Alemanha - Perguntas frequentes sobre o abandono da energia nuclear na Alemanha**. Disponível em: <[http://www.lissabon.diplo.de/Vertretung/lissabon/pt/05/Energiewende/Energie\\_wende.html](http://www.lissabon.diplo.de/Vertretung/lissabon/pt/05/Energiewende/Energie_wende.html)>. Acesso em: 04 nov. 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Energia 2022**. Brasília: MME/EPE, 410 p., 2013.

FELDSTEIN, M. **The Social Time Preference Discount Rate in Cost Benefit Analysis**. *The Economic Journal*, v. 74, p. 360-379, 1964.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. **Índice Geral de Preços - Mercado (IGP-M)**. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 17 de abr. 2014

GOWDY, J.; ROSSER JR, J.; ROY, L. **The evolution of hyperbolic discounting: Implications for truly social valuation of the future**. *Journal of Economic Behavior & Organization*, v. 905, p. 594-610, 2013.

HANLEY, N.; SPASH, C. **Cost-Benefit Analysis and the Environment**. Hampshire: Edward Elgar Publishing Limited, p. 27-151, 1994.

HOWARTH, R.; NORGAARD, R. **Environmental Valuation under Sustainable Development**. *American Economic Review*, v. 82, p. 473–77, 1992.

HOWARTH, R.; NORGAARD, R. **Intergenerational Resource Rights, Efficiency, and Social Optimality**. *Land Economics*, v. 66, p. 1–11, 1990.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Principles of Radioactive Waste Management Safety Fundamentals**. Áustria: Vienna, 24 p., 1995.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Socio-economic and other non-radiological impacts of the near surface disposal of radioactive waste**. Áustria: Vienna, 32 p., 2002.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The Behaviours of Cementitious Materials in Long Term Storage and Disposal of Radioactive Waste**. Áustria: Vienna, 75 p., 2013.

IPEADATA. **Consumo final das famílias: variação real anual**. Disponível em: < <http://www.ipeadata.gov.br/>>. Acesso em: 17 de abr. 2014

KULA, E.; EVANS, D. **Dual discounting in cost-benefit analysis for environmental impacts**. *Environmental impact assessment review*, v. 31, p. 180-186; 2011.

LIMA, L. **A escolha da taxa de desconto na análise custo-benefício**. Brasília: Universidade de Brasília, 2013. Originalmente apresentada como monografia de graduação, Universidade de Brasília, 2013.

LIND, R. Analysis for intergenerational decisionmaking. In: PORTNEY, P. WEYANT, J. **Discounting and Intergenerational Equity**. Washington: Resources for the future, 1999, p. 173-180.

LUTZ, E.; MUNASINGHE, M. **Integration of environmental concerns into economic analyses of projects and policies in an operational context**. *Ecological Economics*, v. 10, p. 37-46, 1994.

- MARIN, S. **O preço de tudo e o valor de nada: uma discussão do método custo-benefício.** *Cadernos de Economia*, v.22, 2008.
- MENZEL, F. **Cálculo do custo ambiental das usinas nucleares de Angra 1, 2 e 3 utilizando o programa SIMPACTS.** São Paulo, SP: USP, 2014. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado em Ciências na área de tecnologia nuclear - reatores, Universidade de São Paulo, 2014.
- MERTENS, J.; RUBINCHIK, A. **Intergenerational equity and the discount rate for policy analysis.** *Macroeconomic Dynamics*, p. 1-33, 2011.
- MEZ, L. **Nuclear energy—Any solution for sustainability and climate protection?** *Energy Policy*, v. 48, pp. 56-63, 2012.
- MORAES, G. **Sistema de Gestão de Riscos. Rio de Janeiro: Gerenciamento Verde.** Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=Rheo3dlGZBoC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 25 de mai. 2014, p. 75, 2013.
- MUELLER, C. A economia da sobrevivência: fundamentos e visão analítica. In: \_\_\_\_\_. **Os economistas e as relações entre o sistema econômico e o meio ambiente.** Brasília: Finatec, 2007. p. 134-146.
- MUNDA, G. **Cost-benefit analysis in integrated environmental assessment: some methodological issues.** *Ecological Economics*, v. 19, p. 157-168, 1996.
- PADILLA, E. **Intergenerational equity and sustainability.** *Ecological Economics*, v. 41, p. 69-83, 2002.
- PAGE, T. **Conservation and economic efficiency.** Baltimore: John Hopkins University, 266 p., 1977.
- PAGE, T. **On the Problem of Achieving Efficiency and Equity, Intergenerationally.** *Land Economics*, v. 73, p. 580–96, 1997.
- PEZZEY, C., TOMAN, M. **The Economics of Sustainability.** Washington: Resources for the future, 36 p., 2002.
- PORTNEY, P. WEYANT, J. **Discounting and Intergenerational Equity.** Washington: Resources for the future, 1999.

PREST, A.; TURVEY, R. **Cost-Benefit Analysis: A Survey**. *Economic Journal*, v. 75, p. 683-735, 1965.

RAMSEY, F. **A mathematical theory of saving**. *The Economic Journal*, v. 38, p. 543–559, 1928.

REVESZ, R.; LIVERMORE, M. **Retaking Rationality: How cost-benefit analysis can better protect the environment and our health**. New York: Oxford University Press, 2008, 254 p.

ROEMER, J. **Once more on intergenerational discounting in climate-change analysis: reply to Partha Dasgupta**. *Environmental Resource Economics*, v. 56, p. 141-148, 2013.

ROEMER, J. **The ethics of intertemporal distribution in a warming Planet**. *Environmental Resource Economics*, v. 48, p. 363-390, 2011.

SAEZ, C., REQUENA, J. **Reconciling sustainability and discounting in cost-benefit analysis: a methodological proposal**. *Ecological Economics*, v. 60, p. 712–725, 2007.

SANDERS, C. **Review of the development of the transportation, aging, and disposal (TAD) waste disposal system for the proposed Yucca Mountain geologic repository**. *Progress in Nuclear Energy*, v. 62, p. 8-15, 2013.

SEROA DA MOTTA, R. **Manual para Valoração Econômica de Recursos Ambientais**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 254 p., 1997.

SMITH, V. **Environmental costing: Experience and prospects**. *Resource and Energy Economics*, v. 18, p. 333-345, 1996.

SOLOW, R. **Intergenerational equity and exhaustible resources**. *Review of Economic Studies*, v. 41, p. 29–45, 1974.

STERN, N. **Review on the economics of climate change**. London: HM Treasury, 662 p., 2006.

STIGLITZ, J. **Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths**. *Review of Economic Studies, Symposium on the Economics of Exhaustible Resource*, v. 41, p. 123-137, 1974.

STUDART, T.; CAMPOS, J.; CARVALHO, R. **Recursos hídricos e as incertezas científicas: novos conceitos e abordagens**. Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, promovido pela Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Aracaju, Sergipe, 2001.

THE BALTIMORE SUN. **10 years after Baltimore tunnel fire, much is unchanged**. Disponível em: <[http://articles.baltimoresun.com/2011-07-16/news/bs-md-howard-street-tunnel-20110716\\_1\\_howard-street-tunnel-freight-train-17-mile-tunnel](http://articles.baltimoresun.com/2011-07-16/news/bs-md-howard-street-tunnel-20110716_1_howard-street-tunnel-freight-train-17-mile-tunnel)>. Acesso em: 20 mar. 2014.

TOL, R. **International Inequity Aversion and the Social Cost of Carbon**. *Climate Change Economics*, v. 1, p. 21–32, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. **The Effects of Nuclear Weapons**. Disponível em: <<https://www.fourmilab.ch/etexts/www/effects/>>. Acesso em: 11 abr. 2014, 650 p., 1977.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY [a]. **Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County. Volume I – Impact Analyses**, 741 p, 2008.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY [b]. **Final Supplemental Environmental Impact Statement for a Geologic Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County. Summary**, 2008, 93 p.

VANDENBOSCH, R.; VANDENBOSCH, S. **Nuclear Waste Stalemate: Political and Scientific Controversies**. Salt Lake City: University of Utah Press, 313 p., 2007.

VARIAN, H. **Microeconomic analysis**. New York: W. W. Norton & Company, 563 p., 2003.

ZUBER, S.; ASHEIM, G. **Justifying social discounting: The rank-discounted utilitarian approach**. *Journal of Economic Theory*, v. 147, p. 1572-1601, 2012.

## APÊNDICE A - IMPACTOS AMBIENTAIS NA CONSTRUÇÃO, OPERAÇÃO, MONITORAMENTO E ENCERRAMENTO DO DEPÓSITO GEOLÓGICO DE *YUCCA MOUNTAIN*

### a. Impactos no uso da terra

A instalação de um depósito final de rejeitos nucleares envolve a obtenção definitiva do terreno. No caso de *Yucca Mountain*, a área ocuparia uma pequena parte de uma área maior. A análise envolve 600 km<sup>2</sup>, já considerando uma zona de segurança (Tabela 1).

As ações de construção, operação e monitoramento iriam causar impactos no subsolo e na superfície da área. A perturbação total de terras para o repositório, o acesso rodoviário e as instalações propostas seriam de aproximadamente 9 km<sup>2</sup>.

Haveria também distúrbios da terra que incluem cerca de 8,5 km<sup>2</sup> de pequenas áreas não contíguas dentro da área retirada da terra analisada. As atividades do repositório não entrariam em conflito com o uso atual de terras adjacentes

**Tabela 1 - Resumo da área impactada durante a construção, operação, monitoramento e encerramento do depósito final de *Yucca Mountain***

Propósito	Área (km <sup>2</sup> )
Área ocupada pelo depósito com margem de segurança	600
Pequenas áreas de acesso não contíguas ao terreno	8,5
Facilidades de acesso ao depósito e interligação com rodovias	0,6
Centro de treinamento	1,2
Escritórios, armazéns e dormitórios temporários	0,3
Total	610,6

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

Além da área de construção, impactos também serão causados em cerca de 0,6 km<sup>2</sup> nos arredores do terreno para facilidades de acesso ao

depósito e também para interligação com rodovias, entre outras áreas de construção. O estudo considera que os impactos do uso da terra seriam pequenos.

#### **b. Impactos na qualidade do ar**

A análise ambiental também avaliou os potenciais impactos na qualidade do ar na região de *Yucca Mountain* oriundos da liberação de poluentes não radioativos durante a construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório proposto.

A região de influência é uma área com um raio de aproximadamente 84 km ao redor do depósito de *Yucca Mountain*. As fontes poluentes não radioativas do ar incluem a suspensão de poeira causada pelas perturbações na terra e pelo processo de escavação da rocha; a suspensão de poeira gerada pelas operações nas plantas de mistura de concreto; emissões de dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e emissões de partículas provenientes do uso de combustíveis fósseis.

O DOE avaliou os impactos na qualidade do ar tendo como referência 5 poluentes: monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre, ozônio e material particulado. Além desses poluentes, também foram analisados os impactos potenciais da cristobalita, uma forma de pó de sílica, que é o agente causador da silicose (doença respiratória) e pode ser uma substância cancerígena.

A análise da qualidade do ar avaliou os impactos tendo como referência a exposição máxima do indivíduo e considerou os locais mais próximos de acesso público irrestrito fora da área restrita do depósito. O impacto máximo de qualidade do ar, isto é, a concentração de poluentes no ar que resultaria de atividades do repositório, poderia ocorrer em diferentes locais ao longo do limite do território restrito do depósito (600 km<sup>2</sup>), dependendo da concentração de poluentes no período de liberação e do tempo de duração média da liberação. Em outras palavras, o indivíduo com exposição máxima seria a pessoa presente no local com a maior concentração de poluentes por período de lançamento e durante o tempo médio de emissão.



O DOE primeiramente avaliou os impactos na qualidade do ar durante a construção do repositório e comparou com o limite definido pela EPA (Tabela 2 e Tabela 3) na fronteira da área do repositório e também a 100 metros da construção externa ao terreno do repositório (integração com rodovias e ferrovias, armazenagem, dormitórios etc.). Foram analisados:

- Poeira na forma de PM<sub>10</sub> (material particulado com diâmetro aerodinâmico de 10 micrômetros ou menos) durante a preparação do local da escavação;
- Poeira na forma de PM<sub>10</sub> durante a construção da superfície, o que inclui a estrada de acesso, corredor de serviço público, instalações de superfície e outras instalações de transporte ferroviário;
- Poeira na forma de PM<sub>10</sub> oriunda da colocação e manutenção de rochas escavadas no armazenamento na superfície;
- Material particulado (PM<sub>10</sub>) de escapamentos de ventilação durante a escavação do subsolo;
- Material particulado (PM<sub>10</sub>) de três plantas de mistura de concreto;
- Poluentes gasosos (monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre) e partículas com um diâmetro aerodinâmico de 2,5 micrômetros ou menos (PM<sub>2.5</sub>) de consumo de combustíveis fósseis por veículos de construção.

**Tabela 2 – Concentração máxima de poluentes e cristobalita dentro da fronteira do terreno do repositório no período de construção**

Poluente	Tempo médio	Limite legal (mg/m <sup>3</sup> )	Concentração máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Porcentagem do limite legal (%)
Monóxido de Carbono	8 horas	10.000	16,00	0,16
	1 hora	40.000	130,00	0,32
Dióxido de Nitrogênio	Anual	100	0,043	0,043
Dióxido de Enxofre	Anual	80	0,00016	0,0002
	24 horas	365	0,023	0,0062
	3 horas	1.300	0,18	0,014
PM <sub>10</sub>	24 horas	150	59,00	40,00
PM <sub>2.5</sub>	Anual	15	0,0024	0,016
	24 horas	35	0,34	1,00
Cristobalita <sup>1</sup>	Anual	10	0,048	0,48

Fonte: DOE (2008).

<sup>1</sup>Não há limite legal para a concentração de cristobalita. O valor estimado teve como base os estudos da EPA sobre o risco de câncer a partir da exposição à cristobalita mantendo um nível seguro de exposição.

**Tabela 3 – Concentração máxima de poluentes e cristobalita a 100 metros da construção externa ao terreno do repositório**

Poluente	Tempo médio	Limite legal (mg/m <sup>3</sup> )	Concentração máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Porcentagem do limite legal (%)
Monóxido de Carbono	8 horas	10.000	21,00	0,21
	1 hora	40.000	170,00	0,42
Dióxido de Nitrogênio	Anual	100	1,00	1,00
Dióxido de Enxofre	Anual	80	0,004	0,0051
	24 horas	365	0,032	0,0088
	3 horas	1.300	0,24	0,019
PM <sub>10</sub>	24 horas	150	64,00	43,00
PM <sub>2,5</sub>	Anual	15	0,057	0,38
	24 horas	35	0,490	1,40

Fonte: DOE (2008).

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram que a concentração de poluentes e de cristobalita seria inferior ao considerado limítrofe pela legislação americana. O poluente que mais se aproximaria do limite legal seria o PM<sub>10</sub> a 10 metros da construção externa ao terreno do repositório e, mesmo assim, chegaria somente a 43% do limite legal. Cabe ressaltar que a análise assumiu que a construção no terreno seria simultânea à construção externa. Contudo, a avaliação não ponderou os impactos cumulativos da concentração dos poluentes.

Para o período de operação do repositório, foram analisados os seguintes poluentes:

- Poeira em suspensão (PM<sub>10</sub>) oriunda das atividades contínuas de perturbação na superfície;
- Poeira em suspensão (PM<sub>10</sub>) consequente da escavação, colocação e manutenção de rochas no processo de armazenamento;

- Emissões de Cristobalita por conta das escavações subterrâneas e do armazenamento das rochas escavadas;
- Material particulado (PM<sub>10</sub>) das plantas de mistura de concreto;
- Poluentes gasosos (monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre) e partículas (PM<sub>2,5</sub>) de veículos, durante a construção da superfície e colocação de embalagens de resíduos;
- Poluentes gasosos e material particulado (PM<sub>2,5</sub>) oriundos de caldeiras a diesel e de geradores a diesel de emergência.

A análise realizada mostrou que a concentração de gases poluentes no período de operação do repositório seria inferior ao observado no período de construção e atenderia ao limite legal (Tabela 4). Os poluentes não chegariam a 8% do limite legal definido pela legislação americana e, portanto, não representam impactos significativos ao meio ambiente.

Para o período de monitoramento, o DOE considerou que não haveria impactos na qualidade do ar já que haveria menos atividades em instalações fora do local, tais como o centro de treinamento e a estação de triagem. Assim, as metas legais seriam atendidas.

No período de encerramento do depósito também foi observado que a concentração de poluentes não radioativos do ar seria inferior à definida legalmente (Tabela 5). Para esse período, a DOE analisou:

- Poeira em suspensão (PM<sub>10</sub>) oriunda da manipulação, processamento e transferência do material presente no aterro para a área subterrânea;
- Poeira em suspensão (PM<sub>10</sub>) e lançamentos de demolição de edifícios, remoção de detritos, e recuperação de áreas degradadas;
- Cristobalita lançada durante a movimentação e armazenagem das rochas escavadas; e
- Poluentes gasosos (monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre) e partículas (PM<sub>2,5</sub>) a partir do consumo de combustível.

No que se refere à emissão de gases de efeito estufa, foi averiguado que as emissões seriam insignificantes (2,4 milhões de toneladas de Dióxido de Carbono para todos os períodos) quando comparadas às emissões observadas no Estado de Nevada.

Assim, a qualidade do ar no período de construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório de *Yucca Mountain* seria mantida de acordo com os critérios estabelecidos pelo Governo dos Estados Unidos.

**Tabela 4 – Concentração máxima de poluentes e cristobalita dentro e na fronteira do terreno do repositório no período de operação do depósito**

Poluente	Tempo médio	Limite legal (mg/m <sup>3</sup> )	Concentração máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Porcentagem do limite legal (%)
Monóxido de Carbono	8 horas	10.000	68,00	0,68
	1 hora	40.000	550,00	1,400
Dióxido de Nitrogênio	Anual	100	0,12	0,12
Dióxido de Enxofre	Anual	80	0,00078	0,00098
	24 horas	365	0,11	0,03
	3 horas	1.300	0,89	0,068
PM <sub>10</sub>	24 horas	150	11,00	7,60
PM <sub>2.5</sub>	Anual	15	0,00640	0,043
	24 horas	35	0,91	2,60
Cristobalita <sup>1</sup>	Anual	10	0,00210	0,021

Fonte: DOE (2008).

<sup>1</sup>Não há limite legal para a concentração de cristobalita. O valor estimado teve como base os estudos da EPA sobre o risco de câncer a partir da exposição à cristobalita mantendo um nível seguro de exposição.

**Tabela 5 – Concentração máxima de poluentes e cristobalita dentro e na fronteira do terreno do repositório no período de encerramento do depósito**

Poluente	Tempo médio	Limite legal (mg/m <sup>3</sup> )	Concentração máxima (mg/m <sup>3</sup> )	Porcentagem do limite legal (%)
Monóxido de Carbono	8 horas	10.000	2,90	0,029
	1 hora	40.000	24,00	0,059
Dióxido de Nitrogênio	Anual	100	0,023	0,023
Dióxido de Enxofre	Anual	80	0,000045	0,000056
	24 horas	365	0,0065	0,0018
	3 horas	1.300	0,052	0,004
PM <sub>10</sub>	24 horas	150	29,00	16,00
PM <sub>2.5</sub>	Anual	15	0,0013	0,009
	24 horas	35	0,19	0,55
Cristobalita <sup>1</sup>	Anual	10	0,0026	0,026

Fonte: DOE (2008).

<sup>1</sup>Não há limite legal para a concentração de cristobalita. O valor estimado teve como base os estudos da EPA sobre o risco de câncer a partir da exposição à cristobalita mantendo um nível seguro de exposição.

### c. Impactos hidrológicos

A análise dos impactos hidrológicos considerou de forma separada as águas na superfície e as águas subterrâneas. Os critérios utilizados para avaliar os impactos nas águas de superfície foram as descargas de água para a superfície, a possibilidade de eliminação de contaminantes nas águas de superfície, os impactos potenciais nas taxas de escoamento e infiltração, e a possibilidade de alteração dos recursos naturais de drenagem das águas superficiais, o que geraria impacto nas várzeas (ou zonas de inundação).

A região de influência dos impactos de água de superfície inclui os canteiros de obras e de operação que seriam suscetíveis à erosão, áreas com

mudanças permanentes no fluxo de água da superfície e áreas a jusante com potencial erosão do solo ou potenciais vazamentos de contaminantes.

A avaliação para o período de construção observou que, com a manutenção adequada, as plantas de evaporação permanecerão intactas e não produzirão efeitos adversos no local do repositório. Foi recomendada a construção de uma planta de evaporação menor na área de mistura de concreto para facilitar a extração e gestão de água oriunda da lavagem dos equipamentos. No caso da operação do depósito, outros usos da água ocorreriam, mas eles teriam pouca, ou nenhuma, descarga potencial de água de superfície. As descargas para a superfície durante os períodos de monitoramento e encerramento do repositório seriam semelhantes, mas inferiores às observadas nos períodos de construção e operação. Os estanques de evaporação teriam pouco ou nenhum uso.

A possibilidade de liberação de contaminantes nas águas de superfície durante a construção foi considerada remota pela análise. O potencial de os contaminantes alcançarem as águas de superfície seria limitado à ocorrência simultânea de um derramamento ou vazamento e de precipitação intensa ou neve derretida. Não existem águas superficiais perenes naturais na região de *Yucca Mountain*, nem há fontes prontamente disponíveis de contaminação. No período de construção, os contaminantes potenciais consistem principalmente de combustíveis (diesel, propano e gasolina) e lubrificantes para os equipamentos (óleos e gorduras). Outros contaminantes potenciais como tintas, solventes e decapantes também seriam utilizados durante a construção, mas em quantidades menores. O relatório afirma que, em caso de vazamento, o DOE irá adotar um plano para prevenir, controlar e corrigir vazamentos já previsto e adaptado para o repositório.

A gestão do combustível irradiado e dos resíduos radioativos de alto nível iria começar no início da operação do depósito. No período após o recebimento do material no local até a acomodação na instalação subterrânea, os materiais ficarão alocados na área restrita de operações do repositório geológico.

O combustível nuclear irradiado e os resíduos radioativos serão acoplados em pequenas caixas de metal e serão transportados em barris e embalagens apropriadas para acoplagem de longo prazo, barris de

transferência ou pacotes de resíduos. Esses recipientes iriam minimizar o potencial de vazamentos e protegeria a área exterior da exposição à radiação durante a transferência do combustível nuclear irradiado e dos resíduos radioativos entre as instalações na área de operações de repositório geológico. Nos edifícios de manejo de resíduos, o sistema de instalação reduziria a probabilidade de liberações acidentais ao meio ambiente. Por exemplo, as linhas de drenagem levariam a tanques ou bacias internas, as emissões atmosféricas seriam filtradas e a piscina de tratamento teria um revestimento de aço inoxidável e um sistema de detecção de vazamentos.

As atividades gerais com resíduos nucleares iriam diminuir no período de monitoramento. Haveria uma diminuição correspondente no potencial de derramamentos e vazamentos nas atividades de rotina. No entanto, as ações de descontaminação que se seguiriam às operações ou no período de monitoramento poderiam apresentar outros riscos por conta da utilização de soluções de descontaminação. O DOE continuaria a implementar os planos e controles para limitar a possibilidade de contaminação na água de superfície. Além disso, o Departamento de Energia iria realizar um monitoramento ambiental durante as operações e durante os períodos de monitoramento para identificar a presença de contaminantes que poderiam indicar vazamentos.

Outra ação relevante prevista é a proteção das instalações de superfície contra a probabilidade de enchentes com a construção das estruturas acima da elevação de inundação correspondente ou utilizando barreiras artificiais, tais como diques ou canais de drenagem. Também está prevista a construção de outras instalações para resistir a uma inundação máxima no período de 100 anos<sup>13</sup>, o que é consistente com a prática e política industrial comum adotada pelo DOE. Mesmo que uma inundação ocorra, não haveria risco para as instalações no subsolo porque os portais estariam altitudes mais elevadas do que as áreas sujeitas a inundações.

A construção de estrutura para a retenção de águas pluviais e de lagoas de detenção resolveria as inundações potenciais e encerraria os problemas de poluição de águas pluviais. O período de encerramento do repositório levaria à

---

<sup>13</sup> A inundação máxima no período de 100 anos é aquela de magnitude máxima que é provável de ocorrer, em média, apenas uma vez a cada 100 anos. Isto significa que existe uma probabilidade de 0,01 que uma inundação desta dimensão possa ocorrer em qualquer ano (DOE, 2008).



redução na possibilidade de contaminação. De qualquer forma, os controles de engenharia e monitoramento permaneceriam para garantir a potencialidade mínima de contaminação.

No que se refere às taxas de escoamento e infiltração de contaminantes, a análise afirma que no período de construção haveria maior risco de escoamento do que de infiltração. De qualquer forma, canais de escoamento estão previstos dentro da área, o que não causaria impactos à área externa do repositório. A ação proposta também não iria perturbar nenhuma terra adicional durante o período de monitoramento e, portanto, não haveria impactos negativos para as taxas de escoamento. A recuperação prevista das áreas anteriormente perturbadas iria resgatar as taxas de escoamento pré-construção. No período de encerramento, seriam construídos monumentos para indicação do depósito com vistas para o longo prazo de modo que a área seja impermeável à infiltração.

Finalmente, foi analisada a possibilidade de alteração na drenagem natural da água de superfície. A etapa de construção envolverá a colocação de estruturas, instalações ou estradas em canais de drenagem ou em suas planícies de inundação associadas (ou zonas de inundação). Estas ações podem afetar as planícies de inundação associadas na região de *Fortymile*, *Midway Valley (Sever)*, *Broca Hole* e *Busted Butte (Duna)*. DOE iria controlar a drenagem das águas superficiais nas lavagens com canais de desvio, bueiros, lagoas de águas pluviais de retenção ou medidas de controle de drenagem semelhantes. A análise indicou que as consequências das ações dentro ou perto da várzea das quatro lavagens seriam pequenas e que seria improvável o aumento dos impactos nas inundações afetando a segurança da saúde humana.

Além disso, recursos naturais e benéficos de várzeas seriam preservados. O período de encerramento não envolveria ações que alteram a drenagem natural além das alterações causadas nos períodos anteriores. O Departamento de Energia analisaria e classificaria as áreas impactadas para que ações de remoção de construção fossem adotadas com o intuito de resgatar a topografia natural na medida do possível. O Departamento não iria construir monumentos onde os canais de drenagem poderiam sofrer impactos relevantes.

Na avaliação dos impactos nas águas subterrâneas, foram analisados os impactos potenciais que podem mudar a taxa de infiltração (que podem afetar as águas subterrâneas), a possibilidade de contaminação (já discutida anteriormente), a disponibilidade de água subterrânea para o uso do projeto e a possibilidade de tal uso afetar outros usuários da água subterrânea. A região de influência para a análise das águas subterrâneas inclui aquíferos sob as áreas de construção e operação e os aquíferos a jusante ao repositório.

Por conta das superfícies impermeáveis e do solo compactado que cobriria grande parte do terreno onde ocorrerá a construção e o funcionamento do repositório, é prevista uma taxa decrescente de infiltração e um correspondente aumento no escoamento superficial sobre a área perturbada. No ambiente semiárido de *Yucca Mountain*, as infiltrações ocorrem apenas em áreas de maior altitude, áreas com cobertura fina ou ausente de solo. Qualquer aumento de infiltração provavelmente não afetaria a recarga de águas subterrâneas em geral.

Porém, a perturbação existente na superfície ao longo do topo de *Yucca Mountain* e nas encostas mais íngremes acima do repositório pode apresentar diferentes cenários de alterações na taxa de infiltração, pois a profundidade do material não consolidado (ou seja, do solo e cascalho) nestas áreas é geralmente fina. Assim, haveria uma maior probabilidade de que a perturbação poderia gerar alguma rocha fraturada onde o escoamento superficial poderia entrar nas rachaduras e atingir porções mais profundas da zona insaturada. Poços de ventilação para a área do subsolo e vias de acesso a esses locais são os exemplos principais de distúrbios superficiais que ocorreriam nas áreas superiores de *Yucca Mountain*.

A quantidade de terra perturbada nessas áreas seria pequena em comparação com a zona intacta, e qualquer mudança no líquido de infiltração seria pequeno. Contudo, atividades subterrâneas poderiam alterar as taxas de recarga dos aquíferos, principalmente devido à quantidade de água que seria bombeada ao subsolo para a supressão de poeira durante o desenvolvimento das atividades.

Durante a escavação para a realização dos estudos exploratórios, o DOE rastreou a água introduzida no subsolo para acompanhamento após o encerramento do repositório proposto. O monitoramento do uso de água no

subsolo continuaria durante o funcionamento do repositório e o DOE prevê que as ações em *Yucca Mountain* teriam pequenos impactos para o sistema de águas subterrâneas. Não ocorreria perturbação de terra adicional durante os períodos de monitoramento e encerramento do depósito, assim não haveria efeitos adicionais sobre as taxas de infiltração.

Nesse período, a recuperação do solo e recuperação da vegetação iria acelerar o retorno às condições de infiltração naturais. As estruturas de sinalização para fornecer marcadores duradouros no repositório resultariam em locais impermeáveis, mas a área da superfície coberta pelos monumentos seria pequena em relação às áreas circundantes.

No caso da disponibilidade da água para a execução do projeto e como a instalação de *Yucca Mountain* poderia afetar os recursos hídricos, foi afirmado que a quantidade de água necessária para suportar a ação proposta seria maior durante o período de construção e no início das operações, quando a água seria necessária para a compactação da superfície do solo e supressão de poeira, bem como para a exploração do subsolo (Tabela 6). A demanda de água durante os períodos de monitoramento e encerramento seria menor e não relevante.

**Tabela 6 - Demanda anual de água para a construção e operação de *Yucca Mountain***

Período de análise	Duração <sup>1</sup> (anos)	Demanda anual de água (m <sup>3</sup> )
Construção	5	330.000 a 570.000
Operação		
Funcionamento do repositório com exploração subterrânea contínua e construção na superfície <sup>2</sup>	5	220.000 a 410.000
Funcionamento do repositório com exploração subterrânea contínua	Até 25	270.000 a 300.000
Funcionamento	Até 20	240.000

Fonte: DOE (2008).

<sup>1</sup>A duração dos períodos dos projetos é flexível. Em tais casos, os valores são "até" com um representante máximo de fuga do prazo previsto e com a previsão conservadora da média máxima do consumo de água. Por exemplo, o DOE espera que o período de operação dure até

50 anos. Dentro desse prazo, a exploração subterrânea pode durar até 30 anos. Se exploração levar menos tempo, a última fase de colocação pode ser maior de 20 anos, de modo que o prazo total ainda seria 50 anos.

<sup>2</sup>Embora a análise tenha previsto que o período formal de construção analítica seja de 5 anos, algumas atividades de construção poderiam se estender para o período de operação.

Com base na demanda estimada, foram analisados os impactos que poderiam ser causados pelo depósito sobre as elevações de água subterrânea e os padrões de fluxo. Observou-se uma redução na elevação da água de até 3 metros na distância de 1 km dos poços de *Yucca Mountain*. Os modelos também previram quedas na elevação da água em rodovias que vão até a cidade de Amargosa Valley (cidade localizada a 23 km da saída sul da área do repositório) que variou entre 0,4 m e 1,1 m. Também foi estimada uma redução no subfluxo na bacia hidrográfica de *Jackass Flats* para a bacia hidrográfica de *Amargosa Desert* de cerca de 160.000 m<sup>3</sup>/ano após 100 anos de bombeamento. Foi estimada uma redução no subfluxo de 180.000 metros cúbicos por ano em condições de estado estacionário.

A análise conclui que a demanda máxima anual de água atenderia às exigências do Estado de Nevada para que a extração de água não esgote as reservas das bacias hidrográficas. Além disso, os impactos oriundos da retirada prevista da água seriam inferiores se comparados com o nível de extração de água previamente existente na área.

#### **d. Impactos nos recursos biológicos e no solo**

A análise dos impactos da construção do repositório de *Yucca Mountain* nos recursos biológicos e no solo considerou como a região de influência a área que contém todas as perturbações da superfície potenciais mais áreas adicionais para avaliar as populações dos animais locais.

A avaliação dos impactos aos recursos biológicos e solos considerou os efeitos potenciais à vegetação e aos animais selvagens incluindo as espécies em situação especial de proteção e seus habitats; os pântanos; as áreas ribeirinhas e os recursos do solo. Também foi analisado o impacto potencial nos padrões migratórios e nas populações de animais de caça.

O DOE avaliou que os impactos globais aos recursos biológicos seriam pequenos. A remoção da vegetação da área para a construção e operação do repositório e as intervenções consideradas pequenas em algumas espécies selvagens não afetaria a biodiversidade regional tampouco o bom funcionamento do ecossistema (Quadro 1).

No caso da flora, o período de construção envolveria a remoção de até 9 km<sup>2</sup> de vegetação e a perda máxima de qualquer tipo de cobertura do solo seria de 0,25%. Nos períodos de operação, monitoramento e encerramento o impacto seria ainda menor. A fauna apresentaria perda de uma pequena quantidade de hábitat e de alguns membros de algumas espécies durante o período de construção do depósito. Os outros períodos representariam um impacto menos significativo. No caso das espécies em situação especial de proteção, a avaliação da DOE averiguou que haveria uma pequena perda de habitat de deserto de tartarugas e consequentemente perda de uma pequena quantidade de tartarugas. Contudo, a DOE afirma que esse impacto não afetaria o ecossistema de forma significativa. Os outros períodos de análise representariam um impacto ainda menor. Avaliou-se também que os impactos em pântanos seriam nulos em qualquer período de análise.

**Quadro 1 - Resumo dos impactos nos recursos biológicos e solos no período de construção, operação, monitoramento e fechamento do repositório de *Yucca Mountain***

Período	Flora	Fauna	Espécies em situação especial de proteção	Pântanos	Impacto Global
Construção	Pequeno. Remoção de até 9 km <sup>2</sup> de vegetação em áreas disseminadas. A perda máxima de qualquer tipo de cobertura do solo seria de 0,25%.	Pequeno. Perda de uma pequena quantidade de habitats e de alguns membros de algumas espécies.	Pequeno. Perda de uma quantidade pequena de habitat de deserto de tartarugas e de uma pequena quantidade de tartarugas.	Nenhum.	Pequeno. Perda pequena de habitats dispersos e perda de pequeno número de animais.
Operação	Pequeno. Perturbação reduzida da vegetação em áreas adjacentes às áreas com atividades.	Pequeno. Morte de uma pequena quantidade de animais devido a acidentes de trânsito e atividades humanas.	Pequeno. Morte de uma pequena quantidade de animais devido a acidentes de trânsito.	Nenhum.	Pequeno. Perturbação em tipos de coberturas comuns de solo e poucas mortes de animais.
Monitoramento	Pequeno. Não há perturbações adicionais à vegetação natural.	Pequeno. Impacto similar ao observado no período de operação com menor intensidade devido à menor atividade humana.	Pequeno. Impacto similar ao observado no período de operação com menor intensidade devido à menor atividade humana.	Nenhum.	Pequeno. Diminuição dos impactos devido à menor atividade humana.
Encerramento	Pequeno. Diminuição dos impactos devido à menor atividade humana.	Pequeno. Diminuição dos impactos devido à menor atividade humana.	Pequeno. Diminuição dos impactos devido à menor atividade humana.	Nenhum.	Pequeno. Diminuição dos impactos devido à menor atividade humana.
Avaliação global	Pequeno	Pequeno	Pequeno	Nenhum	Pequeno

Fonte: Doe (2008).

#### **e. Impactos à saúde e segurança da população**

O próximo critério de análise é direcionado para os impactos à vida humana. Nessa seção serão descritos os impactos potenciais à saúde e segurança dos trabalhadores do repositório (impactos ocupacionais) e à população não trabalhadora do repositório (impactos públicos) nos períodos de construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório proposto.

Os impactos públicos são aqueles que influenciarão as pessoas localizadas fora da área reservada ao depósito. A análise estima os impactos de saúde ocupacional e segurança separadamente para os trabalhadores envolvidos e não envolvidos para cada período. Os trabalhadores envolvidos seriam as pessoas responsáveis pela operação do repositório e estariam diretamente envolvidos nas atividades de construção, instalação e operação (escavação, recebimento, manuseio, embalagem, colocação do combustível irradiado e dos resíduos radioativos de alto nível, monitoramento das condições e desempenho dos pacotes de resíduos e encerramento do repositório). Os trabalhadores não envolvidos seriam o pessoal administrativo, técnicos e supervisores que não estariam diretamente envolvidos no funcionamento do depósito. A análise também foi separada entre os impactos não radiológicos e os impactos radiológicos.

##### *i Impactos não radiológicos*

Para essa análise, a duração total do projeto seria de 105 anos e seria composta por um período de construção de 5 anos, um período de operações de 50 anos, um período de monitoramento de 50 anos e um período de encerramento de 10 anos que se sobrepõe aos últimos 10 anos do período de monitoramento. As estimativas foram feitas com base no banco de dados da DOE e do Departamento Americano de Estatísticas do Trabalho (U.S. *Department of Labor Bureau of Labor Statistics*).

A análise averiguou que é improvável a ocorrência de impactos não acidentais na saúde da população externa às atividades do depósito. Já os impactos potenciais não radiológicos à saúde e segurança dos trabalhadores poderiam ocorrer a partir de acidentes industriais, da exposição à cristobalita e de engenhos explosivos não detonados. Os impactos potenciais não

radiológicos à saúde do público em geral podem ocorrer a partir da exposição aos lançamentos naturais de materiais perigosos (cristobalita) e de poluentes.

O total de casos graves é referente ao número de mortes relacionadas ao trabalho, doenças ou lesões que resultaram em perda da consciência do trabalhador, em restrição à realização do trabalho ou de movimentação, em transferência para outro emprego ou em necessidade de atendimento médico além dos primeiros socorros. Também foram considerados os casos de perda de dia de trabalho (ausências ou restrição à realização das atividades) e a ocorrência de fatalidades (morte resultante das atividades relacionadas ao trabalho).

A Tabela 7 resume os impactos não radiológicos à saúde dos trabalhadores nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain*.

No total, as atividades previstas para os períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain* ocasionarão aos trabalhadores, 1.800 casos graves com a ocorrência de 800 dias perdidos de trabalho no período de 105 anos e com a ocorrência de 0,92 fatalidade.

**Tabela 7 - Impactos não radiológicos à saúde dos trabalhadores nos períodos de construção, operação, manutenção e encerramento de *Yucca Mountain*.**

Período	Tipo de impacto	Quantidade
Construção	Total de casos graves	150
	Perda de dia de trabalho	66
	Fatalidades	0,044
Operação	Total de casos graves	910
	Perda de dia de trabalho	400
	Fatalidades	0,33
Manutenção	Total de casos graves	380
	Perda de dia de trabalho	160
	Fatalidades	0,36



Encerramento	Total de casos graves	370
	Perda de dia de trabalho	180
	Fatalidades	0,2
Total	Total de casos graves	1.800
	Perda de dia de trabalho	800
	Fatalidades	0,92

Fonte: Elaboração própria com dados do DOE (2008).

#### f. Outros Impactos

O relatório do Departamento de Energia dos Estados Unidos fez outras avaliações que não serão detalhadas nesse trabalho por não apresentarem relevância significativa para o caso brasileiro a ser discutido no Capítulo 4.

Os outros impactos analisados para o período de construção, operação, monitoramento e encerramento do depósito de *Yucca Mountain* foram:

- Impactos socioeconômicos (como a geração de empregos);
- Impactos nos recursos culturais;
- Impactos na cadeia industrial (fabricação dos insumos e produtos utilizados no depósito);
- Riscos e impactos potenciais com a ocorrência de acidentes naturais, acidentes causados por humanos e também interferências intencionais (sabotagem, ações terroristas etc.);
- Impactos gerados por ruídos;
- Gestão de resíduos gerados pela construção, operação, monitoramento e encerramento do repositório (a análise averiguou que a geração de resíduos seria pequena).

## APÊNDICE B - IMPACTOS AMBIENTAIS APÓS O ENCERRAMENTO DO DEPÓSITO GEOLÓGICO DE *YUCCA MOUNTAIN*

### a. Impactos químicos

O Departamento de Energia também avaliou os impactos da liberação de componentes químicos no longo prazo. Foi realizada uma análise conservadora que assumiu uma taxa constante de liberação de materiais quimicamente tóxicos e considerou que a liberação afetaria diretamente a qualidade da água consumida pelo Indivíduo com Razoável Exposição Máxima.

A Tabela lista as concentrações e compara o consumo resultante da liberação com a dose máxima de referência por via oral definida pela EPA. Ela expressa a dose com base no consumo diário de 2 litros de água por uma pessoa de 70 kg. A dose de referência representa uma exposição diária que não apresenta risco ao indivíduo mesmo que a água seja consumida durante todo o período de vida. Conforme exposto na Tabela 1, todos os impactos estimados estariam abaixo do limite definido pela EPA.

**Tabela 1 – Impacto da liberação de materiais tóxicos durante 10 mil anos após o encerramento do repositório de *Yucca Mountain***

Material	Concentração estimada (mg/l)	Consumo diário (mg/kg)	Limite de consumo diário (mg/kg)
Molibdênio	0,042	0,0012	0,005
Níquel	0,19	0,0054	0,02
Vanádio	0,00019	0,0000054	0,007

Fonte: DOE (2008).

### b. Impactos nos recursos biológicos e solo

Também foi analisado se o repositório afetaria os recursos biológicos nas proximidades de *Yucca Mountain* após o encerramento das atividades

através do aquecimento da superfície do solo e da exposição à radiação como resultado de migração de radionuclídeos através de águas subterrâneas.

No caso do aquecimento do solo, foram analisados os impactos no solo ao sofrer uma carga de calor de 85 toneladas de metais pesados por acre. A variação estimada é de 0,2 °C a 6,0 °C. A temperatura do solo da superfície iria começar a aumentar a partir de 200 anos após o encerramento do repositório e atingiria o pico em cerca de 1.000 anos após o encerramento. A temperatura então diminuiria gradualmente e se aproximaria das condições anteriores ao repositório depois de 10 mil anos. O aumento máximo da temperatura poderia ocorrer diretamente no solo acima do repositório e afetaria aproximadamente 5 km<sup>2</sup>. Os efeitos do calor do repositório sobre a temperatura do solo iria diminuir gradualmente com a distância a partir do repositório. O aumento estimado da temperatura se estenderia até 500 metros para além da fronteira da área do repositório.

A mudança na composição de espécies de plantas seria limitada à área num raio de 500 metros da entrada da área do repositório (cerca de 8 km<sup>2</sup>). A mudança na comunidade de plantas provavelmente levaria a mudanças localizadas nas comunidades de animais que dependem delas para alimentação e abrigo.

A mudança de temperatura geraria impactos aos recursos biológicos que provavelmente consistiria de um aumento de espécies tolerantes ao calor e uma diminuição de espécies menos tolerantes. Em geral, as áreas que poderiam ser afetadas pelo aquecimento do repositório poderiam experimentar uma perda de espécies arbustivas e um aumento de espécies anuais (apresentam apenas uma geração durante o ano).

De acordo com o relatório, a exposição de plantas e animais à radiação seria muito abaixo do limite sugerido pela Agência Internacional de Energia Atômica mesmo para espécies mais radiosensíveis. Assim, a radiação não causaria efeito algum nos recursos biológicos do local.

Porém, impactos na superfície do solo seriam possíveis. Alterações na comunidade de plantas, devido a variações na temperatura do solo, podem levar a um aumento do escoamento das chuvas e, conseqüentemente, um aumento na erosão dos solos superficiais. Essa alteração aumentaria a carga

de sedimentos na água de superfície ao redor de *Yucca Mountain*. Infelizmente, o impacto dessa carga de sedimentos é indeterminado.

**c. Outros impactos**

Outros impactos também foram avaliados após o encerramento do repositório de *Yucca Mountain*. O Departamento de Energia analisou as possíveis consequências de uma intrusão humana no depósito e averiguou que mesmo com uma taxa elevada de corrosão das barreiras de acesso, a intrusão só seria possível após 200 mil anos. Em outras palavras, a avaliação considerou praticamente impossível a intrusão humana no repositório. E mesmo que a intrusão ocorra, a dose média anual estimada de uma intrusão humana 200.000 anos após o encerramento do repositório é de menos de 0,01 mrem, ou cerca de 0,003% do limite estimado pela EPA (350 mrem).

Também foi avaliada a probabilidade de ocorrência de algum evento crítico externo. Este evento, embora altamente improvável, poderia ocorrer se houvesse uma liberação de material físsil suficiente a partir do pacote de resíduos. A probabilidade de um evento crítico externo ocorrer no repositório após o encerramento do repositório foi estimada como muito baixa para ser considerada.

**APÊNDICE C - INCIDÊNCIA ANUAL DE FATALIDADE POR CÂNCER, DE CÂNCER NÃO FATAL E DE EFEITOS SEVEROS HEREDITÁRIOS**

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
1	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
2	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
3	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
4	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
5	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
6	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
7	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
8	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
9	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
10	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
11	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
12	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
13	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
14	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
15	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
16	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
17	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
18	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
19	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
20	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
21	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
22	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
23	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
24	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
25	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
26	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
27	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
28	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
29	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
30	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
31	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
32	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
33	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
34	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
35	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
36	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
37	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
38	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
39	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
40	4,19E-03	8,38E-04	8,38E-04
41	4,18E-03	8,24E-04	8,24E-04
42	4,16E-03	8,10E-04	8,10E-04
43	4,15E-03	7,96E-04	7,96E-04
44	4,13E-03	7,82E-04	7,82E-04
45	4,12E-03	7,68E-04	7,68E-04

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
46	4,11E-03	7,54E-04	7,54E-04
47	4,09E-03	7,40E-04	7,40E-04
48	4,08E-03	7,26E-04	7,26E-04
49	4,06E-03	7,12E-04	7,12E-04
50	4,05E-03	6,98E-04	6,98E-04
51	4,04E-03	6,84E-04	6,84E-04
52	4,02E-03	6,70E-04	6,70E-04
53	4,01E-03	6,56E-04	6,56E-04
54	3,99E-03	6,42E-04	6,42E-04
55	3,98E-03	6,29E-04	6,29E-04
56	3,97E-03	6,15E-04	6,15E-04
57	3,95E-03	6,01E-04	6,01E-04
58	3,94E-03	5,87E-04	5,87E-04
59	3,92E-03	5,73E-04	5,73E-04
60	3,91E-03	5,59E-04	5,59E-04
61	3,90E-03	5,45E-04	5,45E-04
62	3,88E-03	5,31E-04	5,31E-04
63	3,87E-03	5,17E-04	5,17E-04
64	3,85E-03	5,03E-04	5,03E-04
65	3,84E-03	4,89E-04	4,89E-04
66	3,83E-03	4,75E-04	4,75E-04
67	3,81E-03	4,61E-04	4,61E-04
68	3,80E-03	4,47E-04	4,47E-04
69	3,78E-03	4,33E-04	4,33E-04

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
70	3,77E-03	4,19E-04	4,19E-04
71	3,76E-03	4,05E-04	4,05E-04
72	3,74E-03	3,91E-04	3,91E-04
73	3,73E-03	3,77E-04	3,77E-04
74	3,72E-03	3,63E-04	3,63E-04
75	3,70E-03	3,49E-04	3,49E-04
76	3,69E-03	3,35E-04	3,35E-04
77	3,67E-03	3,21E-04	3,21E-04
78	3,66E-03	3,07E-04	3,07E-04
79	3,65E-03	2,93E-04	2,93E-04
80	3,63E-03	2,79E-04	2,79E-04
81	3,62E-03	2,65E-04	2,65E-04
82	3,60E-03	2,51E-04	2,51E-04
83	3,59E-03	2,37E-04	2,37E-04
84	3,58E-03	2,23E-04	2,23E-04
85	3,56E-03	2,10E-04	2,10E-04
86	3,55E-03	1,96E-04	1,96E-04
87	3,53E-03	1,82E-04	1,82E-04
88	3,52E-03	1,68E-04	1,68E-04
89	3,51E-03	1,54E-04	1,54E-04
90	3,49E-03	1,40E-04	1,40E-04
91	3,48E-03	1,26E-04	1,26E-04
92	3,46E-03	1,12E-04	1,12E-04
93	3,45E-03	9,78E-05	9,78E-05



Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
94	3,44E-03	8,38E-05	8,38E-05
95	3,42E-03	6,98E-05	6,98E-05
96	3,41E-03	5,59E-05	5,59E-05
97	3,39E-03	4,19E-05	4,19E-05
98	3,38E-03	2,79E-05	2,79E-05
99	3,37E-03	1,40E-05	1,40E-05
100	3,35E-03	6,50E-15	6,50E-15
101	3,34E-03	0	0
102	3,32E-03	0	0
103	3,31E-03	0	0
104	3,30E-03	0	0
105	3,28E-03	0	0
106	3,27E-03	0	0
107	3,25E-03	0	0
108	3,24E-03	0	0
109	3,23E-03	0	0
110	3,21E-03	0	0
111	3,20E-03	0	0
112	3,18E-03	0	0
113	3,17E-03	0	0
114	3,16E-03	0	0
115	3,14E-03	0	0
116	3,13E-03	0	0
117	3,11E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
118	3,10E-03	0	0
119	3,09E-03	0	0
120	3,07E-03	0	0
121	3,06E-03	0	0
122	3,04E-03	0	0
123	3,03E-03	0	0
124	3,02E-03	0	0
125	3,00E-03	0	0
126	2,99E-03	0	0
127	2,97E-03	0	0
128	2,96E-03	0	0
129	2,95E-03	0	0
130	2,93E-03	0	0
131	2,92E-03	0	0
132	2,91E-03	0	0
133	2,89E-03	0	0
134	2,88E-03	0	0
135	2,86E-03	0	0
136	2,85E-03	0	0
137	2,84E-03	0	0
138	2,82E-03	0	0
139	2,81E-03	0	0
140	2,79E-03	0	0
141	2,78E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
142	2,77E-03	0	0
143	2,75E-03	0	0
144	2,74E-03	0	0
145	2,72E-03	0	0
146	2,71E-03	0	0
147	2,70E-03	0	0
148	2,68E-03	0	0
149	2,67E-03	0	0
150	2,65E-03	0	0
151	2,64E-03	0	0
152	2,63E-03	0	0
153	2,61E-03	0	0
154	2,60E-03	0	0
155	2,58E-03	0	0
156	2,57E-03	0	0
157	2,56E-03	0	0
158	2,54E-03	0	0
159	2,53E-03	0	0
160	2,51E-03	0	0
161	2,50E-03	0	0
162	2,49E-03	0	0
163	2,47E-03	0	0
164	2,46E-03	0	0
165	2,44E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
166	2,43E-03	0	0
167	2,42E-03	0	0
168	2,40E-03	0	0
169	2,39E-03	0	0
170	2,37E-03	0	0
171	2,36E-03	0	0
172	2,35E-03	0	0
173	2,33E-03	0	0
174	2,32E-03	0	0
175	2,30E-03	0	0
176	2,29E-03	0	0
177	2,28E-03	0	0
178	2,26E-03	0	0
179	2,25E-03	0	0
180	2,23E-03	0	0
181	2,22E-03	0	0
182	2,21E-03	0	0
183	2,19E-03	0	0
184	2,18E-03	0	0
185	2,16E-03	0	0
186	2,15E-03	0	0
187	2,14E-03	0	0
188	2,12E-03	0	0
189	2,11E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
190	2,10E-03	0	0
191	2,08E-03	0	0
192	2,07E-03	0	0
193	2,05E-03	0	0
194	2,04E-03	0	0
195	2,03E-03	0	0
196	2,01E-03	0	0
197	2,00E-03	0	0
198	1,98E-03	0	0
199	1,97E-03	0	0
200	1,96E-03	0	0
201	1,94E-03	0	0
202	1,93E-03	0	0
203	1,91E-03	0	0
204	1,90E-03	0	0
205	1,89E-03	0	0
206	1,87E-03	0	0
207	1,86E-03	0	0
208	1,84E-03	0	0
209	1,83E-03	0	0
210	1,82E-03	0	0
211	1,80E-03	0	0
212	1,79E-03	0	0
213	1,77E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
214	1,76E-03	0	0
215	1,75E-03	0	0
216	1,73E-03	0	0
217	1,72E-03	0	0
218	1,70E-03	0	0
219	1,69E-03	0	0
220	1,68E-03	0	0
221	1,66E-03	0	0
222	1,65E-03	0	0
223	1,63E-03	0	0
224	1,62E-03	0	0
225	1,61E-03	0	0
226	1,59E-03	0	0
227	1,58E-03	0	0
228	1,56E-03	0	0
229	1,55E-03	0	0
230	1,54E-03	0	0
231	1,52E-03	0	0
232	1,51E-03	0	0
233	1,49E-03	0	0
234	1,48E-03	0	0
235	1,47E-03	0	0
236	1,45E-03	0	0
237	1,44E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
238	1,42E-03	0	0
239	1,41E-03	0	0
240	1,40E-03	0	0
241	1,38E-03	0	0
242	1,37E-03	0	0
243	1,35E-03	0	0
244	1,34E-03	0	0
245	1,33E-03	0	0
246	1,31E-03	0	0
247	1,30E-03	0	0
248	1,28E-03	0	0
249	1,27E-03	0	0
250	1,26E-03	0	0
251	1,24E-03	0	0
252	1,23E-03	0	0
253	1,22E-03	0	0
254	1,20E-03	0	0
255	1,19E-03	0	0
256	1,17E-03	0	0
257	1,16E-03	0	0
258	1,15E-03	0	0
259	1,13E-03	0	0
260	1,12E-03	0	0
261	1,10E-03	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
262	1,09E-03	0	0
263	1,08E-03	0	0
264	1,06E-03	0	0
265	1,05E-03	0	0
266	1,03E-03	0	0
267	1,02E-03	0	0
268	1,01E-03	0	0
269	9,92E-04	0	0
270	9,78E-04	0	0
271	9,64E-04	0	0
272	9,50E-04	0	0
273	9,36E-04	0	0
274	9,22E-04	0	0
275	9,08E-04	0	0
276	8,94E-04	0	0
277	8,80E-04	0	0
278	8,66E-04	0	0
279	8,52E-04	0	0
280	8,38E-04	0	0
281	8,24E-04	0	0
282	8,10E-04	0	0
283	7,96E-04	0	0
284	7,82E-04	0	0
285	7,68E-04	0	0



Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
286	7,54E-04	0	0
287	7,40E-04	0	0
288	7,26E-04	0	0
289	7,12E-04	0	0
290	6,98E-04	0	0
291	6,84E-04	0	0
292	6,70E-04	0	0
293	6,56E-04	0	0
294	6,42E-04	0	0
295	6,29E-04	0	0
296	6,15E-04	0	0
297	6,01E-04	0	0
298	5,87E-04	0	0
299	5,73E-04	0	0
300	5,59E-04	0	0
301	5,45E-04	0	0
302	5,31E-04	0	0
303	5,17E-04	0	0
304	5,03E-04	0	0
305	4,89E-04	0	0
306	4,75E-04	0	0
307	4,61E-04	0	0
308	4,47E-04	0	0
309	4,33E-04	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
310	4,19E-04	0	0
311	4,05E-04	0	0
312	3,91E-04	0	0
313	3,77E-04	0	0
314	3,63E-04	0	0
315	3,49E-04	0	0
316	3,35E-04	0	0
317	3,21E-04	0	0
318	3,07E-04	0	0
319	2,93E-04	0	0
320	2,79E-04	0	0
321	2,65E-04	0	0
322	2,51E-04	0	0
323	2,37E-04	0	0
324	2,23E-04	0	0
325	2,10E-04	0	0
326	1,96E-04	0	0
327	1,82E-04	0	0
328	1,68E-04	0	0
329	1,54E-04	0	0
330	1,40E-04	0	0
331	1,26E-04	0	0
332	1,12E-04	0	0
333	9,78E-05	0	0

Momento (T)	Incidência anual de fatalidade por câncer	Incidência anual de câncer não fatal	Incidência anual de efeitos severos hereditários
334	8,38E-05	0	0
335	6,98E-05	0	0
336	5,59E-05	0	0
337	4,19E-05	0	0
338	2,79E-05	0	0
339	1,40E-05	0	0
340	3,25E-14	0	0

Fonte: Elaboração própria com dados de Aguiar (2006) e Menzel (2014).