UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA AMBIENTAL
PROCAM**

LUIS ANTÔNIO LACERDA AÍMOLA

**Cascatas de Incertezas, Impactos Climáticos Perigosos e Negociações
Internacionais Sobre Mudança de Clima Global.**

Um Modelo Exploratório

**São Paulo
2006**

LUIS ANTÔNIO LACERDA AÍMOLA

Cascatas de Incertezas, Impactos Climáticos Perigosos e Negociações
Internacionais sobre Mudança de Clima Global

Um Modelo Exploratório

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo para a
obtenção do grau de Doutor em Ciência Ambiental

Orientador: **Pedro Leite da Silva Dias**

São Paulo
2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

Luis Antônio Lacerda Aímola

Cascata de Incertezas, Impactos Climáticos Perigosos e Negociações Internacionais sobre Mudança de Clima Global - Um Modelo Exploratório.

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em
Ciência Ambiental da Universidade de São Paulo para a
obtenção do grau de Doutor em Ciência Ambiental

APROVADA EM: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ **Assinatura:** _____

Errata

[illegible]

Em memória de minha mãe, Magda.

*Dedico este trabalho ao meu pai,
Antônio Aímola, meu amigo das horas mais difíceis.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro por todo o curso de doutorado. Agradeço ao meu orientador Professor Pedro Leite da Silva Dias por seu apoio e constante estímulo dado ao projeto. O Professor Pedro foi peça chave em muitos momentos que necessitei de orientação e suporte para dar andamento a este projeto. A excelente pessoa e profissional que ele é me ensinou muito, além dos assuntos da ciência e da academia.

Agradecimentos vão também aos Professores do PROCAM, Ricardo Abramovay e Pedro Roberto Jacobi. Agradeço ao Professor Roberto Guena de Oliveira por seu apoio na primeira fase da pós-graduação, até minha passagem ao Doutorado. Um agradecimento especial à Professora. Marie Gabrielle Piketty do CIRAD pelo estímulo e pelo empenho em me proporcionar um estágio na França para aprender a modelar com o CORMAS. A Christofe Le Page e Pierre Bommel, do Grupo Green no CIRAD em Montpellier meus sinceros agradecimentos pela recepção e apoio. Ao Luciano de Souza e à Maria José, secretários acadêmicos do PROCAM por todas as orientações e sugestões durante o doutorado.

Agradeço às seguintes pessoas pelas conversas muito instrutivas e a atenção dada ao meu trabalho em seminários que realizei: Professores Gylvan Meira Filho, Luiz Pinguelli Rosa, Enéas Salati, Dr. Israel Klabin, e a todo pessoal do IVIG na UFRJ; Professores Carlos Nobre, Wagner Costa Ribeiro; Professores Jaime Simão Sichman, Eliezer Martins Diniz e Humberto Ribeiro da Rocha.

Agradeço de forma especial ao meu pai Antônio Aímola por seu apoio incondicional ao meu trabalho. À minha esposa Ligia, meu eterno amor, a profunda alegria

por sua cumplicidade no projeto, desde suas origens, para fazermos um doutorado que resgatasse nossos sonhos. Sou muito grato a ela por seu estímulo e suporte durante todo o tempo em que me dediquei ao doutorado e a sua extrema dedicação e paciência no difícil período de conclusão desta tese. Não posso deixar de agradecer ao meu irmão, Maurício, pelo estímulo dado a este empreendimento. Muitos foram os que me ajudaram direta ou indiretamente, e seria impossível nomeá-los todos, mas não posso deixar de registrar um nome: à minha amiga Silvia Simão Cavalcante, meu profundo agradecimento por todos estes anos de amizade e por acreditar também nesse sonho.

RESUMO

O problema das mudanças climáticas globais somente pode ser resolvido através de um longo processo de coordenação política internacional no qual os principais atores são os governos dos Estados Nacionais. O Protocolo de Quioto é o primeiro acordo internacional para controlar as emissões de gases de efeito estufa, e muitas outras rodadas de negociações ocorrerão ao longo deste século gerando novos acordos com o mesmo objetivo. Inúmeros fatores, relacionados de forma complexa, têm influenciado e influenciarão os resultados desses futuros acordos. Dentre os principais estão as incertezas sobre os vários aspectos, físicos, biológicos, econômicos e políticos, do problema das mudanças climáticas.

O objetivo deste trabalho foi construir um modelo de análise integrada, que tornasse transparente os principais elementos e elos da cascata de incertezas existente no problema das mudanças climáticas e a sua influência nos resultados daquelas negociações e nos permitisse fazer simulações exploratórias sobre os efeitos da evolução dessas incertezas sobre os resultados da sequência de negociações após o Protocolo de Quioto.

O modelo representa de forma estilizada importantes elementos que participam da estrutura de decisão coletiva sobre abatimento de reduções de emissões e em alguns aspectos é mais realista que vários modelos existentes sobre tomada de decisões sobre mudança de clima. Ele é composto de um módulo que representa o sistema do clima, um módulo que representa as economias nacionais, um módulo que representa os tomadores de decisões governamentais e um módulo que representa as negociações sobre reduções de emissões. Os tomadores de decisões são representados como agentes que têm planos de desenvolvimento econômico para seus países e modelos sobre como o clima global e regional e as suas economias funcionam, o que lhes permite fazerem projeções futuras do

aquecimento global, das suas economias e emissões, e do impacto que a mudança de clima produzirá em seu território. Dessa forma podem estimar o impacto que o aquecimento global poderá ter sobre seus planos de desenvolvimento. Essas análises são feitas dentro de um horizonte de antecipação que depende do grau de incertezas na época em que as projeções são realizadas. Representamos algumas das principais incertezas na ciência do clima e análise econômica do problema através de distribuições de probabilidades de certos parâmetros chave, tais como a sensibilidade climática e a difusividade térmica do Oceano, que podem variar ao longo do tempo. Existe uma infinidade de cenários possíveis de evolução dessas incertezas, mas somente alguns com significados intuitivos importantes. Uma negociação sobre cotas de reduções de emissões é representada como um jogo não-cooperativo, e o acordo entre os países é um equilíbrio de Nash desse jogo.

Cada governo, antes de ir à mesa de negociações, baseado nestas projeções e nas possíveis ações dos outros governos, elabora suas estratégias sobre o quanto abater de suas emissões. O resultado final de um jogo é influenciado pelas distribuições de probabilidades que representam as incertezas da época em que cada agente faz suas projeções. Algumas distribuições em algumas épocas podem revelar aos agentes a probabilidade de impactos climáticos perigosos em suas economias, influenciando fortemente as suas escolhas de abatimento e o resultados das negociações. Esse ciclo de projeções-análise-negociação se repete várias vezes ao longo do tempo definindo uma sequência de acordos de reduções de emissões, um conseqüente aquecimento global e uma distribuição de impactos regionais ao longo do mesmo período. A comparação das trajetórias finais de aquecimento e impactos gerados para cada cenário escolhido de evolução das incertezas ajuda-nos a compreender as possíveis evoluções das futuras negociações sobre abatimento de emissões.

Implementamos uma versão simplificada do modelo em um programa de computador através da plataforma Microsoft Excel®, considerando somente dois blocos de países. Com esse protótipo, é possível simular cenários de evolução das incertezas, representando evoluções possíveis da ciência do clima e a análise econômica do problema, e com isso estudar a influência dessas evoluções nos resultados de uma sequência de negociações sobre cotas de reduções de emissões entre dois blocos de países, que uma vez definidos os valores de certos parâmetros, podem representar os países do Anexo I e Não-Anexo I da Convenção Quadro de Mudança de Clima das Nações Unidas. Nesse caso o Protocolo de Quioto é o primeiro acordo de uma série de acordos ao longo do Século XXI.

O modelo foi construído apoiando-se na literatura tradicional de modelagem integrada em mudanças climáticas, mas inova a pesquisa nesta área em vários pontos importantes. Dentre eles está a variação gradual de várias incertezas e a incorporação de uma interpretação do conceito de impactos climáticos perigosos conforme o Artigo 2 da Convenção Quadro e seu papel nos resultados das negociações. A linguagem e a plataforma utilizada nos permite comunicar de forma clara os elos da cascata de incertezas e sua influência sobre as negociações, tanto a cientistas, quanto a analistas econômicos e políticos envolvidos com o tema. A plataforma utilizada torna também o programa aberto para análises críticas e modificações a uma larga classe de analistas do tema, além de poder ser utilizado no ensino, que ainda carece de ferramentas pedagógicas que permitam uma ampla divulgação desse tema a não especialistas. Apesar de ser um modelo sobre mudanças climáticas, os vários módulos têm uma estrutura conceitual que lhes permite serem adaptados para tratar outras questões ambientais globais e regionais onde as soluções baseiam-se em tomada de decisão coletiva negociada e sob incertezas.

ABSTRACT

The problem of the global climate change only can to be solved through a long term process of international political coordination which the principal actors are the governments of the National States. The Kyoto Protocol is the first international agreement to control the greenhouse gas (GHG) emissions, and the others rounds of negotiations will happen through this century producing new deals with the same goal. A number of factors related of a complex way, have influenced and will influence the results of these future agreements. Among the principal factors, are the uncertainties about the physical, biological, ecological, economical and political aspects of the global climate change problem.

The goal of this work was to construct a integrated assessment model, that show in a transparent way some the majors elements and links of the uncertainties cascade that exist in the problem of the climate change, and their influence on the results on that negotiations. The model permit us to make exploratory simulations about the effects of the evolution that uncertainties in the results of the sequence of negotiations after the Kyoto Protocol.

The model represent in a stylized way important elements that participate in the structure of collective decision making about abatement of GHG emissions and in some aspects is more realistic that several existent models on decision making about climate change. It is composed of one module that represent the climate system, one module that represent the national economies, one module that represent the governmental decision makers and one module that represent the negotiations about reductions of GHG emissions.

The climate model include a carbon cycle and an energetic balance simple models with white noise in the radiative forcing to represent the natural climate variability. The economic models include abrupt changes in the damages functions. The The decision

makers are represented as agents that have economical development plans for their countries and have models of the climate change and their national economies. These models permit to each one make projections on future global warming, economical growth, emissions and the climate impacts on each territory. Thus each agent can estimate the impact of the global warming on his development plan under a action of abatement of emissions. These analysis are made with the aid of a anticipation horizon that depends of the uncertainty levels in the epoch which the projections are made.

We represented some of majors uncertainties in the climate science and economic analysis on the problem through probabilities distributions of certain key parameters, such that the climate sensibility and the ocean thermal diffusivity, which can to vary in time. There is a number of possible evolution scenarios for these uncertainties, but only a few with important intuitive means. We take only these more important scenarios to simulation.

A negotiation on reduction quotas of emissions is represented as a non-cooperative game and the agreement between countries is a Nash equilibrium of the game. Each government before to negotiate choose his strategies on how much abate emissions based on his projections. The game final result is influenced by the probabilities distributions that represent the uncertainties in the epoch of the negotiations. Some distributions can reveal high probabilities for dangerous climate impacts in their economies, influencing strongly the choices of emission abatements and the results of negotiations.

The cycle of projection-analysis–negotiation can to repeat many times defining a sequence of agreements and then a emission trajectory, and as consequence a global warming and distributions of regional impacts. The comparison of final trajectories of warming and impacts for each negotiations sequence help us to understand the possible evolutions of future negotiations and his role in the climate change problem.

We implemented a simplified version of the model in a computer program in the Microsoft Excel® platform considering only two blocs of countries. With this prototype is possible simulate scenarios of evolution of uncertainties representing possible evolutions of the climate science and economic analysis. It is also possible to study the influence of these evolutions on the negotiation results between two blocs of countries that can play the role of the Annex I and non-Annex I countries in the Framework Convention of Climate Change of United Nations. In this case the Kyoto Protocol is the first negotiation in a sequence of agreements through this century.

The model was built from the traditional literature of integrated modelling on climate change, but innovate the research in this area in several important points. Among others is agents that have models of the climate and economies, the gradual time variation of uncertainties and the incorporation of a interpretation of the concept of dangerous impacts present in the Article 2 of the Framework Convention and a its possible role on the negotiation results. The modelling a long sequence of climate negotiations is a innovation too.

The language and the platform used permit us to communicate in a clear manner the links of the uncertainties cascade and its influence in the negotiations, for both scientists and policy makers involved with the problem. The platform used turn the program open to criticism and modifications for a large class of analysts and can be used in learning in high school. In despite the model be on climate change, the modules have a conceptual structure that can be adapted to treat other environmental questions, global and local, where the solutions are based on collective decision making by negotiation under uncertainties.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Legenda	Página
	Introdução	
I.1	Os dois tipos básicos de respostas que as sociedades podem dar às mudanças climáticas. A mitigação de emissões é uma medida preventiva, que torna mais lento o aquecimento global. A adaptação planejada é uma medida que visa atenuar os impactos das mudanças de clima, através de ações sobre os ecossistemas e economias. (Modificado de (Carter, 1992)	30
I.2	Argolas entrelaçadas representando as três dimensões que estruturam a dinâmica das negociações internacionais sobre mudança do clima. Essas dimensões se entrelaçam produzindo uma dinâmica complexa.	34
I.3	Representação esquemática da cadeia causal das mudanças climáticas. As atividades econômicas geram emissões de GEE, que se acumulam na atmosfera, aumentando o desequilíbrio radiativo e aumentando a temperatura da superfície do globo. Este aumento é acompanhado por mudanças climáticas que produzem impactos nos ecossistemas e economias afetando as atividades econômicas negativamente.	41
I.4	Estrutura básica de um modelo integrado Clima-Economia	42
I.5	Estrutura básica de um modelo integrado Clima-Economia baseado em agentes com tomada de decisão endógena.	43
I.6	Estrutura básica do modelo integrado Clima-Economia-Politica baseado em agentes construído no presente trabalho. Ver texto.	45
I.7	Diagrama mostrando a estrutura interna de cada agente, que representa um governo que negocia metas de redução de emissões. O agente tem um modelo interno do clima e economia que lhe permite, a partir de observações e informações sobre as incertezas científicas, projetar cenários de mudanças climáticas futuras e sondar possíveis impactos futuros em sua economia. Por meio de regras de adaptação a novas situações e um critério de decisão ele forma uma posição para a próxima negociação. Na negociação é definido o quanto ele abaterá de emissões e em seguida ele cumpre este acordo.	46
I.8	Os módulos do modelo desenvolvido neste trabalho e o fluxo de informações entre eles. Cada Capítulo constrói uma ou mais partes de cada módulo. No Capítulo 7 realizamos simulações com um protótipo que implementa uma versão simplificada deste modelo.	51
	CAPÍTULO 1	
I.1	O ambiente no qual os governos estão imersos é composto de duas partes: um ambiente físico e econômico, chamado Meio Ambiente de Base; e um	52

ambiente informacional, constituído por distribuições de probabilidades que variam no tempo. Essas distribuições referem-se a alguns parâmetros chave sobre mudanças climáticas e mudam pela ação externa do usuário do modelo. Os dois ambientes não interagem diretamente

1.2	Diagrama da Estrutura do Modelo do Sistema do Clima Global.	55
1.3	Diagrama mostrando a estrutura do modelo típico de uma das economias nacionais do Modelo Econômico Global e seus elos com outros módulos do modelo integrado clima-economia-política. O modelo do sistema econômico é replicado para representar as economias de vários países.	64
1.4	Um exemplo de um mundo com três países, ou Blocos de países, e sua interação com os modelos dos governos e do modelo do clima.	65
1.5	O processo circular de uma economia, segundo Solow, que sustenta os crescimentos per capita do capital e do produto. A técnica é representada por uma Função de Produção do tipo Cobb-Douglas. Para as definições dos símbolos consultar o texto.	68
1.6	O reino das probabilidades e outros métodos para representar incertezas quando se compara o conhecimento sobre os resultados com o conhecimento sobre as probabilidades. Modificado de (DESSAI; HULME, 2003).	80
1.7	O ambiente informacional, denominado Ambiente das Incertezas, é constituído por distribuições de probabilidades que variam no tempo. Essas distribuições referem-se a alguns parâmetros chave sobre mudanças climáticas e mudam pela ação externa do usuário do modelo.	88
1.8	Algumas distribuições de probabilidades típicas usadas neste trabalho, para representar incertezas em alguns parâmetros chave. No exemplo o parâmetro X pode assumir valores no intervalo [0,01; 0,51]. Gráfico gerado no Proclin.	89
1.9	Dois exemplos de transformações graduais de distribuições de probabilidades. (A) Rápida: do centro (linha vermelha) transita para a esquerda em poucos anos, mas gradualmente. (B) Lenta: do centro (linha vermelha) se move para a direita, em muitas décadas e gradualmente.	93
1;10	Dois exemplos de mudança abrupta na distribuição de probabilidades. (A) do centro, (linha vermelha) dá um salto em poucos anos para a esquerda e depois muda gradualmente. (B) do centro embaixo, (linha vermelha), dá um salto em poucos anos para o centro no alto e depois muda gradualmente.	93

CAPÍTULO 2

- 2.1 Opções de resposta de um governo às mudanças climáticas. 98
- 2.2 As opções de mitigação de emissões de GEE. Existem dois tipos de ação: medidas orientadas para a fonte e medidas orientadas para o aumento de sumidouros. Detalhes no texto. 99
- 2.3 Ilustração de uma situação em que um país P_i tem em dois momentos de decisão, k_i e $k_i + p$, $p > 0$, dois conjuntos de opções de abatimento de emissões representados por duas árvores de decisão. Estão indicadas na figura os valores máximos e mínimos para cada conjunto de opções. No exemplo, o número de opções sofre uma redução de cinco opções em k , para três opções em $k+p$. 102
- 2.4 Os modelos climático, $\Delta T M$, de emissões, $E M$, de custos, $C M$, de danos, $D M$ e o critério de escolha Ψ de um decisor individual para escolher metas de abatimento de emissões. As setas representam o fluxo de informações entre os modelos. Baseado em um exemplo de MAI em (LEMPERT ET TAL,1997) 106
- 2.5 Diagrama representando uma metodologia $\Phi_i(k)$ de um governo P_i para analisar e escolher metas de redução e emissões de GE 108
- 2.6 O agente usa no momento de decisão genérico k sua metodologia $\Phi_i(k)$. Esse processo se repete várias vezes ao longo do tempo. 109
- 2.7 Um exemplo das informações analisadas pelo agente em um momento de decisão. O gráfico mostra uma trajetória de elevações de temperatura observadas até o ano 2050 (linha vermelha) e algumas trajetórias futuras possíveis projetadas nesse ano. A linha azul é a trajetória caso não houvesse reduções de emissões a partir desse ano. As outras linhas abaixo desta são trajetórias para algumas alternativas de redução de emissões a partir desta data. 110
- 2.8 Exemplos dos dois horizontes de tempo básicos de um governo ideal. Dois exemplos de $hp(k)$, igual a 10 e 50 anos à frente do momento de decisão. O horizonte de antecipação é $Hp(k) = 100$ anos à frente do momento to de decisão, e poderia ser qualquer outro desde que $HP(k) \geq hp(k)$. 114
- 2.9 Dois exemplos de distribuições de probabilidades hipotéticas $DPr(\lambda_1)$ e $DPr(\lambda_2)$ para dois parâmetros incertos, $\lambda_1 =$ Sensibilidade Climática e $\lambda_2 =$ Inércia Térmica do Oceano em um modelo $MAI_i(k)$ de mudanças climáticas (Gráfico gerado no PROCLIN) 117

- 2.10 Diagrama representando uma metodologia $\Phi_i(k)$ de um governo P_i com parâmetros incertos em seu modelo. O agente atualiza as distribuições de probabilidades e o banco de dados antes de iniciar as simulações. 118
- 2.11 Ilustração de um processo de variação das opções mínima e máxima de abatimento de emissões de um país. Devido à variação das incertezas, bem como dos horizontes de planejamento e antecipação, o agente elevou gradualmente as suas opções mínima e máxima de forma a aumentar a largura do conjunto de opções. 128

CAPÍTULO 3

- 3.1 Estrutura do Modelo Economia-Clima integrado $MAI_i(k)$ de cada governo P_i usado neste trabalho para implementar a tomada de decisões sequenciais de abatimento de emissões. As setas indicam o fluxo de informações entre os submodelos. Ver explicações nas Seções correspondentes a cada submodelo. 133
- 3.2 (A): Ciclo de Operação do Modelo Econômico $E M_i(k)$. Em cada momento k , o agente formula uma hipótese sobre a taxa de crescimento exógena da população, e fixa uma meta exógena da renda per capita, o que o leva a buscar uma taxa de crescimento do PIB. A partir de análises dos cenários das perdas sociais, o agente projeta cenários de crescimento econômico e avalia qual é a melhor política de abatimento. (B) Sequência de Projeções do PIB usando o Ciclo de Operações da figura (A). 139
- 3.3 Exemplos dos dois tipos Projeção BAU do PIB, isto é, sem políticas de mitigação de emissões. (A) trajetórias de crescimento do PIB sem danos climáticos, e (B) com os danos climáticos computados, que produzem perdas econômicas diminuindo a taxa de crescimento. Nos exemplos: (A) $k = 2000$ e $HP(2000) = 100$ anos; (B) $k=2030$, $HP(2030) = 100$ anos. Ver também Seção 3.4.2 (PROCLIN, 2006). 141
- 3.4 Projeções da Intensidade de carbono feitas por um governo no ano $k = 2070$, com o horizonte $hp(2070) = 100$ anos. A curva em azul escuro superior indica a evolução natural da intensidade de carbono, isto é, sem abatimento de emissões. As curvas coloridas descrevem evoluções quando se aplicam algumas metas de abatimento. Quanto mais intensa a política de abatimento mais rapidamente será o decaimento da intensidade de carbono. (PROCLIN, 2006). 144
- 3.5 Duas Projeções BAU das Emissões, isto é, sem considerar políticas de abatimento, $\mu_i(k) = 0$. (A) sem considerar danos climáticos. Aqui $k = 2000$ e $HP(2000) = 100$ anos. (B) computando os danos climáticos. Com $k = 2030$ e $HP(2030) = 100$ anos. Ambas projeções correspondem, 146

respectivamente, às projeções BAU do PIB da Figura 3.3.

- 3.6 (A) Exemplos de projeções da concentração atmosférica de GEE. A curva em azul escuro refere-se à evolução BAU e a curva em azul claro à evolução para uma política de abatimento específica. (B) Projeções do forçamento radiativo correspondentes, respectivamente, a cada caso da figura (A). O momento de decisão é $k = 2020$ e $HP(2020) = 100$ anos. 149
- 3.7 (A) Exemplo de projeções de elevação de temperatura de equilíbrio para algumas políticas de abatimento, com $SC = 3,5$ °C. A curva em verde claro superior é a trajetória BAU. (B) Trajetórias correspondentes para a elevação de temperatura realizada. Com $SC = 3,5$ °C e $(1/DO) = 90$ anos. Notemos o atraso destas elevações relativamente às repostas de equilíbrio em (A). As projeções foram feitas em $k = 2020$ com $HP(2020) = 100$ anos. (PROCLIN, 2006). 152
- 3.8 Projeções da Função Dano Climático para algumas opções de abatimento. No exemplo $k = 2020$ e $HP(2020) = 100$ anos. A curva azul escuro superior refere-se ao caso BAU, no qual as perdas climáticas são máximas. Notemos nas curvas coloridas abaixo daquela, o efeito atenuador dos danos produzido pelas políticas de abatimento produzem. (PROCLIN, 2006). 155
- 3.9 Projeções de danos percentuais evitados em um país P_i para três políticas globais de abatimento. As trajetórias correspondem aos danos projetados da Figura 3.8. Notemos que somente temos três curvas, pois os danos evitados são calculados com relação à curva BAU de danos daquela figura. (PROCLIN, 2006). 159
- 3.10 Diagrama representando o Ciclo Observação-Atualização-Projeção-Decisão que um governo global realiza em um único momento de decisão k com seu modelo integrado $MAI_i(k)$. As projeções dos cenários vão de k até $k+HP(k)$. 166
- 3.11 Da esquerda para a direita e de cima para baixo, vemos uma sequência de projeções do PIB Líquido Global, levando em conta os danos climáticos. A curva vermelha refere-se ao PIB observado pelo agente até a data indicada na linha vermelha vertical. A curva azul claro indica a projeção feita por ele dentro do horizonte de antecipação. Notemos que esse horizonte aumenta ao longo do tempo. O alcance da antecipação termina na linha azul claro vertical. A curva preta mais longa é a projeção BAU, que prolongamos além do HP para que se possa ter uma referência visual do alcance das antecipações. 168

CAPÍTULO 4

- 4.1 Os dois tipos de Arcos em um Diagrama de Influências: (a) Arcos de 173

Informação e (b) Arcos de Relevância.

- 4.2 A unidade básica de um Diagrama de Influência para uma decisão tomada sob incerteza. 175
- 4.3 Um DI representando um processo sequencial de decisões sob incertezas. No exemplo, o decisor conhece, a cada momento de escolha, os valores anteriores das variáveis aleatórias e dos valores resultantes de suas decisões. 177
- 4.4 Um exemplo de um processo de decisões sequenciais no qual as incertezas são resolvidas a partir de um certo momento. 177
- 4.5 Estrutura geral da tomada de decisão de abatimento de emissões de GEE sob incertezas em um momento k , e as suas conseqüências. 181
- 4.6 Duas Árvores de Decisão para um conjunto finito de opções de abatimento de emissões, $A(k,i)$, e $A(k+1,j)$, em dois momento de decisão sucessivos, k e $k+1$. No exemplo, temos 4 opções de abatimento em cada momento, mas ao longo do tempo as opções e o seu o número podem variar. 182
- 4.7 Estrutura de Dados para o nó de valor da elevação da temperatura realizada $\Delta T(HP(k))$, calculada para $HP(k)$ anos à frente do momento de decisão k . 186
- 4.8 Ilustração da projeção de 12 estados climáticos correspondentes a valores da SC e da DO no diagrama de estados da Figura 4.7. No exemplo, os estados são as elevações de temperatura de equilíbrio, $k = 1990$, $HP(1990) = 120$ anos (Gráfico gerado no Proclin V 1.0) 187
- 4.9 Exemplo de estrutura de dados para o cálculo dos custos de abatimento no momento de decisão k , para um abatimento durante o período $hp(k)$. Os parâmetros $Beta(k,i)$ são indicadores dos custos de abatimento de emissões. Ver Capítulo 3, Seção 3.5. 190
- 4.10 Árvore de decisão das opções políticas do exemplo da Figura 5, acoplada ao diagrama de influência do coeficiente BETA dos custos de abatimento da Figura 9. Para cada opção $A(k,i)$ existem três possibilidades de custos (Baixo, Médio e Alto) representados pelos valores $BETA(K,j)$. $i = 1,2,3,4$, $j=1,2,3$. 191
- 4.11 Um exemplo de estrutura de dados dos impactos relacionados às mudanças climáticas, calculados no momento k para o horizonte de antecipação $HP(k)$. 193
- 4.12 Representação parcial do Diagrama de Influências do problema de 194

decisão de abatimento, na parte que se refere aos danos climáticos. É visualmente clara a conexão entre as opções de abatimento e as incertezas sobre a resposta do clima às emissões e a vulnerabilidade dos sistemas às mudanças de clima. Percebe-se também como se dá a propagação das probabilidades de um nó de acaso a outro.

- 4.13 Diagrama de influência completo do problema de escolha de uma política de abatimento de emissões, em um momento k . A cada opção de abatimento, geram-se custos de abatimento no horizonte $hp(k)$ e estados climáticos, que geram danos climáticos no horizonte de antecipação $HP(k)$. As probabilidades se propagam tanto no sentido dos custos como no dos danos, gerando probabilidades conjuntas para cada um dos estados finais da perda social total. Na árvore de decisão duplicamos cada opção de abatimento para podermos representar todos os ramos na mesma figura. 197
- 4.14 Exemplo de uma Árvore de Decisão para o caso em que o agente analisa todas as seqüências possíveis de opções desde o momento k , até o momento $k+HP(k)$. No exemplo $HP(k) = 3k$ e a árvore total tem $4^3 = 64$ ramos. Para horizontes de tempo mais longos e árvores com mais opções políticas o número de ramos se prolifera rapidamente. 199
- 4.15 Caso em que a análise das opções de abatimento somente leva em conta o momento presente k , e as suas conseqüências futuras dentro do horizonte de planejamento $HP(k)$, sem considerar as futuras opções de forma explícita. 200
- 4.16 Distribuição de probabilidades de (VALVERDE; JACOBY, 1996). Note-se que a soma das probabilidades de SC e de DO, bem como as probabilidades conjuntas para todos os estados climáticos, somam a unidade, como deve ser pela Equação 4.4. 202
- 4.17 Exemplos ilustrativos de distribuições discretas de probabilidades em um momento k , atribuídas à Sensibilidade Climática e aos danos climáticos. As distribuições discretas são derivadas de distribuições Beta contínuas de forma simples: atribuímos a probabilidade de um parâmetro estar em um intervalo de uma categoria, por ex. Baixa, a um valor representativo, por exemplo, o valor central do sub-intervalo da categoria 203
- 4.18 Estrutura geral da tomada de decisão de abatimento de emissões de GEE sob incertezas, em um momento k , e as suas conseqüências, juntamente com as distribuições de probabilidades subjetivas discretas dos parâmetros relevantes. 205

CAPÍTULO 5

- 5.1 Dois agentes projetam seus PIB líquidos com um horizonte de 70 anos. 235

Ambos esperam a ocorrência de limiares, respectivamente, em 2050 (esquerda) e 2080 (direita).

CAPÍTULO 6

- 6.1 As primeiras quatro COP de uma sequência de encontros onde vários países negociam entre si cotas de reduções de emissões de GEE. Uma Conferência das Partes é representada por um hexaedro cujos vértices simbolizam os países e as arestas e diagonais as negociações. Estão indicados também os períodos de comprometimento, PDC, subsequentes a cada COP. Na ilustração consideramos $\Delta\tau = 10$ anos. A COP(1) pode ser considerada a negociação que deu origem ao Protocolo de Quioto. 247
- 6.2 Dois Blocos de países A e B, imersos no sistema do clima global. Os agentes negociam metas de abatimento para evitar impactos negativos em suas economias. 254
- 6.3 Matriz das Perdas Sociais devido à mudanças climáticas para dois blocos de países A e B. Para cada par de opções de abatimento $\{\mu_{A_{j_1}}(k); \mu_{B_{j_2}}(k)\}$, cada país tem uma Perda Social. Em cada célula indicamos duas Perdas Sociais, uma para cada país, correspondentes ao par de opções de abatimento indicado. 255
- 6.4 As árvores de opções de abatimento de cada agente deve incluir as árvores de opções de abatimento dos outros agentes. Notemos que a situação é aparentemente simétrica, pois as Perdas Sociais de cada ramo de cada árvore não são necessariamente iguais. 256
- 6.5 Diagrama de influência para um nó de decisão que é uma negociação sobre cotas de abatimento de emissões. O diagrama é uma generalização daquele do Capítulo 4, de decisão individual. Notemos os nós de acaso comuns aos dois agentes, relativos ao sistema do clima e os nós de acaso específicos de cada país. 258
- 6.6 Exemplo numérico do jogo da Figura 3. A matriz indica as possíveis estratégias de abatimento de emissões e as conseqüências, em termos de perdas sociais, de cada par de escolhas. Cada jogador conhece todas essas possibilidades, mas somente conhecerá a ação escolhida pelo outro no momento em que o jogo é efetivamente jogado. 257
- 6.7 Exemplo numérico de um jogo com três estratégias para cada jogador. As funções custos e danos de cada jogador são tais que se os danos diminuem devido a abatimentos maiores, os custos podem em algumas situações compensar essas quedas, de forma que as perdas totais permanecem constantes ou variam pouco ou até aumentam. No exemplo o Equilíbrio de Nash indicado na célula hachurada não é a menor perda para A, mas é o melhor conjunto de respostas de A e B a todas as estratégias possíveis 260

de cada um.

CAPÍTULO 7

- 7.1 As entradas do Proclin são seqüências de distribuições de probabilidades representando cenários de evolução das incertezas (ver, por exemplo, planilha ProbDiscreta_Clima). A saída principal é uma seqüência de pares de acordos de abatimento de emissões ao longo do Século XXI (ver a planilha Acordos Globais). Essa seqüência pode ser obtida passo a passo, mediante toques sucessivos da tecla F9. Existem várias informações adicionais que acompanham esta seqüência. Detalhes no texto. 280
- 7.2 Um espaço qualitativo das dimensões a analisar em cada simulação da evolução das ações de cada Bloco de países. As velocidades das variâncias representam as evoluções dos conhecimentos, e o limiar mínimo de crescimento representa os projetos de crescimento econômico dos países. 287
- 7.3 (A) Cada simulação seleciona duas velocidades e um limiar de crescimento mínimo dentro de um intervalo pré-fixado. Na ilustração são feitos cinco grupos de simulações, uma para cada valor de δy_i^* , com um par fixo de velocidades. (B) Cada simulação fixa um limiar de crescimento mínimo e são feitos quatro grupos de simulações, um para cada par de velocidades. 288
- 7.4 À esquerda um colapso da economia do Bloco S. Seu PIB em 2085 atinge um máximo e depois cai rapidamente, devido ao aumento de temperatura global. À direita: o Bloco N é bem menos vulnerável e no mesmo período de tempo não apresenta colapso. O mapeamento busca descobrir em que condições ocorrem colapsos dentro deste século. 290

APÊNDICE D

- D.1 A estrutura de um Modelo de Análise Integrada sobre Mudança de Clima Global típico (Carter, 1995). 332
- D.2 A estrutura do Modelo IMAGE 2.2) 336

Tabela	LISTA DE TABELAS	Página
	Legenda	
	CAPÍTULO 1	
1.1	Características de diferentes tipos de incerteza no contexto das mudanças climáticas segundo (DESSAI; HULME, 2003).	86
	CAPÍTULO 2	
2.1	Incrementos no Horizonte de Antecipação HP(k) para cada variação percentual da variância da difusividade oceânica, conforme a Equação 2.3. Notemos que quando há certeza completa, isto é, quando a variância é zero, o incremento no HP é de 100 anos, acarretando um HP final de 110 anos.	123
	CAPÍTULO 3	
3.1	Nome das variáveis de cada sub-modelo do modelo integrado MAI _i (k) e os símbolos usados para cada uma.	164
3.2	Parâmetros usados nos sub-modelos do modelo integrado MAI _i (k), onde estão indicados os quatro parâmetros que são considerados, neste trabalho, incertos e aos quais associamos distribuições de probabilidades.	165
	CAPÍTULO 4	
4.1	Categorias definidas para a Sensibilidade Climática e a Difusividade Oceânica em termos de valores representativos dentro dos intervalos de confiança de cada parâmetro.	185
	CAPÍTULO 5	
5.1	Danos e Custos para cada estado da natureza em valores absolutos. Ver texto para detalhes.	217
5.2	A Tabela 5.1 com as perdas máximas em cada situação (política e estado da natureza).	222
	CAPÍTULO 6	
6.1	Descrição sucinta dos elementos constituintes do Regime do Clima (RClima), que é um modelo caricatural do Regime da Convenção do Clima.	249
	CAPÍTULO 7	
7.1	Mapeamento do Meio Ambiente de Base para descobrir as condições BAU de colapso da economia global. Nesta sondagem fixamos a taxa de crescimento da economia mundial em 3% e variamos o PIB global mundial desde 1 até 30 trilhões de US\$. Como a análise é para o caso BAU não existem custos de abatimento. Para cada configuração do Meio Ambiente de Base, por exemplo, MMVM, existem três entradas na tabela:	281

o valor máximo do PIB inicial que não gera colapso, que no exemplo é 2, o ano limite a partir do qual existe colapso, no exemplo é 2100, e o valor da elevação de temperatura neste ano, no exemplo 1,8 °C.

7.2	Uma análise onde fixamos o PIB global inicial, fazendo-o igual a 10, e variamos as taxas de crescimento desse PIB ara sondar as respostas do Meio Ambiente de Base.	282
7.3	Mapeamento do Meio Ambiente de Base para descobrir as condições BAU de colapso da economia global. Nesta sondagem fixamos a taxa de crescimento da economia mundial em 3% e variamos o PIB global mundial desde 1 até 30 trilhões de US\$. Como a análise é para o caso BAU não existem custos de abatimento. Para cada configuração do Meio Ambiente de Base, por exemplo, MMVM, existem três entradas na tabela: o valor máximo do PIB inicial que não gera colapso, que no exemplo é 2 trilhões de US\$, o ano limite a partir do qual existe colapso, no exemplo é 2100, e o valor da elevação de temperatura neste ano, no exemplo 1,18 °C.	291
7.4	Uma análise onde fixamos o PIB global inicial, fazendo-o igual a 10, e variamos as taxas de crescimento desse PIB para sondar as respostas do Meio Ambiente de Base.	294
7.5 A	Taxa crescimento global de 3% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.	295
7.5 B	Taxa crescimento global de 5% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.	295
7.5 C	Taxa crescimento global de 7% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.	296
7.6	As células da Tabela 7.5 B tomadas para simular cenários de negociações com incertezas variáveis.	298
7.7	Um exemplo de um experimento típico. A velocidade Rápida adotada é 20% de redução na variância por década para qualquer um dos quatro parâmetros. O sistema parte da situação inicial de incerteza, (células em cinza claro) e caminha nesta velocidade para a configuração do Meio Ambiente de Base.	299
7.8	Resultados do Caso Simétrico - Rápido	304
7.9	Resultados do Caso Assimétrico Rápido	306

7.10	Caso em que os dois Blocos são assimétricos. Detalhes no texto.	306
------	---	-----

APÊNDICE C

C.1	Classificação geral dos papéis desempenhados pelos países nas negociações internacionais ambientais, segundo. (Sprinz & Vaahtoranta, 1994).	329
C.2	Grau de concordância das hipóteses de (Sprinz & Vaahtoranta, 1994) aplicadas ao caso das negociações de Quioto. Legenda: (+) concorda. (++) concorda bastante. (0) nem concorda nem discorda. (-) discorda. (Sprinz & Vaahtoranta, 2001).	330

SUMÁRIO

Folha de Aprovação	02
Parecer da Comissão Julgadora	03
Dedicatória	05
Agradecimentos	06
Resumo	08
Abstract	10
Lista de Figuras	12
Lista de tabelas	20
Introdução	29
I.1 A Motivação para este Estudo	29
I.2 As Incertezas sobre as Mudanças Climáticas, a Nossa Principal Pergunta e Nossa Opção Metodológica	35
I.3 A Contribuição deste Trabalho	39
I.4 Uma Visão Geral do Modelo Desenvolvido	41
I.5 Os Temas que serão tratados neste trabalho em cada Capítulo	48
Capítulo 1 O Modelo do Meio Ambiente e o Ambiente Informacional	52
1.1 Introdução	52
1.2 O Modelo do Sistema do Clima Global	54
1.2.1 Emissões Globais	56
1.2.2 Concentração Atmosférica de CO ₂	58
1.2.3 Aumento da Temperatura Média Global	59
1.2.4 A Inércia Térmica do Oceano e o Aquecimento Realizado	61
1.3 O Modelo das Economias Nacionais	63
1.3.1 A Demografia	66
1.3.2 O Sistema de Produção	67
1.3.3 Discretização das Equações de Crescimento	70
1.4 Emissões e Políticas de Redução	71
1.5 Perdas Sociais	73
1.5.1 Custos de Abatimento de Emissões	73
1.5.2 Danos Climáticos Regionais	74
1.5.3 A Perda Total Devido às Mudanças Climáticas	75
1.6 Discrepâncias Entre os Modelos de Uso dos Governos e o Meio Ambiente de Base	76
1.7 1 O Modelo Informacional com Incertezas	77
1.7.1 O Conceito de Probabilidade em Mudança de Clima	78
1.7.2 As Esferas de Incerteza em Mudanças Climáticas	79
1.7.3 A Origem e Natureza das Incertezas em Mudanças Climáticas	81
1.8 O Modelo das Incertezas e Sua Evolução	88
1.8.1 Distribuições de Probabilidades	89
1.8.2 Modelo da Evolução do Conhecimento sobre as Mudanças Climáticas	90
1.8.3 Tipos e Ritmos de Evolução das Incertezas	91

Capítulo 2	Modelo de um Governo em Face da Decisão de Abater Emissões	95
2.1	Introdução	95
2.2	O Objetivo de um Governo em Face das Mudanças Climáticas	96
2.3	As Opções de Resposta de um Governo	97
2.4	Modelo das Opções de Abatimento de Emissões	100
2.5	Modelo de uma Metodologia de Tomada de Decisões de Abatimento	103
2.5.1	Modelos, Observações e Critérios de Escolha	104
2.5.2	Ciclo de Decisões Sequenciais sobre Abatimento de Emissões	108
2.6	Projeções Futuras e Antecipações	112
2.7	Incertezas Paramétricas sobre Mudança de Clima	114
2.7.1	Distribuições de Probabilidades e a Metodologia de um Governo	116
2.8	Comportamento Adaptativo dos Governos	118
2.8.1	Regras de Mudanças dos Horizontes de Tempo	120
2.8.2	Regras para Mudar as Opções Políticas	125
2.9	Conclusão: Síntese da Estrutura do Agente Tomador de Decisões	128
Capítulo 3	Um Modelo de Integrado para Uso dos Governos	131
3.1	Introdução	131
3.2	Modelo da Economia Nacional	135
3.2.1	Demografia, Crescimento Econômico e o Objetivo da Política	135
3.2.2	Projeções do PIB	140
3.2.3	Modelo das Emissões de GEE	142
3.2.4	Projeções das Emissões	144
3.3	Modelo do Clima Global	147
3.3.1	Modelo do Ciclo do Carbono	147
3.3.2	Modelo do Balanço Energético	149
3.4	Modelo dos Impactos Climáticos Regionais	153
3.4.1	Função Danos Climáticos	153
3.4.2	Projeções de Danos	154
3.4.3	A Queda do PIB e os Danos Evitados	156
3.5	Modelo dos Custos de Abatimento	159
3.5.1	Função Custos de Abatimento	159
3.5.2	Projeções dos Custos de Abatimento	160
3.6	A Perda Social Total e Suas Projeções	161
3.7	O PIB Líquido e suas Projeções	162
3.8	Uma Regra para Gerar a Máxima Opção de Abatimento	163
3.9	Síntese do Modelo Integrado	164
Capítulo 4	Mudanças Climáticas e Tomada de Decisão Sequencial Sob uma Cascata de Incertezas	170
4.1	Introdução	170
4.2	Diagramas de Influência: Conceitos e Notação	172
4.3	Um Modelo de Tomada de Decisão Sequencial em Mudanças Climáticas	180

4.3.1	A Estrutura Geral da Decisão de Abatimento de Emissões sob Incertezas	180
4.3.2	Alternativas de Decisões Sequenciais	182
4.3.3	Representação dos Possíveis Estados do Sistema do Clima	184
4.3.4	Custos de Abatimento Sequencial	189
4.3.5	Os Impactos Climáticos	192
4.3.6	Perda Social Total	196
4.3.7	A decisão de Abatimento sob Incerteza	198
4.4	Representando as Incertezas com Distribuições de Probabilidades	200
4.4.1	Distribuições Discretas	200
4.4.2	Valores Esperados e Variâncias	204
4.5	Conclusão	205
Capítulo 5	Critérios de Decisão Sob Incerteza e Impactos Climáticos Perigosos	207
5.1	Introdução	207
5.2	Os Riscos de Agir e Não-Agir	209
5.3	O Problema do Quanto Abater Agora	210
5.4	Os Critérios de Decisão para Saber o Quanto Abater Agora	211
5.4.1	Análise Custo Benefício	211
5.4.2	Critérios de Decisão Sob Incerteza	214
5.4.2.1	Maximizando o Bem Estar Social Esperado	215
5.4.2.2	Minimax	221
5.4.2.3	Minimax Maxmax Generalizado	223
5.4.2.4	Grau Limitado de Confiança	224
5.4.2.5	Segurança Primeiro	227
5.5	Um critério de Segurança Primeiro para Impactos Climáticos Perigosos	230
5.5.1	O Artigo 2 da Convenção e a Interferência Antropogênica Perigosa no Clima	230
5.5.2	Danos Climáticos Perigosos e a Evolução das Opções e Abatimento de Emissões	233
Capítulo 6	Modelo de Uma Sequência de Negociações sobre Cotas de Reduções de Emissões	239
6.1	Introdução	239
6.2	Teoria dos Jogos, Acordos Internacionais Ambientais e Mudanças Climáticas: uma revisão da literatura.	241
6.3	Modelo de um Regime Internacional para Abater Emissões	244
6.3.1	O Tema de uma COP e a Sequência de Conferências	245
6.3.2	Os Resultados de um Acordo Global: Protocolos de Cotas de Abatimento	248
6.4	Modelo de uma COP: um Jogo para Reduzir Emissões	250
6.4.1	O Problema Coletivo das Mudanças Climáticas	250
6.4.2	As Abordagens da Teoria dos Jogos ao Problema	252
6.4.3	Estratégias Não Cooperativas para Abater Emissões	253
6.4.4	Equilíbrio de Nash e a Definição de um Acordo Multilateral	261
6.5	Modelo de uma Sequência de Negociações sobre Mudança de Clima	263
6.5.1	O Superjogo do Clima	263
6.5.2	O Superjogo do Clima Não Cooperativo Simplificado	266

6.5.3	Histórias e Estratégias das Negociações	268
6.5.4	Na Mesa de Negociações: Jogos Climáticos com Incertezas	270
6.6	Conclusão: Síntese do Modelo	272
Capítulo 7	Primeiros Experimentos de Simulações e Análises de Sensibilidade para Investigar o Papel das Incertezas nas Negociações	274
7.1	Introdução	274
7.2	Descrição Resumida do Protótipo	275
7.2.1	A Simplificação do Modelo a sua Implementação no Proclin	275
7.2.2	O Objetivo do Protótipo	277
	Os Recursos do Proclin	278
7.3	O Meio Ambiente de Base e as Categorias dos Estados de Incerteza	281
7.4	Estratégia de Simulação	283
7.4.1	O “Espaço” das Simulações e as Velocidades de Evolução das Incertezas	283
7.4.2	Mapeando o Meio Ambiente de Base para Descobrir Limiares	289
7.5	Simulações de Cenários	297
7.5.1	Caso de Dois Blocos Simétricos	300
7.5.2	Caso de Dois Blocos Assimétricos	306
7.6	Conclusão	307
	Conclusão Geral	308
REFERÊNCIAS		311
APÊNDICE A	Taxa Social de Desconto e Equidade	321
A.1	Equidade e Taxa de Desconto	322
A.1.1	Equidade em Procedimentos	322
A.1.2	Equidade nas Conseqüências	323
A.1.3	Equidade Intra-Generacional (espacial)	323
A.1.4	Equidade Inter-Generacional (Temporal)	324
A.2	Taxa Social de Desconto	324
APÊNDICE B	Critérios de Escolha Adicionais	326
B.1	A Taxa Interna de Retorno (TIR)	326
B.2	Razão Custo-Benefício	326
B.3	Regra do Menor Custo	327
APÊNDICE C	A Teoria Baseada no Auto-Interesse dos Países	328
APÊNDICE D	Modelos de Análise Integrada	332
D.1	A Estrutura Geral de um MAI	332
D.2	Usos de Modelos de Análise Integrada	334
D.3	Os Potenciais e os Limites dos MAI	334
D.4	O Modelo IMAGE 2.2	335
D.5	As Grandes Questões não Resolvidas sobre MAI	339
D.6	Questões Relativas aos Países em Desenvolvimento.	340

APÊNDICE E	A Teoria Global da Negociação	342
E.1	A Negociação: Definições e Teorias	342
E.2	Os Eixos Epistemológicos e as Teorias da Negociação	344
E.2.1	As Abordagens Unidimensionais	345
E.2.1.1	Abordagem dedutiva - A Teoria dos Jogos	345
E.2.1.2	A Abordagem Indutiva	346
E.2.1.3	A Abordagem Empírica	346
E.3	As Teorias Globais da Negociação	346
E.4	O Quadro Conceitual sobre a Sequência de Negociações	347
APÊNDICE F	Roteiro de Uma Simulação com o Proclin	349
APÊNDICE G	Horizontes Variáveis: uma Conjectura	351
G.1	Variação dos Horizontes de Tempo	351

ERRATA

TESE - LUIS AÌMOLA

Os erros anotados a seguir referem-se na maioria dos casos a pequenos erros que não comprometem o entendimento do texto. Recomendamos que o leitor faça a leitura contínua do texto e recorra a esta Errata somente quando tiver problemas no entendimento do mesmo.

Introdução

Pg. 33, linha 13, onde se lê “e a eficácia de políticas” ler “e a ineficácia de políticas”.

Pg. 41, linha 09, onde se lê “do desenho nossas respostas” ler “do desenho de nossas respostas”.

Pg. 44, linha 01, onde se lê “A modelagem baseada em agentes ainda está ainda muito pouco desenvolvido” ler “A modelagem baseada em agentes ainda está muito pouco desenvolvida”.

Pg. 46, linha 01, onde se lê “políticas abatimento” ler “políticas de abatimento”.

Pg. 46, linha 04, onde se lê “DICE” ler “Dynamical Integrated Model of Climate and the Economy (DICE)”.

Pg. 47, linha 16, onde se lê “reduções de carbono” ler “reduções de emissões de carbono”.

Capítulo 1 – O Modelo do Meio Ambiente de Base e o Ambiente Informacional

Pg. 54, linha 03, onde se lê “imaginar que informações” ler “imaginar que são informações”.

Pg. 56, linha 06, onde se lê “modelo do de balanço energético” ler “modelo de balanço energético”.

Pg. 58, linha 05, onde se lê “floreτας” ler “florestas”.

Pg. 58, linha 09, onde se lê “ciclos biogeoquímicos, tais como o do nitrogênio” ler “ciclos biogeoquímicos, tal como o do nitrogênio”.

Pg. 63, linha 14, onde se lê “Cada economia poderá ser diferenciada através de valores específicos” ler “Cada economia poderá ser diferenciada através de valores específicos de seus parâmetros”.

Pg. 64, Figura 1.3: Existe uma seta apontada para baixo entre as caixas da Demografia e Crescimento e Emissões.

Pg. 67, linha 07, onde se lê “bilhões e habitantes” ler “bilhões de habitantes”.

Pg. 68, linha 06, onde se lê “definida maneira exógena” ler “definida de maneira exógena”.

Pg. 68, linha 08, onde se lê “é população economicamente ativa” ler “é a população economicamente ativa”.

Pg. 68, linha 10, onde se lê “ $0 \leq \gamma_i \leq 10$ ” ler “ $0 \leq \gamma_i \leq 1$ ”.

Pg. 68, linha 11, onde se lê “equação 1.16 é e denominada Função de Produção Cobb-Douglas” ler “equação 1.16 é denominada Função de Produção Cobb-Douglas”.

Pg. 70, linha 13, onde se lê “e assim por diante (Figura 1.6)” ler “e assim por diante (Figura 1.5)”.

Pg. 75, linha 07, onde se lê “considerando as perdas $\Phi_i(t)$ devida aos danos climáticos” ler “considerando as perdas $S_i(t)$ devida aos danos climáticos”.

Pg. 76, linha 10, onde se lê “uso dois agentes” ler “uso dos agentes”.

Pg. 80, linha 03, onde se lê “(IPCC, 2001)” ler “(WATSON, 2001)”.

Pg. 88, linha 06, onde se lê “Esse tipo distribuição tem a” ler “Esse tipo de distribuição tem a”.

Pg. 94, linha 02, onde se lê “Definimos por velocidade rápida” ler “Definimos velocidade rápida”.

Capítulo 3 – Um modelo Integrado para uso dos Governos

Pg. 132, linha 21, onde se lê “serão considerados no Capítulo 4” ler “serão considerados no Capítulo 5”.

Pg. 134, linha 17, onde se lê “abatimento no presente o modelo” ler “abatimento no presente modelo”.

Pg. 142, linha 13, onde se lê “intensidade até $k+HP(k)$ ” ler “intensidade até $k+hp(k)$ ”.

Pg. 154, linha 10, onde se lê “Suporemos os expoentes nas funções danos” ler “Suporemos que os expoentes nas funções danos”.

Pg. 156, linha 01, onde se lê “é a preferência temporal do agente adotada pelo agente” corrigir para “é a preferência temporal do agente”.

Capítulo 4 – Mudanças Climáticas e Tomadas de Decisão Sequencial Sob uma Cascata de Incertezas

Pg. 178, linha 14, onde se lê “Se a previsão do tempo feito pela manhã” ler “Se a previsão do tempo feita pela manhã”.

Pg. 179, linha 20, onde se lê “distinta no tempo” ler “distante no tempo”.

Pg. 187, linha 04, onde se lê “de k, tal que.” ler “de k.”.

Pg. 190, linha 07, onde se lê “o da Figura 4.8” ler “o da Figura 4.9”.

Pg. 191, linha 06, onde se lê “Notemos que temos no diagrama da Figura 4.7,” ler “Notemos que temos no diagrama da Figura 4.10,”.

Pg. 195, linha 16, onde se lê “das probabilidades da SC. DO e ALFA” ler “das probabilidades da SC, DO e ALFA”.

Pg. 203, linha 16, onde se lê “Assim, Por isso, para o propósito deste trabalho”, ler “Assim, para o propósito deste trabalho”,

Pg. 205, onde se lê “4.11 Conclusão” ler “4.5 Conclusão”.

Capítulo 5 – Critérios de Decisão Sob Incerteza e Impactos Climáticos Perigosos

Pg. 216, linha 17, onde se lê “os danos D e se custo”, ler “os danos D e seu custo”.

Pg. 220, linha 15, onde se lê “acredita-se que a uma distribuição normal”, ler “acredita-se que uma distribuição normal”.

Pg. 233, linha 101, onde se lê “Danos Climáticos Perigosos e a Evolução das Opções e Abatimento de Emissões”, ler “Danos Climáticos Perigosos e a Evolução das Opções de Abatimento de Emissões”.

Pg. 234, linha 03, onde se lê “maximize seu PIB** sujeito à restrição de que a sua taxa nunca poderá”, ler “maximize seu PIB** sujeito à restrição de que a sua taxa de crescimento nunca poderá”.

Pg. 234, linha 16, onde se lê “horizonte de planejamento, lançando-o para além desse horizonte”, ler “horizonte de antecipação, lançando-o para além desse horizonte”.

Pg. 234, linha 21, onde se lê “HP(k) = 80 anos”, ler “HP(k) = 70 anos”.

Capítulo 6 - Modelo de Uma Seqüência de Negociações sobre Cotas de Reduções de Emissões

Pg. 262, linha 20, onde se lê “geradas nos jogos anteriores influencia resultado desse jogo” ler “geradas nos jogos anteriores influencia o resultado desse jogo” .

Pg. 263, linha 08, onde se lê “Seção 4.9, e na Seção simplificaremos a somatória (2) assumindo que” ler “Seção 4.3.7, simplificaremos a somatória 6.3 assumindo que”.

Pg. 264, linha 03, onde se lê “diminuindo a quantidade de abatimento de máxima” ler “diminuindo a quantidade de abatimento máxima”.

Pg. 264, linha 11, onde se lê “e do nível máximo suportável pelo país” ler “e do nível de custo máximo suportável pelo país”.

Pg. 271, linha 16, onde se lê “Embora relevante, não entremos nos detalhes deste tipo de análise” ler “Embora relevante, não entraremos nos detalhes deste tipo de análise”.

Pg. 271, linha 18, onde se lê “tipos de incertezas, (espistêmicas, aleatórias e reflexivas; ver Capítulo 1)” ler “tipos de incertezas, (epistêmicas, aleatórias e reflexivas; ver Capítulo 1)”.

APÊNDICE A

Pg. 323, linha 20 onde se lê “finalmente traduzidas em ações adotada ao nível nacional”, ler “finalmente traduzidas em ações adotadas ao nível nacional”.

INTRODUÇÃO

I.1 A Motivação para este Estudo

O objetivo deste trabalho foi construir um modelo integrado clima-economia-política, que nos permitisse fazer simulações exploratórias do papel que as incertezas científicas sobre o clima e a economia podem ter nas negociações internacionais sobre mudanças climáticas. Uma atenção especial foi dada ao papel das incertezas de possíveis impactos severos na estrutura de decisão dos governos.

O problema das mudanças climáticas globais é o problema ambiental mais abrangente espacialmente e de maior alcance no tempo. Essas mudanças estão sendo geradas pelas emissões crescentes em todo o mundo de gases de efeito estufa (GEE), oriundas da queima de combustíveis fósseis e das atividades de uso e mudança de uso da terra, o que tem levado a um aumento acelerado do efeito estufa.

Os impactos potenciais das mudanças climáticas globais podem ser, dependendo da região considerada, negativos ou positivos, mas os prognósticos pesam para os primeiros para a maior parte dos países. Esperam-se impactos distribuídos em um amplo espectro no tempo e no espaço, desde pequenas e restritas mudanças a amplas e intensas alterações do sistema do clima.

Um problema que a humanidade enfrentará nas próximas décadas é buscar evitar ao máximo os impactos climáticos potenciais negativos intensos, através da mitigação de emissões de gases de efeito estufa, e se adaptar ao máximo àqueles impactos negativos que

não puderem ser evitados. A esse problema nós chamaremos aqui de problema da resposta das sociedades humanas às mudanças climáticas globais¹ (Figura I.1).

Por causa dos riscos de catástrofes em larga escala devido ao aquecimento global, os governos de mais de 180 países assinaram em 1992 um acordo, a Convenção Quadro sobre Mudança de Clima das Nações Unidas (CQMC), que hoje conta com a participação de virtualmente todas as nações do mundo, e cujo objetivo final é alcançar “a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em um nível que impeça uma interferência antropogênica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável” (CQMC, 1992).

Figura I.1: Os dois tipos básicos de respostas que as sociedades podem dar às mudanças climáticas. A mitigação de emissões é uma medida preventiva, que torna mais lento o aquecimento global. A adaptação planejada é uma medida que visa atenuar os impactos das mudanças de clima, através de ações sobre os ecossistemas e economias. (Modificado de (Carter,1995).

¹ A expressão “mudanças climáticas” significará neste trabalho aquelas variações do clima provenientes de emissões de GEE de origem antropogênica. A variabilidade natural refere-se a mudanças do clima que não dependem das atividades humanas.

A Convenção atribuiu a responsabilidade aos países desenvolvidos, também chamados países do Anexo I, de tomar a dianteira nesse processo através da mitigação de emissões, já que as suas emissões acumuladas desde o período da Primeira Revolução Industrial são muito maiores que as dos países em desenvolvimento.

Esse acordo prevê a criação por negociação entre os países membros, de vários protocolos para regular medidas específicas de mitigação e adaptação às mudanças climáticas. O primeiro destes protocolos é o Protocolo de Quioto firmado em 1997, que fixou metas quantitativas de redução de emissões somente para os países desenvolvidos. Nesse acordo, ficou estipulado a estes países a meta de reduzir as emissões globais em pelo menos um total de 5,2%, relativamente ao nível de emissões mundiais de 1990, e fixou-se o período de 2008-2012 para que essa meta seja alcançada (KYOTO, 1997). Após um processo de aproximadamente oito anos de extensas e difíceis negociações, em 16 de fevereiro de 2005 este Protocolo entrou em vigor, embora não tenha sido ratificado pelos Estados Unidos da América, principal emissor mundial de GEE, e pela Austrália.

Atualmente, existe muita expectativa da comunidade internacional quanto ao cumprimento do acordo de Quioto até 2012, e já se travam negociações sobre a participação de alguns países em desenvolvimento na próxima etapa de redução de emissões. Este é um tópico com muitas dificuldades principalmente de natureza política e ninguém sabe ainda qual será o seu desfecho final.

O processo de coordenação política e econômica internacional continuará a ocorrer por várias décadas à frente, pois o problema das mudanças climáticas é de longo prazo, envolve decisões difíceis em nível nacional para todos os países, e não pode ser resolvido de uma única vez, dada a sua complexidade e as grandes incertezas envolvidas.

Ao mesmo tempo em que as negociações se sucedem seguindo o ritmo da diplomacia internacional em um assunto de tamanha complexidade, o clima mundial tem uma dinâmica própria que não conhece instituições sociais, conflitos de interesses e mecanismos de ajuste político. A variável chave que determina o seu comportamento é a quantidade acumulada de gases estufa na atmosfera. Por isso cabe perguntar se a evolução do regime internacional ambiental, instaurado pela Convenção Quadro, tem capacidade de produzir em tempo as mudanças necessárias para evitar os possíveis impactos “perigosos” ou mesmo criar as condições para que haja adaptação planejada das nações às mudanças climáticas intensas potenciais.

O ritmo e a intensidade das políticas internacionais de reduções de emissões de gases estufa dependem de inúmeros fatores, que se relacionam de forma muito complexa. Considerando que existe a possibilidade de muitos danos irreversíveis para a humanidade, incluindo catástrofes, o ritmo e intensidade das respostas preventivas são de fundamental importância. Uma questão relevante é então saber que fatores podem dificultar, ou facilitar o processo das negociações internacionais sobre mudança do clima e como eles influenciam o ritmo e intensidade das políticas de redução de emissões. Se pudermos compreender melhor esta dinâmica talvez possamos encontrar mecanismos para produzir desentrelaçamentos políticos e aumentar a eficácia das medidas mitigadoras de emissões.

Uma análise do processo de negociações desde a instauração da Convenção do Clima, bem como de outros acordos ambientais internacionais, indica que os principais fatores que influenciam esse processo de decisão coletiva podem ser organizados em três

dimensões básicas: o elemento estratégico, as incertezas e as instituições (SJÖSTEDT, 1994)².

O elemento estratégico nas negociações refere-se às posições de cada país e envolvem basicamente os seus interesses nacionais. Essas posições visam manter ou aumentar vantagens em diversas áreas que podem ir além da problemática do clima, estabelecendo um ambiente de interesses conflitantes, que podem emperrar o processo em pontos chave, diminuindo a eficácia das medidas de proteção climática (SPRINZ; VAAHATORANTA, 1994).

A dimensão das instituições nas negociações refere-se ao quadro institucional internacional que os países constroem para buscar uma coordenação de suas ações. O desenho dessas instituições define por períodos de tempo da ordem de décadas a maneira dos países responderem às mudanças do clima. Alguns desenhos podem favorecer a injustiça, a ineficiência e a eficácia das políticas de mitigação.

As incertezas científicas sobre os impactos regionais das mudanças climáticas, que incluem vários aspectos do funcionamento do clima mundial, bem como da vulnerabilidade dos ecossistemas e sistemas econômicos impedem que se tenha um quadro claro sobre como agir e influenciam as posturas políticas das nações no âmbito dos acordos internacionais (JEPMA; MUNASINGHE, 1998).

A motivação principal do presente trabalho é entender qual o papel que a dimensão das incertezas científicas sobre o clima e as economias desempenha na dinâmica das negociações internacionais sobre mudança de clima global. Em particular, queremos compreender como as incertezas sobre possíveis limiares de impactos insuportáveis podem influenciar a dinâmica de longo prazo destas negociações. Para realizar uma pesquisa sobre

² As referências citadas neste trabalho seguirão o padrão (Autor, Data).

este tema, entretanto, devemos ser cautelosos, pois as três dimensões acima estruturam o processo das repostas às mudanças climáticas de forma complexa, pois estão sempre entrelaçadas e qualquer análise que focalize somente uma delas corre o risco de descartar algumas relações importantes entre aquelas dimensões. Além disso, esse tema ainda é muito amplo e precisamos restringir mais o escopo da análise (Figura I.2).

Figura I.2: Argolas entrelaçadas representando as três dimensões que estruturam a dinâmica das negociações internacionais sobre mudança do clima. Essas dimensões se entrelaçam produzindo uma dinâmica complexa.

A seguir explicamos em mais detalhes em que tipo de incerteza estamos interessados, depois formulamos uma pergunta específica para circunscrever o objetivo da pesquisa e a escolha metodológica para alcançar este objetivo, sem perder de vista os elos com as outras dimensões do problema. E por fim descrevemos a estrutura geral do presente trabalho

I.2 As Incertezas sobre as Mudanças Climáticas, a Nossa Principal Pergunta e Nossa Opção Metodológica.

Muitos dos estudos para acessar os processos e impactos potenciais das mudanças climáticas e as políticas para responder a elas fazem uso de modelos numéricos. Estes modelos representam entidades complexas, tais como a atmosfera, a população mundial ou o consumo de energia total, com dados relativamente simples e sumarizam interações complexas, tais como as trocas de calor entre a atmosfera e o oceano ou o efeito de mudança da temperatura média global sobre a agricultura regional, com relações numéricas simplificadas através da introdução de parâmetros. Em virtude da ausência de informações completas e precisas sobre vários fatores e do fato de muitas interações estarem ainda muito pouco entendidas, os processos e impactos das mudanças climáticas têm sido modelados com certeza muito limitada.

Em alguns casos as incertezas resultam da ausência de informações ou de conhecimento, que em princípio poderiam ser superadas com pesquisa adicional. Em outros casos, entretanto, elas vêm da variabilidade natural inerente aos processos climáticos, o que torna a previsibilidade destes processos extremamente grosseira, como ocorre com as flutuações das condições de tempo atmosférico. Em outros casos ainda, como no caso das inovações tecnológicas, as incertezas vêm de processos que são essencialmente imprevisíveis.

Os níveis de incerteza nos estudos de mudanças climáticas podem variar desde incertezas estatísticas, quando os pesquisadores podem atribuir probabilidades a diferentes possibilidades, passando por incertezas de cenários, quando os pesquisadores podem caracterizar uma variedade de resultados plausíveis, mas não podem entender os processos subjacentes o suficiente para atribuírem probabilidades, indo até a ignorância quando os

pesquisadores não têm suficiente conhecimento nem mesmo para desenvolverem cenários plausíveis.

Diante deste panorama a motivação original que levou à assinatura da Convenção do Clima e à instauração de um Regime Internacional de Mudanças Climáticas, isto é, a possibilidade de interferência antropogênica perigosa no clima, torna-se difusa e a percepção que cada nação tem a respeito do potencial de danos climáticos severos acaba prevalecendo na tomada de decisões sobre as formas de responder ao problema. Como as respostas devem ser negociadas entre os países, as suas posições nas negociações expressam muito mais as suas percepções sobre as principais ameaças das mudanças climáticas do que propriamente o conhecimento científico sobre elas.

O que aconteceria se as incertezas diminuíssem? Parece que se ficasse cada vez mais claro que as mudanças climáticas não trarão sérias ameaças ao mundo, certamente teríamos um afrouxamento das medidas de proteção climática. Por outro lado, parece também que se os cientistas comessem a demonstrar, com incertezas cada vez menores, a necessidade urgente de ação intensa de mitigação de emissões, para evitar danos severos específicos, haveria uma mudança de direção sobre a tônica das negociações. Mas se as incertezas não diminuïrem rapidamente, em qualquer uma dessas situações, o que podemos esperar desse processo político? Podemos assumir que a interação entre as informações científicas e a tomada de decisão coletiva sobre mudanças climática tem uma lógica simples como suposto acima?

O objetivo deste trabalho é dar alguns passos na direção de compreendermos melhor como funciona a interação entre as informações científicas, com incertezas, e a tomada de decisão dos políticos para responder à mudanças climáticas globais. De forma mais específica, dadas as incertezas em alguns parâmetros chave em nosso conhecimento de

mudanças climáticas, qual a influência da evolução dessas incertezas sobre os resultados das negociações internacionais sobre cotas de reduções de emissões de GEE? E em particular, se essas incertezas estão relacionadas com a existência de impactos “perigosos”, como deveriam elas diminuir para que o sistema de decisão coletiva baseado em negociações sobre abatimento de emissões, evitasse tais impactos?

Essas perguntas envolvem de uma parte considerarmos as incertezas no conhecimento das mudanças climáticas e sua dinâmica de evolução, e de outra parte a lógica da interação política para coordenar respostas àquelas mudanças. Além disso, como o objeto da investigação é um processo, as próprias mudanças climáticas tem um papel relevante a desempenhar, pois o sistema do clima tem uma dinâmica própria que pode surpreender tanto a cientistas quanto a políticos. Essa questão envolve então a consideração de um sistema de relações de diferentes tipos, entre elementos e processos naturais e elementos e processos humanos, que devem ser explicitadas para que possamos buscar a compreensão desejada e respondermos a nossa pergunta central.

Uma das estratégias que têm sido usadas para tratar o problema das incertezas nos estudos sobre as mudanças climáticas tem sido uma classe de aplicações denominadas Modelos de Análise Integrada, MAI, que procuram colocar juntos os muitos aspectos do problema, o físico, o econômico e o social, em um único quadro conceitual. Este tipo de modelagem tem se revelado uma ferramenta heurística poderosa para ajudar a organizar nosso conhecimento sobre o tema, revelar lacunas em nosso conhecimento e tornar transparentes as conexões entre as incertezas de várias áreas do conhecimento sobre as mudanças climáticas. Esse esforço tem apontado prioridades de pesquisa a fim de diminuir as amplas incertezas existentes e tem ajudado a estruturar os diversos problemas ligados às

mudanças climáticas visando fornecer informações de melhor qualidade aos tomadores de decisões (DOWTALABATI, 1995).

Os analistas que trabalham com este tipo de modelo enfrentam dois principais desafios, como apontado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (HOUGHTON ET TAL, 1995).

- Integrar e manipular um grande e diverso conjunto de dados e modelos a partir de muitos pesquisadores e um espectro amplo de disciplinas; e
- Aprimorar nesses modelos o tratamento de questões de relevância para políticas, tanto quanto aprimorar a apresentação dos resultados para os políticos.

Quanto a este último objetivo, o IPCC observa ainda que “... tratamentos de tomada de decisão sob incerteza... estão no presente pobremente desenvolvidos em economia ambiental internacional, e especialmente na literatura de mudanças climáticas” (HOUGHTON ET TAL, 1995, p.7; VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN 1998).

Os MAI têm demonstrado seu potencial para nos ajudar a tratar de questões complexas em mudanças climáticas e pode ser uma ferramenta útil para abordarmos o problema de nosso interesse. Mas o tema de nossa pesquisa foge completamente de grande parte do que tem sido feito até hoje em modelagem integrada, pois o objeto de nossa investigação envolve o próprio conhecimento científico, como aquele codificado em um MAI, e a relação entre este conhecimento e as decisões políticas para tratar as mudanças climáticas. Isto é, não estamos buscando uma ferramenta de tomada de decisão, ou um modelo que nos ajude a aprimorar nosso conhecimento sobre o clima ou sobre a sua interação com a economia. O que buscamos é uma abordagem integrada sobre como as pessoas usam estes modelos e como elas tomam decisões tendo em vista que estes modelos contém muitas incertezas. Isso significa que um modelo de análise integrada nos ajudaria a

responder a nossa pergunta se fosse um modelo de segundo nível, isto é, um modelo sobre modelos e sobre o uso desses modelos em um contexto político internacional de mudanças climáticas. Por isso, não poderemos simplesmente tomar um MAI existente e usá-lo para abordar nossa pergunta. Os MAI que existem foram construídos para finalidades específicas e em geral com o objetivo de darem suporte à tomada de decisões. Nossa tarefa é então construir um novo MAI que tenha as características gerais acima descritas. De qualquer maneira este modelo ainda participará de muitas das características gerais de um MAI, o que nos ajudará muito na sua construção, tomando alguns MAI como ponto de partida para alcançar nosso objetivo. (Ver Apêndice D para mais detalhes sobre os MAI em mudanças climáticas).

I.3 A Contribuição deste Trabalho

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um MAI simples de uma sequência de negociações sobre reduções de emissões de GEE, representada por uma sequência de jogos não-cooperativos, jogados em um ambiente de mudanças climáticas e incertezas científicas e econômicas que mudam continuamente a fim de respondermos a nossa pergunta central.

O modelo representa de forma simplificada a sequência de análises e decisões estratégicas de vários países para negociar um acordo sobre o quanto cada um deve reduzir de suas emissões de GEE em vários períodos de tempo.

Implementamos uma versão simplificada do modelo através de um protótipo e simulamos alguns cenários de evolução do conhecimento daqueles parâmetros. Analisamos as consequências dessa evolução sobre a redução de emissões negociadas entre dois blocos

de países, que mediante configuração adequada podem representar os países do Anexo I e os países em desenvolvimento. O modelo e sua implementação não tiveram como objetivo fazer previsões, mas sondar várias relações funcionais entre alguns elementos do problema que investigamos, e obter referências para uma modelagem integrada mais sofisticada e complexa de questões que envolvam aspectos políticos e institucionais em resposta às mudanças climáticas. (NORDHAUS; BOYER, 1999).

A contribuição deste trabalho é o modelo de análise integrada exploratório, que construímos para responder à pergunta acima juntamente com a sua primeira implementação em computador. Esse modelo difere da maioria dos modelos existentes na área, nos seguintes aspectos:

- a) Contém uma representação dinâmica da seqüência de negociações sobre distribuição de reduções de GEE, indo além dos jogos estáticos comumente usados para modelá-las. Essa abordagem nos permite ter uma visão mais abrangente sobre o processo de longo prazo dessas negociações.
- b) O jogo é jogado por agentes que representam os governos, tendo capacidade antecipatória e adaptativa. Esses agentes são equipados com uma metodologia que lhes permite projetar e analisar evoluções prováveis do clima e seus impactos sobre suas economias, e decidir por uma política de abatimento de emissões. Eles são dotados de um sistema de alerta precoce que os possibilita mudar de curso de ação quando percebem a aproximação de impactos climáticos perigosos prováveis.
- c) Contém uma representação probabilística das incertezas científicas e da evolução de nosso conhecimento de alguns parâmetros chave em mudanças climáticas, incluindo uma interpretação do Artigo 2 da Convenção do Clima, no que se refere ao conceito de interferência antropogênica perigosa.

Através da variação de distribuições de probabilidades associadas a esses parâmetros, exploramos cenários de evolução do conhecimento científico e seu impacto sobre os resultados das negociações. Até o presente não existia um modelo que integrasse todos estes elementos. Ele é um passo a mais na direção da modelagem integrada visando obter uma visão científica útil aos formuladores de políticas nessa área, pois torna explícitas as relações entre o conhecimento científico e as decisões políticas em um mesmo quadro integrado. Embora simples e limitado, o modelo produziu alguns resultados interessantes e fornece algumas sugestões úteis para pesquisa científica posterior e para o aprimoramento do desenho nossas respostas institucionais às mudanças climáticas.

I.4 Uma Visão Geral do Modelo Desenvolvido

Os modelos integrados clima-economia apóiam-se na idéia de que as atividades econômicas baseadas em energia fóssil e outras geram emissões de gases de efeito estufa que uma vez na atmosfera, entram no ciclo global do carbono e aquecem o planeta produzindo impactos na economia, que podem reduzir o seu Produto Interno Bruto, sua taxa de crescimento e o nível de consumo, reduzindo dessa forma o bem estar dos cidadãos.

Figura I.3: Representação esquemática da cadeia causal das mudanças climáticas. As atividades econômicas geram emissões de GEE, que se acumulam na atmosfera, aumentando o desequilíbrio radiativo e aumentando a temperatura da superfície do globo. Este aumento é acompanhado por mudanças climáticas que produzem impactos nos ecossistemas e economias afetando as atividades econômicas negativamente.

Esses modelos representam as interações dinâmicas desses elementos seguindo a cadeia causal das mudanças climáticas, e possibilitando estudar o impacto de longo prazo de políticas de abatimento de emissões realizadas no presente (Figura I.3)

A elevação de temperatura global depende de vários elementos do Sistema do Clima e esses modelos representam de forma muito simplificada o ciclo global do carbono e o balanço energético que produzem o aquecimento global, comparados aos Modelos de Circulação Geral do Oceano e Atmosfera (MCGOA) acoplados. Essa elevação de temperatura está acompanhada de mudanças climáticas regionais, que podem impactar positivamente ou negativamente os ecossistemas e infra-estruturas das economias de cada país (Figura I.4).

Figura I.4: Estrutura básica de um modelo integrado Clima-Economia.

O problema econômico que um país enfrenta em face das mudanças climáticas é o de avaliar custos de abatimento de emissões de GEE e os correspondentes benefícios dos danos evitados pelas reduções de emissões, para escolher a melhor política de proteção dos possíveis impactos negativos. Esses modelos se constituem em ferramentas para fazer essas avaliações e o usuário pode, mediante a seleção de um conjunto de medidas de abatimento, através da mudança dos valores de certas variáveis de controle - tais como taxa de poupança para investimentos em bens de capital (equipamentos) e conseqüentemente na fração de consumo alocada para as reduções de emissões, taxa de crescimento populacional, custos de abatimento e perdas em termos de porcentagem do PIB advindas de

mudanças climáticas - estudar a evolução do sistema e por meio de análises comparativas escolher a política ótima. A manipulação dessas variáveis de controle permite ao usuário fazer vários experimentos de simulação da adoção de certas políticas e analisar os efeitos das mesmas em termos de reduções do aquecimento global, custos, danos evitados, etc.

Alguns modeladores de análise integrada em mudanças climáticas começaram a explorar a idéia de considerar o governo e suas decisões como um agente interno ao próprio modelo e estudar possíveis políticas adaptativas deste agente em face das mudanças observadas no clima e na economia e de seu objetivo de evitar danos climáticos. (LEMPERT ET TAL, 1997). A idéia básica por trás destes modelos é introduzir um terceiro componente para representar internamente a tomada de decisões (Figura I.5). O usuário agora pode também manipular variáveis que definem as características dos agentes decisores internos ao modelo. Essa abordagem é utilizada também em outras áreas de pesquisa e tais modelos são denominados Modelos Baseados em Agentes (MBA) (JENNINGS ET TAL, 1998; MOSS; PAHL-WOHLSTL; DOWNING, 2001).

Os módulos do modelo que são exteriores ao(s) agente(s) representam o papel de meio ambiente onde esses agentes estão imersos e com o qual interagem.

Figura I.5: Estrutura básica de um modelo integrado Clima-Economia baseado em agentes com tomada de decisão endógena.

A modelagem baseada em agentes ainda está ainda muito pouco desenvolvido na pesquisa das mudanças climáticas se comparada aos modelos integrados do primeiro tipo, mas é muito promissora por sua capacidade de representar de forma flexível as características dos agentes, podendo aproximá-las das características dos tomadores de decisões reais e das formas de interação entre si e seu meio ambiente. Com essa abordagem podemos representar, por exemplo, a capacidade adaptativa de agentes decisores reais e estudar possíveis bifurcações na evolução do sistema do clima e econômico em virtude da mudança de curso de suas ações em resposta a certas condições satisfeitas por seu meio ambiente. Por exemplo, (ROBALINO; LEMPert, 1998), modelaram as ações de um governo mundial visando produzir a substituição de tecnologias baseadas em carbono por tecnologias livres de emissões de GEE. Esse governo interage com uma população de agentes que representam decisores corporativos, através das políticas estabelecidas para favorecer as mudanças de tecnologia. Esses agentes, baseados em critérios econômicos e de desempenho tecnológico dos novos equipamentos, escolhem continuar ou substituir sua tecnologia de produção de energia em respostas às políticas do governo. A interação entre os interesses do governo e dos agentes emissores pode redundar em fracasso ou sucesso de uma política de abatimento de emissões. O modelo permite estudar possíveis rotas que algumas dessas políticas, tais como taxações sobre emissões e incentivos para adoção de novas tecnologias, podem apresentar e estratégias que o governo poderia seguir para ter sucesso na redução de emissões de GEE em seu país. O governo é dotado da capacidade de mudar o tipo de política quando antecipa um fracasso de uma estratégia que vinha sendo adotada até então (ROBALINO; LEMPert, 1998).

No presente trabalho construímos um modelo integrado clima-economia-política baseado em agentes para responder a nossa pergunta básica sobre a influência das

incertezas sobre a sequência das negociações sobre abatimento de emissões de GEE. O módulo de tomada de decisões contém agentes, que representam governos de países, que são dotados de capacidade antecipatória e adaptativa e tomam suas decisões de abatimento levando em conta as possíveis decisões uns dos outros a esse respeito. Essa interdependência é modelada como um jogo não cooperativo (Figura I.6).

Figura I.6: Estrutura básica do modelo integrado Clima-Economia-Política baseado em agentes construído no presente trabalho. Ver texto.

No modelo aqui apresentado o sistema econômico global é desdobrado em várias economias nacionais, como no RICE de (NORDHAUS; BOYER, 1999), e cada agente desempenha o triplo papel de governo de seu país, de negociador de acordos para a redução de emissões de GEE e de analista das mudanças climáticas globais e regionais para embasar as suas escolhas de abatimento. Cada agente é capaz de observar as mudanças climáticas

globais e regionais e a sua economia e agir sobre o seu meio através de políticas abatimento de suas emissões, em uma quantidade que é previamente negociada (Figura I.7).

Figura I.7: Diagrama mostrando a estrutura interna de cada agente, que representa um governo que negocia metas de redução de emissões. O agente tem um modelo interno do clima e economia que lhe permite, a partir de observações e informações sobre as incertezas científicas, projetar cenários de mudanças climáticas futuras e sondar possíveis impactos futuros em sua economia. Por meio de regras de adaptação a novas situações e um critério de decisão ele forma uma posição para a próxima negociação. Na negociação é definido o quanto ele abaterá de emissões e em seguida ele cumpre este acordo. Detalhes no Capítulo 2.

(DE VRIES; JANSSEN, 1998) construíram um modelo integrado simples do tipo DICE de (NORDHAUS; BOYER 1999) representando a economia global de forma agregada, e partindo dos trabalhos de (ROBALINO; LEMPert, 1998), criaram uma população de agentes decisores com perspectivas diferentes sobre como o clima e a economia funcionam e como estes sistemas devem ser geridos em face da possibilidade de um aquecimento global. Uma idéia interessante desses autores foi considerar que os agentes

têm um grau de ignorância, que ao longo da evolução do sistema pode diminuir. Dessa forma se a visão de mundo de um grupo de agentes não for a correta, eles poderiam mudar suas perspectivas se adaptando à "realidade" e tomando decisões que se coadunem melhor a ela. Com isso estes autores exploraram alguns cenários, para investigar os efeitos da ignorância, incerteza e aprendizagem sobre a rapidez com que o sistema de agentes pode responder a surpresas climáticas. Nesse modelo existe um sistema mundial, e um decisor unitário global que decide e age conforme a perspectiva predominante, que emerge do sistema de agentes por uma simples média ponderada pela população de cada grupo com diferentes perspectivas sobre as mudanças climáticas.

Inspirados pelo trabalho destes autores, mas avançando em uma diferente direção, construímos agentes que recebem continuamente informações do corpo científico com incertezas sobre os valores de alguns parâmetros chave em mudanças climáticas, e realizam análises para formarem posições para as negociações sobre reduções de emissões (Figura I.7). Introduzimos um modelo da instituição do Regime Político da Convenção do Clima, como um sistema de regras, e neste ambiente institucional os mandatários dos governos nacionais negociam distribuições de reduções de carbono para seus respectivos países.

Introduzimos também um modelo simples de um ambiente de negociações que representa os encontros internacionais³ daquele Regime, para simular de forma simples, mas buscando apreender alguns aspectos chave desse processo, as seqüências das negociações internacionais sobre mudança de clima.

Representamos neste modelo as perspectivas de cada país ou governo sobre o problema de mitigar as mudanças climáticas seguindo uma teoria qualitativa de (SPRINZ;

³ Estes encontros denominam-se Conferência das Partes. Em inglês "Conference of Parties" (COP).

VAAHTORANTA, 1994), que define as atitudes mais prováveis dos governos em negociações de Regimes Internacionais Ambientais. (Para detalhes ver o APÊNDICE C)

Nosso modelo estuda as seqüências de negociações e avalia como as incertezas sobre alguns parâmetros, em um contexto de interesses nacionais, podem determinar a evolução da ação coletiva efetiva para resolver o problema de mitigar o aquecimento global, sobretudo quando existem ameaças de danos severos. Na Figura I.8, vemos os módulos do modelo e o fluxo de informações entre eles.

I.5 Os Temas que serão tratados neste trabalho em cada Capítulo

Nos capítulos seguintes faremos uma exposição dos vários elementos que usamos para construir o modelo integrado completo mostrado da Figura I.8. No Capítulo 1 mostraremos o modelo do meio ambiente dos agentes (Caixa A na Figura I.8). O conceito de meio ambiente desenvolvido é mais amplo do que meio ambiente físico ou econômico. Incluímos também o ambiente de informações, com graus variados de incertezas. Os agentes tomadores de decisões estarão imersos em um ambiente físico e econômico, que denominamos Meio Ambiente de Base. O seu ambiente informacional será constituído por um conjunto de distribuições de probabilidades que representarão os graus de incerteza em uma determinada época. Essas incertezas podem mudar, o que pode levar a diferentes decisões por parte dos agentes ao longo do tempo.

No Capítulo 2 desenvolvemos em detalhe a estrutura geral de um agente típico que representa um governo tomador de decisões que está diante do problema de abater emissões para controlar as mudanças climáticas (Figura I.7). Esses agentes dispõem de ferramentas (modelos e critérios de decisão) para analisarem e decidirem sobre o quanto abater de

emissões. Descrevemos o ciclo de análises e decisões sequenciais de cada governo no problema de mudanças climáticas e desenvolvemos a idéia de dotá-los de dois horizontes de tempo: um para antecipar as mudanças climáticas de longo prazo e outro para planejar políticas de abatimento de emissões de curto prazo. Esses horizontes podem mudar devido ao aprimoramento no conhecimento sobre o clima e economias (Caixa D, Figura I.8).

No Capítulo 3, descrevemos um modelo específico que os governos modelados no capítulo anterior podem usar para fazer suas análises e tomar suas decisões (Caixa B na Figura I.8). Como alguns dos parâmetros chave desse modelo têm incertezas, dotamos os agentes de um ferramental para tratar essas incertezas de forma útil ao seu problema de decisões. No Capítulo 4 desenvolvemos uma metodologia para tratar essas incertezas e traduzimos vários conceitos previamente definidos em termos operacionais.

No Capítulo 5, focalizamos nossa atenção sobre alguns critérios de decisão alternativos que podem ser usados pelos decisores. Mostramos como a decisão final é muito sensível tanto ao critério escolhido quanto à maneira na qual as incertezas são reapresentadas. Definimos, de forma exploratória, impacto climático perigoso e um critério de decisão que leva em conta a aproximação de um limiar. Os agentes mudam suas estratégias de abatimento em resposta a ameaças de danos climáticos perigosos (Caixa D, Figura I.8).

No Capítulo 6 desenvolvemos um modelo simples do Regime da Convenção do Clima (Caixa C da Figura I.8), e de uma negociação típica de redução de emissões, como um jogo não cooperativo (Caixa E, Figura I.8). Um acordo é definido como o Equilíbrio de Nash do jogo. Construímos um modelo da sequência de negociações ao longo deste Século, baseados na Teoria dos Jogos Repetidos, mas modificamos várias das restrições daquela Teoria para adaptá-la ao nosso problema.

No Capítulo 7 descrevemos o protótipo que desenvolvemos para implementar uma versão simples do modelo construído nos capítulos precedentes, considerando dois Blocos de países em uma negociação bilateral, e descrevemos algumas simulações que podem ser feitas com esse protótipo para responder a nossa pergunta principal.

Na conclusão final, resumimos os principais achados desse trabalho, enfatizando a provisoriidade do modelo, mas sua utilidade para sondarmos possíveis evoluções das negociações e seu potencial para modelagens mais sofisticadas. Por fim, fazemos algumas sugestões de uma agenda de pesquisa científica que pode alargar a classe de canários de mudanças climáticas.

Embora cada capítulo tenha sido escrito para desenvolver uma ou mais peças do modelo integrado completo, procuramos dar o máximo de independência a cada um. Cada capítulo pode ser modificado sem muita dificuldade para abordar outros problemas ambientais, além de servir para comunicar a políticos, cientistas e a não especialistas em mudanças climáticas a problemática da tomada de decisões sob incertezas para abater emissões. Eles podem ser usados também para o ensino sobre o tema. O Protótipo é de livre acesso e é uma excelente ferramenta para explorar algumas relações entre as variáveis chave e ter algumas respostas a nossa pergunta central. (Figura I.8).

Figura I.8: Os módulos do modelo desenvolvido neste trabalho e o fluxo de informações entre eles. Cada capítulo constrói uma ou mais partes de cada módulo. No Capítulo 7 realizamos simulações com um protótipo que implementa uma versão simplificada deste modelo.

Capítulo 1

O Modelo do Meio Ambiente de Base e o Ambiente Informacional

1.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é construir o modelo do meio ambiente no qual os governos estarão imersos, observarão os valores das variáveis climáticas e econômicas, tomarão decisões e agirão para mitigar as mudanças climáticas. Este ambiente representa o mundo dos agentes, e será constituído por um ambiente físico do clima global e regional e o ambiente econômico, com as economias de cada país, que denominaremos Meio Ambiente de Base, e um ambiente informacional, que contém a informação gerada pelos cientistas sobre o grau de incertezas em cada época, em seu conhecimento sobre o clima e as economias, que denominaremos Ambiente das Incertezas (Figura 1.1).

Figura 1.1: O ambiente no qual os governos estão imersos é composto de duas partes: um ambiente físico e econômico, chamado Meio Ambiente de Base; e um ambiente informacional, constituído por distribuições de probabilidades que variam no tempo, denominado Ambiente das Incertezas. Essas distribuições referem-se a alguns parâmetros chave sobre mudanças climáticas e mudam pela ação externa do usuário do modelo. Os dois ambientes não interagem entre si.

Os agentes observarão os estados do clima global e os estados de suas economias, e levarão em conta as incertezas sobre os parâmetros que descrevem os sistemas do clima e econômico para tomarem suas decisões. Após analisarem suas opções, agirão somente sobre o Meio Ambiente de Base através do abatimento de suas emissões, procurando evitar uma certa quantidade de danos climáticos. As mudanças do clima e das economias serão produzidas pelas decisões e ações dos agentes, internas ao modelo, enquanto que as mudanças das incertezas serão exógenas, isto é, serão produzidas pelo observador (usuário) do modelo, que configurará cenários de evolução do conhecimento científico das mudanças climáticas.

Existem vários modelos dos sistemas climático e econômico que poderiam desempenhar o papel de meio ambiente de base. Escolhemos como ponto de partida uma versão do modelo Regional Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy (RICE) de (NORDHAUS; BOYER, 1999), dada sua simplicidade e a sua importância em modelagem integrada sobre mudanças climáticas. Ele foi um dos primeiros modelos que integraram o clima e a economia em um único quadro, e para efeitos de calibração, está muito bem documentado, e por isso é uma referência importante para eventuais comparações com os resultados do presente trabalho. Apesar das inúmeras críticas feitas a esse modelo, não queremos introduzir polêmicas sobre o tipo de modelo utilizado, mas somente fixar um modelo de um meio ambiente dentro do qual possamos elaborar os modelos dos agentes e representar possíveis discrepâncias entre este modelo e os modelos que os agentes terão para representar seu meio ambiente de base.

Primeiramente descreveremos um modelo do sistema do clima global e um modelo para as economias nacionais de cada país, que utiliza somente algumas equações do RICE

adaptadas para os nossos propósitos. Após a descrição do Meio Ambiente de Base, modelamos o ambiente informacional, isto é, as incertezas contidas nos estudos dos cientistas sobre as mudanças climáticas, que podemos imaginar que informações comunicadas aos governos através de relatórios regulares, semelhantes aos relatórios do IPCC. Essas informações são fornecidas na forma de distribuições de probabilidades de parâmetros incertos, que são parâmetros - chave para os governos fazerem projeções futuras das mudanças climáticas e avaliar a probabilidade de danos, incluindo danos severos. A evolução do conhecimento sobre as mudanças climáticas será representada como transformações da geometria dessas distribuições e serão produzidas de fora do modelo, pelo usuário ou observados do mesmo. Embora o modelo seja estilizado e caricatural, ele captura alguns elementos importantes do processo de tomada de decisões em mudanças climáticas e, como será visto ao longo deste trabalho, explicita e evidencia várias relações importantes que podem estar determinando a dinâmica das negociações sobre abatimento de emissões.

1.2 O Modelo do Sistema do Clima Global

Existem muitos modelos do clima global que poderiam ser usados para desempenhar aqui o papel do clima de base. Muitos deles são de complexidade intermediária, envolvendo interações entre a Atmosfera, o Oceano com múltiplas camadas, e a Biosfera. Alguns desses modelos representam vários efeitos com retro-alimentações (feedbacks) importantes, tais como a fertilização por CO_2 e seu efeito sobre a fotossíntese terrestre e marinha, bem como a Circulação Termohalina (HOUGHTON, 1997). Esses

modelos representam o clima através de equações diferenciais lineares acopladas. Existem modelos mais simples e muito eficientes que usam Funções de Green e calculam todas as etapas da cadeia causal das mudanças climáticas através de convoluções¹ (HASSELMAN ET TAL, 2001). O RICE de (NORDHAUS; BOYER 1999), por exemplo, representa o sistema do clima com um modelo de três compartimentos, uma para a Atmosfera, um para a Biosfera e a camada de mistura do Oceano, ambos de resposta rápida, e um terceiro para representar o Oceano profundo, com resposta lenta. Ele contém um conjunto de equações lineares para os fluxos de carbono entre estes compartimentos e uma única equação para o forçamento radiativo, de onde se pode derivar o aquecimento global. Apesar destas alternativas escolhemos um modelo ainda mais simples, que não representa vários processos importantes, e que tem bom desempenho somente dentro de certas condições, pois nosso foco aqui é sobre a interação entre as incertezas e as decisões negociadas sobre reduções de emissões. Em um trabalho futuro será importante aprimorarmos a representação do clima, para que possamos também sofisticar os agentes.

A entrada deste modelo é o total de emissões de gases de efeito estufa emitidos por todos os países a cada ano. Sua saída é a elevação de temperatura média superficial global (Fig. 1.2). Ele está baseado em (NORDHAUS, 1992, 1999; DE VRIES & JANSSEM, 1998; WATSON, 2001).

Figura 1.2: Diagrama da Estrutura do Modelo do Sistema do Clima Global

¹ Convoluções são funções integrais em que um dos integrandos é uma Função de Green.

O modelo é constituído de dois sub-modelos: um modelo do ciclo global do carbono e um modelo de balanço energético. As emissões de CO_2 produzem variações na concentração atmosférica desse gás, no sub-modelo do ciclo do carbono, produzindo um desequilíbrio entre os fluxos de energia que entra e sai do sistema, denominado forçamento radiativo, no sub-modelo do balanço energético. Essa variação é acompanhada de uma elevação da temperatura média global, que é a saída do modelo do de balanço energético.

1.2.1 Emissões Globais

Os gases de efeito estufa (GEE) são, por ordem decrescente de abundância, o vapor de água, o CO_2 , o metano, CH_4 , óxido nitroso, N_2O , ozônio troposférico, O_3 e vários CFCs e HCFCs⁴, estes últimos controlados pelo Protocolo de Montreal. O aquecimento global de origem antropogênica é sem dúvida devido principalmente às emissões de CO_2 e por isso, neste trabalho, somente consideraremos esse gás deixando para o futuro a introdução de outros gases de efeito estufa e os aerossóis³.

Sejam $E_i(t)$ as emissões de GEE, no ano t , produzidas pelo país P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, $N \geq 2$, geradas por suas atividades econômicas neste ano. Então o nível de emissões globais $E(t)$ para o mesmo ano será dado por:

$$E(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t) \quad (\text{GtC/ano})^4 \quad (1.1)$$

⁴ Abreviações dos nomes em inglês: CFC: Chloro-fluorocarbons; HCFC: Halogenated Chloro-fluorocarbons.

³ Aerossóis são partículas, de diversos tipos e tamanhos, emitidas por processos naturais e industriais que flutuam na atmosfera e refletem a radiação solar incidente, impedindo parte dessa radiação de chegar à superfície. Erupções vulcânicas emitem grande quantidade de aerossóis.

⁴ Gt C: Giga toneladas de carbono. $1 \text{ Giga} = 10^9$. Gt C / ano = 1 Giga toneladas de carbono por ano.

As emissões parciais de cada país serão geradas pelos processos industriais, que utilizam tecnologias produtoras e consumidoras de energia à base de carbono, e de uso e mudança de uso da terra. No que se refere ao aquecimento global, são as emissões globais, e não locais ou regionais, que devem ser consideradas para calcular o aumento das concentrações dos GEE e da temperatura global, pois os gases ao entrarem na atmosfera são diluídos por toda a atmosfera, produzindo o aquecimento em todo o globo (HOUGHTON, 1997).

As frações das emissões globais anuais podem ser expressas a partir das emissões individuais de cada país. Isto é, para o país P_i , suas emissões relativas são $\nu_i(t) = E_i(t)/E(t)$, $0 \leq \nu_i \leq 1$, tais que

$$\sum_{i=1}^N \nu_i(t) = 1 \quad (1.2)$$

Essa relação é fundamental para analisar as ações conjuntas de controle das emissões de GEE pelos países. Se cada país P_i , reduzir em um ano t , sua emissões em $\mu_i(t)$, relativamente a uma referência, por exemplo, relativamente às emissões em um determinado ano fixo, então a redução total das emissões globais, $\mu(t)$, relativamente à mesma referência será dada por:

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^N \mu_i(t) \cdot \nu_i(t) \quad (\%/ano) \quad (1.3)$$

1.2.2 Concentração Atmosférica de CO_2

O modelo do ciclo do carbono será modelado por meio de dois parâmetros: a taxa de assimilação de CO_2 ao entrar na atmosfera e a taxa de sequestro desses gás pelo Oceano. Esse gás ao entrar na atmosfera é parcialmente recapturado por processos biológicos, fotossíntese em floretas e o bioma marinho, em escalas de tempo curtas, da ordem de dias a um ano. Esses processos envolvem cadeias causais complicadas, por exemplo, o efeito de um aumento na taxa de fotossíntese das plantas devido a uma maior oferta de CO_2 , efeito denominado fertilização das plantas pelo CO_2 atmosférico. Eles estão também acoplados a outros ciclos biogeoquímicos, tais como o do nitrogênio no solo. Esses processos serão representados aqui por um único parâmetro δ_E , que é um número puro tal que $0 \leq \delta_E \leq 1$. Assim, por exemplo, se $\delta_E = 0,5$ isso significa que somente metade do CO_2 injetado na atmosfera pelas emissões antropogênicas anuais permanece neste reservatório.

Um processo também muito importante no ciclo do carbono global é a absorção desse gás pela água do mar. Esse gás ao entrar nas camadas de água superficiais do Oceano se difunde e passa por processos químicos se transformando em carbonatos. Em seguida são assimilados pelos seres marinhos e com sua morte se precipitam no fundo do mar ficando ali depositados por milhares de anos. Esse é um processo bio-físico-químico muito lento, da ordem de décadas a séculos, e depende de forma sensível da temperatura da água do mar. Em águas mais frias a velocidade da reação dos carbonatos é mais lenta. Representaremos esse processo também por um único parâmetro, δ_M , que representará a

escala de tempo característica desse processo, cuja unidade é o inverso da unidade de tempo adotada, por exemplo (ano^{-1}).

A concentração atmosférica de CO_2 no tempo t , é dada pela equação diferencial:

$$\frac{d\text{Conc}}{dt} = \delta_E \cdot \left(\sum_{i=1}^N E_i(t) \right) - \delta_M \text{Conc}(t) \quad (\text{Gt C}) \quad (1.4)$$

Isto é, a taxa de variação da concentração de CO_2 na atmosfera é igual ao fluxo de entrada e permanência, subtraído o fluxo de saída para o Oceano, que é uma fração do nível de concentração daquele mesmo ano. Se adotarmos o “ano” como unidade de tempo, então ano após ano, podemos escrever uma equação diferença correspondente dada por

$$\text{Conc}(t) = \delta_E \cdot E(t) + (1 - \delta_M) \cdot \text{Conc}(t-1) \quad (\text{Gt C}) \quad (1.5)$$

Vários trabalhos que usam os parâmetros da equação acima adotam os valores $\delta_E = 0,5$ e $\delta_M = 0,002 \text{ ano}^{-1}$. Existem muitas incertezas sobre estes parâmetros e se considerarmos que eles representam processos muito complicados, os valores acima devem ser vistos com cautela (ROBALINO; LEMPert, 1998).

1.2.3 Aumento da Temperatura Média Global

O modelo de balanço energético tem dois parâmetros: a sensibilidade climática devido à duplicação das concentrações de CO_2 relativamente ao período pré-industrial e a

inércia térmica do Oceano. Uma vez que a concentração atmosférica de CO_2 aumenta, a radiação infra-vermelha emitida pela terra para o espaço é retida em maiores frações, do que no nível de concentração inicial. Essa mudança da quantidade de energia retida na superfície terrestre produz um desequilíbrio no topo da atmosfera entre os fluxos de entrada e saída de radiação. A esse desequilíbrio denomina-se forçamento radiativo.

O forçamento radiativo é um conceito que nos permite comparar efeitos de diferentes constituintes atmosféricos. Ele pode ser definido, de forma conveniente, como a variação no fluxo médio líquido de radiação no topo da troposfera⁵. Qualquer mudança que produza um desequilíbrio no balanço radiativo no topo da troposfera se constitui em um forçamento radiativo. Assim a alteração de concentrações de gases de efeito estufa ou o aumento da concentração de aerossóis produz forçamento radiativo. No primeiro caso o forçamento é positivo, pois tende a aquecer a superfície, no segundo caso negativo, pois tende a esfriar a superfície (HOUGHTON, 1997).

O forçamento radiativo $\Delta F(t)$ é de acordo com (WATSON, 2001):

$$\Delta F(t) = 6.3 \cdot \ln\left(\frac{C(t)}{C(t_0)}\right) \quad (\text{W} / \text{m}^2) \quad (1.6)$$

Por definição a elevação de temperatura de equilíbrio, é dada por

$$\Delta T_{\text{Eq}} = \eta \cdot \Delta F(t) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.7)$$

⁵ A atmosfera pode ser dividida em camadas segundo faixas de pressão ou densidade de ar. A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera e seu topo corresponde a uma pressão de 500 milibares (HOUGHTON, 1997)

Para uma duplicação da concentração de CO_2 na equação (1.6) podemos obter por simples substituição em (1.7) o valor da constante η , e em seguida obter uma expressão para a elevação da temperatura média global de equilíbrio:

$$\Delta T_{\text{Eq}}(t) = \frac{\Delta T_{2\times\text{CO}_2}}{\ln 2} \cdot \ln \left[\frac{C(t)}{C(t_0)} \right] \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.8)$$

onde $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$ é a mudança de temperatura média global na eventualidade de uma duplicação da concentração atmosférica de CO_2 (WATSON, 2001). Esse parâmetro é denominado Sensibilidade Climática (SC) e pode ser calculado para qualquer concentração de referência e qualquer concentração final. A concentração $C(t_0)$ é a concentração no ano base t_0 , que podemos tomar, por exemplo, como 1990 ou como 1780, no período pré-industrial (DE VRIES; JANSSEN, 1998). Essa variação de temperatura é uma medida da resposta instantânea da atmosfera às variações em sua concentração, isto é, do aumento de temperatura para um dado aumento de concentração, supondo-se que a atmosfera esteja em equilíbrio térmico com o Oceano. . Sua melhor estimativa é 2,5 $^\circ\text{C}$, mas existem ainda muitas incertezas sobre este valor, sendo mais correto assumir que ele está no intervalo (1.5 $^\circ\text{C}$ - 4.5 $^\circ\text{C}$), (HOUGHTON; JENKINS; EPHRAUMS, 1992; WATSON, 2001).

1.2.4 A Inércia Térmica do Oceano e o Aquecimento Realizado

Os oceanos levam muito tempo para aquecer, devido à grande capacidade térmica de suas águas e pela lentidão dos processos de transporte de calor em seu interior, o

aumento real da temperatura ΔT estará sempre atrasado com relação ao aumento potencial ΔT^P da resposta de equilíbrio (Figura. 1.3). Esse efeito é modelado pela equação:

$$\frac{d\Delta T}{dt} = \beta \cdot (\Delta T_{Eq} - \Delta T) \quad (^\circ\text{C} / \text{ano}) \quad (1.9)$$

onde β expressa a difusividade térmica oceânica (DO). Assumindo, por exemplo um valor $\beta = 0.05, (\text{ano}^{-1})$, teremos um atraso da ordem de 20 anos. Este parâmetro é ainda muito incerto, e sujeito a controvérsias, sendo que a melhor posição é assumir que esteja no intervalo $(0.05, 0.0071) \text{ ano}^{-1}$, que corresponde a um intervalo de inércia térmica do Oceano de 20 a 140 anos, (SARMIENTO, 1991)

Se considerarmos um processo em tempo discreto, podemos escrever uma equação de diferenças finitas associada à Equação (1.9), isto é:

$$\Delta T(t+1) = \Delta T(t) + \beta (\Delta T_{eq}(t) - \Delta T(t)) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.10)$$

Nessa expressão, adotamos como unidade de tempos o ano e como constante de tempo $\Delta t = 1$ ano. Se a temperatura média global T no ano $(t-1)$ é $T(t-1)$, então no ano t , ela será:

$$T(t) = T(t-1) + \Delta T(t-1, t) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.11)$$

Se tomarmos um ano t_0 como referência para medirmos a elevação de temperatura global, então, a temperatura $T(t)$ no ano t será:

$$T(t) = T(t_0) + \Delta T(t_0, t) \quad (^\circ\text{C}) \quad (1.12)$$

A evolução da temperatura depende da maneira como o aumento realizado ΔT varia com o tempo. Pelas equações acima, vemos que essa variação dependerá dos valores da sensibilidade climática e da inércia térmica do Oceano.

Para cada par dos parâmetros SC e DO, dentro dos respectivos intervalos de confiança, teremos um Sistema do Clima possível, relativamente ao conhecimento científico atual.

1.3 O Modelo das Economias Nacionais

A seguir descreveremos um modelo simplificado de uma economia nacional que pode ser replicado para representar as várias economias do mundo. O modelo usado foi um dos primeiros modelos de crescimento econômico construído pelos economistas, formulado por (SOLOW, 1956), e tem no contexto do presente trabalho unicamente o objetivo de, a partir de uma decisão simples de um planejador central, gerar uma curva de crescimento econômico. Cada economia poderá ser diferenciada através de valores específicos. O modelo é composto de três módulos: a) um modelo simples de crescimento demográfico; b) um modelo para o crescimento econômico e emissões de GEE; e c) um terceiro modelo, para as Perdas Sociais advindas das mudanças climáticas e das decisões de abatimento de emissões de GEE (Figura 1.3).

Figura 1.3: Diagrama mostrando a estrutura do modelo típico de uma das economias nacionais do Modelo Econômico Global e seus elos com outros módulos do modelo integrado clima-economia-política. O modelo do sistema econômico é replicado para representar as economias de vários países.

O modelo tem duas entradas: 1) uma decisão de investimento em capital, ou alternativamente, uma decisão da fração do Produto total para consumo. Essa decisão dependerá dos objetivos de cada governo, que são modelados à parte do modelo do Meio Ambiente de Base (Ver Capítulo 2); e 2) a elevação de temperatura, que vai definir o nível de danos na economia (Figura 1.4). Além disso, o modelo tem duas saídas: 1) uma quantidade de emissões de GEE para a atmosfera (que é uma entrada no modelo do clima descrito acima); 2) o valor do produto líquido ou nível de consumo, consideradas as Perdas Sociais Totais (que é uma entrada para o modelo do governo dessa economia) (Figura 1.3 e Figura 1.4).

Figura 1.4: Exemplo de um mundo com três países, ou Blocos de países, e sua interação com os modelos dos governos e do modelo do clima. Por simples replicação do modelo desenvolvido aqui podemos obter os modelos de vários países, diferenciando-os nos valores de alguns parâmetros.

Suporemos que os países têm economias fechadas, isto é, sem comércio exterior, e sem comércio de créditos de carbono. Suporemos também que não há transferência de tecnologias. Além disso, não consideraremos aqui o sequestro de carbono através de sumidouros biológicos, por exemplo, florestas, como opção de política de mitigação do aquecimento global. Todos esses aspectos poderão ser considerados em trabalhos futuros, pois introduzem dimensões muito importantes ao problema geral aqui tratado.

O objetivo não é formular um modelo macroeconômico sofisticado visando a representar os vários aspectos que determinam o crescimento econômico de uma economia, tal como o avanço técnico produzido por investimentos em pesquisa e desenvolvimento, ou uma representação detalhada sobre os insumos no setor produtivo, tal como as possíveis composições de tipos de energia, fóssil e renovável. A complexidade de um modelo de crescimento exige uma complexidade correspondente dos agentes que agirão sobre suas economias, pois a cada variável de política econômica introduzida no modelo deve-se construir um mecanismo de decisão do agente para dotá-lo da capacidade de escolher e executar aquela política. A construção de mecanismos de decisão complexos foge do escopo deste trabalho (Ver capítulos 2, 3 e 4 para os mecanismos de decisão considerados neste trabalho).

1.3.1 A Demografia

A cada país atribuiremos uma população $Pop_i(t)$ na data t . A variação da população é proporcional à base da população, que cresce a uma taxa ϕ_i , constante no tempo, definida de maneira exógena. Assim, a população do país i , na data t , será dada por:

$$\frac{dPop_i(t)}{dt} = \phi_i \cdot Pop_i(t) \quad (\text{Habitantes/Ano}) \quad (1.13)$$

$$Pop_i(t) = Pop_i(0) \cdot EXP(\phi_i \cdot t) \quad (\text{Habitantes}) \quad (1.14)$$

onde $Pop_i(0)$ é a população em uma data inicial de referência e $EXP(.)$ é a função exponencial natural. A população mundial será simplesmente, a cada ano, a soma de todas as populações dos N países. Isto é:

$$Pop(t) = \sum_i Pop_i(t) \quad (\text{Habitantes}) \quad (1.15)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots N$. No modelo RICE, por exemplo, a taxa de crescimento é variável produzindo um crescimento assintótico da população mundial em aproximadamente 11 bilhões e habitantes por volta do ano 2050.

1.3.2 O Sistema de Produção

Segundo (SOLOW, 1956), o crescimento de uma economia capitalista pode ser compreendido como um processo circular que tem dois fatores de produção, a força de trabalho e o capital físico. Estes fatores de produção são combinados de uma maneira específica, que é a técnica de produção da economia, e essa combinação gera um produto final. Parte desse produto é investido na produção na forma de capital, e o restante é consumido (Fig. 1.5). Esse processo, segundo Solow, pode ser descrito por duas equações.

Figura 1.5: O processo circular de uma economia, segundo Solow, que sustenta os crescimentos per capita do capital, K , e do produto, Y . L é a força de trabalho, I o investimento em capital, e C o consumo. A técnica é representada por uma Função de Produção do tipo Cobb-Douglas. Para as definições dos símbolos consultar o texto.

Uma é a equação que descreve como aumenta o Produto Interno da economia de um país i , $Y_i(t)$:

$$Y_i(t) = v_i \cdot A_i(t) \cdot K_i(t)^{\gamma_i} \cdot L_i(t)^{1-\gamma_i} \quad (\text{Bens}) \quad (1.16)$$

onde $A_i(t)$ é um número puro e expressa o nível de avanço técnico do país. Aqui consideraremos que o conhecimento técnico avança exponencialmente a uma taxa g_{A_i} constante, definida maneira exógena para cada país. Além disso, $A_i(t) \geq 1$. A grandeza $K_i(t)$ expressa o estoque de capital físico, isto é, máquinas e equipamentos, da economia de cada país, e $L_i(t)$ é população economicamente ativa, que no contexto deste trabalho pode ser igualada à população total do país. O parâmetro γ_i é a elasticidade do produto com relação ao estoque de capital no país i , e é tal que $0 \leq \gamma_i \leq 1$. A função no segundo membro da equação 1.16 é denominada Função de Produção Cobb-Douglas. Ela expressa a técnica de produção no país, isto é, a maneira em que os insumos, capital e trabalho são

combinados na produção dos bens finais. Supomos aqui uma economia de um único Bem. O parâmetro ν_i é de calibração para transformarmos as unidades de Bens para unidades monetárias, por exemplo, U\$\$. (DE VRIES; JANSSEM, 1998).

A outra equação do modelo de Solow é a de acumulação de capital físico na economia. Isto é,

$$dK_i(t)/dt = s_i(t).Y_i(t) - \delta_{K_i}K_i(t) \quad (\text{Bens / ano}) \quad (1.17)$$

onde $s_i(t)$ é a taxa de poupança ou investimento em capital da economia no ano t , do país P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, e δ_{K_i} , $0 \leq \delta_{K_i} \leq 1$, é a taxa de depreciação do estoque de capital da economia e será definida exógenamente e será considerada constante para todas as economias. Por exemplo, se $\delta_{K_i} = 0.1$ o estoque de capital físico deprecia-se a uma taxa de 10% ao ano.

O significado da equação acima é o seguinte: para que o estoque de capital cresça é necessário que o investimento, $I_i(t) = s_i(t).Y_i(t)$, que é uma fração do produto interno anual, seja maior que a taxa de depreciação. Ou seja, esse investimento deve repor o capital depreciado e aumentá-lo ainda mais a cada ano se se quiser que esse estoque aumente de forma sustentada. Se o investimento somente repuser o capital depreciado, teremos um estoque de capital constante.

A taxa de investimento $s_i(t)$ expressa a disposição da sociedade em poupar parte do produto que seria para seu consumo a fim de manter o crescimento da economia como um todo. Dessa forma, podemos expressar o produto total da economia como sendo:

$$Y_i(t) = s_i(t).Y_i(t) + (1 - s_i(t)).Y_i(t) \quad (\text{Bens}) \quad (1.18)$$

Onde o último termo do segundo membro é o produto consumido pela população $Pop_i(t)$ no ano t . e será denotado por $CS_i(t)$. Assim,

$$CS_i(t) = (1 - s_i(t)).Y_i(t) \quad (\text{Bens}) \quad (1.19)$$

Notemos que quanto mais uma sociedade poupa (investe) para crescimento futuro, menos ela consome no presente. Em um modelo como o de Solow taxa de poupança é uma variável de controle e podemos supor que o governo de cada país ao decidir poupar uma certa fração de seu produto anual, escolhendo um $s_i(t)$, expressa a disposição de toda a sociedade que ele representa.

Uma vez definido o valor de $K_i(t)$, pode-se obter da primeira equação o valor de $Y_i(t)$ a cada período, e depois de forma circular, com uma taxa de investimento em capital obtém-se um novo estoque de capital, que por sua vez gera um novo nível do produto, $Y_i(t)$, e assim por diante (Figura 1.6).

1.3.3 Discretização das Equações de Crescimento

Como estamos considerando um modelo em tempo discreto, as equações do modelo econômico devem ser transformadas para variáveis discretas. A equação diferencial 1.13 pode ser rescrita em diferenças finitas e se tomarmos a constante de tempo igual à unidade, termos:

$$\text{Pop}_i(t) = (1 + \varphi_i) \cdot \text{Pop}_i(t-1) \quad (\text{Habitantes}) \quad (1.20)$$

A equação diferencial de acúmulo de capital, (Equação 1.17), passa a ser escrita em diferenças finitas:

$$K_i(t) = I_i(t) + (1 - \delta_{K_i}) \cdot K_i \quad (\text{Bens}) \quad (1.21)$$

E a função de produção, (Equação 1.16) permanece a mesma, com a ressalva de que a variável tempo é discreta.

1.4 Emissões e Políticas de Redução

As emissões de GEE ocorrem devido a vários processos na economia, tais como produção de cimento, plantio de arroz, queima de gasolina, queima de carvão mineral, etc. A principal fonte de GEE para a atmosfera é ao queima de combustíveis fósseis para gerar energia em processos industriais e transportes. Para efeitos de emissões de compostos de carbono para a Atmosfera, uma economia pode ser caracterizada por um parâmetro que mede a eficiência dos processos de produção com relação à quantidade de carbono emitida nesses processos. Essa quantidade é um valor médio, e denomina-se Intensidade de Carbono e será denotada por $\sigma_i(t)$. Cada economia tem em uma dada época uma intensidade de carbono característica, que reflete indiretamente o quanto as tecnologias nessa economia dependem de combustíveis fósseis. Quanto maior seu valor, maior é a

quantidade de carbono emitido por unidade de produto gerado no processo produtivo. Se existisse uma economia livre de carbono sua intensidade de carbono seria nula. As emissões de carbono podem ser expressas por uma identidade simples:

$$E_i(t) = \sigma_i(t) \cdot Y_i(t) \quad (\text{GtC / ano / Bens}) \quad (1.22)$$

A intensidade de carbono pode mudar ao longo do tempo, seguindo o avanço tecnológico tornando equipamentos e processos mais eficientes em uso de energia e menos intensivos em carbono. Ela pode mudar também através de políticas de reduções de emissões de GEE, por meio de aumento de eficiência e por substituição de tecnologias dependentes de carbono por outras livres de carbono, por exemplo, usando recursos renováveis tais como bio-combustíveis. Independentemente de políticas de mitigação de emissões de GEE, é observado um processo natural de diminuição da intensidade de carbono nas economias. Historicamente, ao longo do Século XX, a intensidade de carbono mundial caiu a uma taxa de aproximadamente 0,3 % / ano (GOLDENBERG, 1998).

Uma ação de redução de emissões será representada neste trabalho por um conjunto de ações na economia tal que a sua intensidade de carbono seja reduzida. Nestes termos que se um governo reduz suas emissões no ano t , a uma taxa de $\mu_i(t)\%$ naquele ano, relativamente às suas emissões em uma data de referência, podemos escrever que o seu novo nível de emissões é dado por:

$$E_i(t) = \sigma_i^*(t) \cdot Y_i(t) \quad (\text{GtC / ano}) \quad (1.23)$$

onde $\sigma_i^*(t)$ é a nova intensidade de carbono. Essa nova intensidade é obtida pela expressão:

$$\sigma_i^*(t) = (1 - \mu_i(t)) \cdot \sigma_i(t) \quad (\text{GtC / ano / Bens}) \quad (1.24)$$

E por isso, a expressão completa para as emissões é:

$$E_i(t) = (1 - \mu_i(t)) \cdot \sigma_i(t) \cdot Y_i(t) \quad (\text{GtC / ano}) \quad (1.25)$$

(Para mais detalhes, ver Capítulo 3).

1.5 Perdas Sociais

1.5.1 Custos de Abatimento de Emissões

Seguindo (NORDHAUS; BOYER, 1999), os custos totais de abatimento em um país podem ser expressos como uma fração do produto nacional $Y_i(t)$ como:

$$C(t) = [1 - (b_i \cdot \mu_i(t)^{\varphi_i})] \cdot Y_i(t) \quad (\text{Bens}) \quad (1.26)$$

onde $Y_i(t)$ é o produto sem redução de emissões e $\mu_i(t)$ é a taxa de abatimento das emissões. Os parâmetros b_i e φ_i definem a intensidade dos custos, para uma dada quantidade de emissões abatida. O segundo termo dentro dos colchetes é uma grandeza que expressa a porcentagem do produto que é consumida em abatimento de emissões. Cada

economia tem um custo marginal de abatimento de emissões de GEE, e este fato está implícito na expressão acima. (Para mais detalhes ver Capítulo 3)

1.5.2 Danos Climáticos Regionais

O dano econômico agregado em cada país a partir da mudança climática, no ano t , é a valoração em termos monetários dos impactos climáticos no país. Ele tem sido representado por diversos estudos econômicos por uma lei de potência do aumento da temperatura média superficial global, $\Delta T(t)$ (NORDHAUS, 1992; NORDHAUS; BOYER, 1999; ROUGHGARDEN; SCHNEIDER, 1999) Em geral os parâmetros dessa lei definirão os danos agregados regionais devido aos impactos das mudanças climáticas. Seguindo esta abordagem, o dano econômico de um país será representado como uma fração (porcentagem) do seu produto nacional e será expresso por uma função do aumento de temperatura realizada $\Delta T(t)$:

$$d_i(t) = \left(\alpha_i \cdot \Delta T(t)^{\theta_i} \right) \quad (\%) \quad (1.27)$$

onde α_i é um índice de vulnerabilidade climática. O expoente θ_i expressa o grau de não linearidade dos danos climáticos. Um levantamento sobre vários estudos que utilizaram esta função para calcular os danos, verificou que não existe acordo geral sobre os valores destes parâmetros. O índice de vulnerabilidade está no intervalo $[0,001; 0,035]$ e o expoente no intervalo $[1,23; 3,5]$ (ROUGHGARDEN; SCHNEIDER, 1999).

1.5.3 – A Perda Total Devido às Mudanças Climáticas

Segundo (NORDHAUS; BOYER, 1999) Perda Total Percentual é definida como:

$$S_i(t) = \frac{1 - b_i \cdot \mu_i(t)^{\varphi_i}}{1 + \alpha_i \cdot T(t)^{\theta_i}} \quad (\%) \quad (1.28)$$

O Produto Interno final será:

$$Y_i^{**} = S_i(t) \cdot Y_i(t) \quad (\text{Bens}) \quad (1.29)$$

Onde $Y_i(t)$ é o produto interno bruto que o país teria sem a redução de emissões e sem os danos climáticos e $Y_i^*(t)$ é o PIB resultante, considerando as perdas $\Phi_i(t)$ devida aos danos climáticos e custos de abatimento de emissões.

A expressão das perdas climáticas na Equação 1.28 é uma aproximação para a expressão:

$$PS_i(t) = (1 - b_i \cdot \mu_i(t)^{\varphi_i}) \cdot (1 - \alpha_i \cdot T(t)^{\theta_i}) \quad (\%) \quad (1.30)$$

que é a expressão exata e natural das perdas percentuais do produto interno. O uso de uma ou outra expressão depende dos objetivos da pesquisa. Aqui usaremos a Equação 1.30, por ser mais simples e natural (ROUGHGARDEN; SCHNEIDER, 1999), por exemplo, apesar de saberem que a Equação 1.28 é aproximada, usam-na, pois fazem um estudo comparativo

de valores de parâmetros do DICE de (NORDHAUS, 1992). A partir de 1.32, a expressão final para o produto interno será:

$$Y_i^{**}(t) = PS_i \cdot Y_i(t) \quad (\text{Bens}) \quad (1.31)$$

1.6 Discrepâncias Entre os Modelos de Uso dos Governos e o Meio Ambiente de Base

No Capítulo 3, desenvolveremos os modelos do clima e da economia, que um governo usa para fazer suas análises e tomar suas decisões de abatimento de GEE. Em princípio os dois modelos, aquele aqui apresentado do meio ambiente de base e o de uso dos governos, podem discordar completamente, significando que os agentes cometem erros muito grandes de representação de seu meio ambiente. Adotaremos, entretanto, modelos de uso dois agentes que se assemelharão em alguns aspectos aos modelos do meio ambiente de base descritos acima. Os erros dos agentes no que se refere ao clima dirão respeito à escolha de valores distintos para alguns parâmetros. No modelo da economia, os agentes terão modelos mais simples que o de Solow. A perda social total, entretanto será calculada com as mesmas equações desenvolvidas aqui, com valores dos parâmetros eventualmente distintos (Ver Capítulo 3). O nosso objetivo será explorar discrepâncias iniciais entre os modelos de uso dos governos, (suas “visões” do mundo) e o meio ambiente de base, (a “realidade”), e simular processos de adequação entre a “visão” dos governos e a “realidade”.

1.7 O Modelo Informacional com Incertezas

No modelo desenvolvido neste trabalho, representamos as incertezas em mudanças climáticas através de distribuições de probabilidades. A questão sobre a legitimidade de usarmos probabilidades para representar incertezas de vários tipos incluindo incertezas sobre o comportamento humano, tem trazido um intenso debate entre os especialistas e por isso descreveremos abaixo o que entendemos por probabilidade e em que base conceitual nos apoiamos para fazermos essas representações. Uma vez justificada nossa postura, partimos para modelar as incertezas em mudanças climáticas como distribuições de probabilidades provisórias e por isso mesmo móveis no tempo. Descrevemos as representações de cada parâmetro incerto escolhido para nossas sondagens e definimos velocidade de mudança de uma incerteza paramétrica.

A questão da evolução e dos impactos do aquecimento global produzido pelo homem definitivamente abunda de incertezas: incertezas em prever o ritmo e a magnitude das mudanças climáticas futuras causadas pelas emissões de gases de efeito estufa, incertezas em prever os impactos econômicos, ecológicos e sociais e incertezas em prever a eficácia e os custos de opções políticas (JACOBY; PRINN, 1994; MADDISON, 1995). Sobre este solo, a questão de como lidar com as mudanças climáticas também não é uma questão bem entendida. Os especialistas discordam significativamente em suas recomendações de como agir. Além disso, existem discordâncias na maneira de tratar essas incertezas e um esforço tem sido realizado na direção de padronizar as formas de comunicar incertezas aos tomadores de decisões (MANNING ET TAL, 2004).

A discussão a seguir sobre a aplicabilidade de probabilidades em mudanças climáticas está baseado em vários autores, mas, sobretudo no trabalho de (DESSAI,

HULME, 2003). Esta questão é extremamente importante e terá cada vez mais um destaque nos relatórios do IPCC (MANNING, 2004). O modelo das incertezas como distribuições de probabilidades baseia-se em (WEBSTER, 1997), que construiu várias distribuições Beta para representar as incertezas paramétricas existentes em vários modelos de mudanças climáticas. O modelo de evolução de conhecimento, com velocidades de transição é novo, embora represente idéias comuns e muito difundidas entre os analistas de mudanças climáticas.

1.7.1 O Conceito de Probabilidade em Mudança de Clima

O uso de probabilidades é um ingrediente importante na determinação do risco das mudanças climáticas por quantificarem as chances de um certo evento ou acidente natural, seja de uma mudança climática ou sobre os impactos advindos dessa mudança. Funções de distribuição de probabilidades são um dentre vários métodos para representar incertezas das projeções de mudanças climáticas.

É importante notarmos os diferentes significados que o termo “probabilidade” pode ter. Meteorologistas e gestores e engenheiros de recursos hídricos freqüentemente usam probabilidades baseadas em registros históricos, quando, por exemplo, buscam determinar o período de retorno de uma seca, ou uma enchente de ciclo decadal ou secular. Estes tipos de probabilidades são chamados freqüencialistas, ou clássicas, porque elas são determinadas pelas observações de ocorrência de um evento. Em contraste, as probabilidades em análise das mudanças climáticas são subjetivas⁶, porque elas estão

⁶ Também denominadas probabilidades bayesianas, por estarem baseadas no Teorema de Bayes que relaciona observações de evidências com hipóteses sobre ocorrências de eventos.

baseadas no grau de crença de um especialista sobre a ocorrência de um certo fenômeno, dada toda a informação relevante conhecida atualmente por esse especialista (MORGAN; HENRION, 1990). Embora os analistas de mudanças de clima preferissem ter probabilidades freqüencialistas para poderem avaliar os riscos de impactos específicos, o que facilitaria em muito as medidas de adaptação às mudanças de clima, somente probabilidades subjetivas ou altamente condicionais podem ser produzidas. A razão principal para essas diferenças reside no fato de que as mudanças climáticas de origem antropogênica nunca ocorreram no passado, não existindo registro de freqüências dessas mudanças. Será esse o significado que atribuiremos neste trabalho aos termos probabilidade e distribuição de probabilidades.

1.7.2 As Esferas de Incerteza em Mudanças Climáticas

A partir dos usos dos termos risco, incerteza e ignorância por vários especialistas em mudanças climáticas (DESSAI; HULME, 2003) chegaram a um quadro conceitual que delimita o significado destes termos. A Figura 1.6 tenta capturar estes elementos, onde o significado de cada termo é indicado por um semicírculo. O conceito de risco, (que engloba o primeiro círculo na Figura 1.6), está associado a situações onde se faz uso principalmente de probabilidades freqüencialistas, mas algumas vezes subjetivas. Por exemplo, a questão “Qual é o risco de que choverá amanhã?” poderia ser respondida usando séries temporais de precipitações, com probabilidades freqüencialistas, ou predições provenientes de modelagem numérica que atribuem probabilidades subjetivas a alguns parâmetros do modelo.

Existe uma esfera de incertezas na qual as probabilidades subjetivas e análise de cenários são usualmente aplicadas (Faixa circular central na Figura 1.6). Um exemplo

Figura 1.6: O reino das probabilidades e outros métodos para representar incertezas quando se compara o conhecimento sobre os resultados com o conhecimento sobre as probabilidades. Modificado de (DESSAI; HULME, 2003)

típico é a declaração do Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2001) de que as projeções de aumento da temperatura desde 1990 até 2100 estão entre 1,4 °C e 5,8 °C.

O cálculo destes números envolveu considerar diferentes cenários de desenvolvimento do mundo até 2100. Estas “visões” ou “futuros” foram convertidas em trajetórias de emissões por vários modelos clima-energia-economia determinísticos (NAKICENOVIC; SWART,

2000) e em seguida outro modelo converteu as emissões de GEE em concentrações atmosféricas, em forçamento radiativo, e finalmente em mudanças de temperatura e elevação do nível do mar (RAPER ET TAL, 2000).

Existem situações no âmbito das pesquisas em mudanças climáticas, que são melhores descritas pelo termo ignorância, (faixa circular exterior da Figura 1.6), não existe base para as probabilidades e não conhecemos qualquer tipo de resposta adequada as nossas questões. Por exemplo, “Qual é a máxima concentração atmosférica de GEE que o planeta pode suportar sem colocar em perigo a vida como a conhecemos hoje?” é uma pergunta para a qual ninguém tem uma resposta adequada. A ignorância é uma situação na qual não existe geralmente qualquer base crível para se aplicar as técnicas sofisticadas da teoria das probabilidades (STIRLING, 1998), embora haja uma tentativa de superar situações de quase ignorância, que é a Teoria de Dempster-Shafer que generaliza o cálculo de probabilidades (KRAUSE; CLARK; 1993). Outras tentativas de tratamento da ignorância em mudanças climáticas incluem os conceitos de “surpresas imagináveis” (SCHNEIDER ET TAL, 1998) e “surpresa climática” (STREETS; GLANTZ, 2000). De acordo com estes autores, uma surpresa é a condição na qual um evento, processo ou resultado não é conhecido ou esperado, e eles exploram diferentes taxonomias de surpresa e sua utilidade política em mudanças climáticas.

1.7.3 A Origem e Natureza das Incertezas em Mudanças Climáticas

Não existe nenhuma tipologia universal sobre incertezas. A distinção em tipos de incertezas tem sido feita unicamente para propósitos práticos ao lidar com problemas complexos. Por exemplo, (WALKER ET TAL, 2003) classifica incerteza de acordo com

três dimensões: i) sua “localização”, isto é, onde ela ocorre: por exemplo, nos julgamentos de especialistas, nos modelos, nos dados; ii) seu “nível”, isto é, onde a incerteza se manifesta no espectro que vai gradualmente do determinismo, passando pela probabilidade e possibilidade, até chegar na ignorância; iii) sua “natureza”, isto é, se a incerteza vem principalmente de imperfeição de conhecimento ou é uma consequência direta da variabilidade inerente do sistema estudado. Nosso interesse neste trabalho é adotar um ponto de vista prático com relação às incertezas, procurando representá-las por meio de distribuições de probabilidades e por isso é importante compreender que tipo de conhecimento incerto permite esta representação.

Segundo (DESSAI; HULME, 2003) a grande incerteza que existe na faixa de projeções da temperatura média global do IPCC vem a partir tanto do que eles chamam de conhecimento “incompleto”, quanto do que denominam conhecimento “inatingível”. O primeiro tipo de incertezas, também denominadas “incertezas epistêmicas”, ou subjetivas, dependem somente do estágio atual do conhecimento e podem ser reduzidas com o tempo. A segunda espécie, denominadas “incertezas estocásticas” ou aleatórias, não podem ser reduzidas devido à variabilidade intrínseca do sistema do clima e dos sistemas sociais, e por isso esses autores as chamam conhecimento inatingível.

As incertezas epistêmicas surgem a partir de conhecimento incompleto dos fatores que influenciam os eventos e os processos. Em relação às mudanças climáticas este tipo de incerteza inclui, por exemplo, valores desconhecidos para a sensibilidade climática e a taxa de seqüestro de calor do Oceano profundo ou a parametrização de um modelo de impactos climáticos. O conhecimento inatingível deriva da indeterminação dos sistemas humanos e da imprevisibilidade do sistema do clima. Por exemplo, as emissões globais de GEE, por dependerem do comportamento humano, tal como a taxa de fertilidade humana futura, são

inerentemente incertas. O sistema do clima é também imprevisível em uma certa extensão, no sentido estocástico, devido a sua natureza caótica, isto é, pequenas diferenças nas condições iniciais de um modelo de mudança de clima global podem levar a resultados muito diferentes em termos de aquecimento global e elevação do nível médio do mar (LORENZ, 1993; SMITH, 2002).

No contexto desses dois tipos de incerteza tem existido uma controvérsia sobre a adequação da representação probabilística das incertezas em mudanças climáticas. Para (DESSAI; HULME, 2003) é no contexto do conhecimento incompleto das mudanças climáticas que se ajusta perfeitamente o conceito de incerteza epistêmica no sentido de que ao se coletar mais informação, este tipo de incerteza pode ser reduzida, embora seja possível que a incerteza aumente com mais pesquisa (MANNING ET TAL, 2004).

A representação de incertezas epistêmicas através de distribuições de probabilidades baseadas em evidências científicas, ou através do julgamento de especialistas, tem sido relativamente bem aceita entre os estudiosos de mudança de clima, embora a agregação da opinião de especialistas seja ainda controversa (CLEMEN; WINKLER, 1999). Em mudanças climáticas, o conhecimento inatingível não se traduz somente em incerteza estocástica e esta é a área onde a divisão entre cientistas naturais e sociais é mais notável.

A incerteza estocástica vem da variabilidade nas populações conhecidas ou observáveis e, portanto representa aleatoriedade nas amostras. Este tipo de incerteza surge, por exemplo, quando nós tentamos prever o tempo e o clima, e os cientistas têm tentado superá-la com as chamadas simulações “ensemble” que é um método que atribui uma distribuição de probabilidades sobre valores obtidos por experimentos de simulações de modelos climáticos (MITCHELL ET TAL, 1999). Embora não completamente probabilística, por causa dos vínculos ou restrições computacionais, espera-se que este tipo

de incerteza estocástica seja melhor representada no futuro conforme o poder computacional aumente (ALLEN, 1999).

Em Ciências Sociais o tratamento das incertezas estocásticas tem sido mais problemático. Por exemplo, atribuir probabilidades às trajetórias de desenvolvimento de um país ou do mundo e conseqüentemente às emissões de GEE, tem levado a um intenso debate no qual alguns autores argumentam que as probabilidades em ciências naturais são diferentes das probabilidades em ciências sociais, por exemplo, (GRUBLER; NAKICENOVIC, 2001), enquanto que outros afirmam que não existe tal distinção (SCHNEIDER, 2002).

Existe um elemento importante nesta discussão que deve ser ressaltado e que completa o quadro sobre o conhecimento inatingível, que é a noção de “reflexividade”. Seres humanos são capazes de refletir criticamente sobre as implicações de seu comportamento e fazer ajustes à luz da experiência. Em um contexto de mudanças climáticas, se os cientistas estabelecerem que a temperatura global aumentará entre 1,4°C e 5,8°C em 2100, com ou sem distribuição de probabilidades, a sociedade seguramente reagirá a essa informação. Ao refletir criticamente sobre ela a sociedade criará uma percepção do problema (Isso é bom? É ruim? Afetará minhas crianças? Afetará meus negócios?) e agirá conforme essa percepção, mesmo que seja não fazer nada. Esta reação em uma forma coletiva tem tradicionalmente assumido duas formas: mitigar o problema reduzindo as emissões de GEE e aumentando os sumidouros ou adaptar-se ao problema desenhando as estratégias para lidar com os impactos das mudanças climáticas (DESSAI; HULME, 2003).

Quando as pessoas mitigam ou se adaptam às mudanças climáticas, elas mudam o futuro, podendo tornar as afirmações originais dos cientistas incorretas caso eles tivessem atribuído probabilidades aos eventos ou valores. Por exemplo, as publicações das quatro histórias de desenvolvimento do mundo do Relatório Especial de Cenários de Emissões do IPCC (SRES, 2001), poderiam tornar um mundo do tipo B1 mais provável do que um mundo do tipo A2, no qual os impactos das mudanças climáticas poderia ser muito mais pronunciado⁷. Entretanto se a sociedade se percebesse seguindo um mundo do tipo B1 poderia, eventualmente, se tornar complacente em relação às políticas de proteção climática e acabar se movendo em direção a um mundo do tipo A2. Este exemplo grosseiro mostra o papel importante que a incerteza reflexiva desempenha nos sistemas sociais (DESSAI; HULME, 2003).

Assim, dentro da esfera do conhecimento inatingível é apropriado introduzir uma nova categoria que é a incerteza reflexiva, que junto com a incerteza estocástica fornece um quadro abrangente do conhecimento inatingível no contexto das mudanças climáticas. A incerteza reflexiva somente se aplica a sistemas humanos, pois sistemas naturais não são reflexivos à informação sobre o futuro (previsões).

O fato de que os seres humanos são parte do sistema sendo pesquisado no caso do problema das mudanças climáticas, tornam, portanto as incertezas irredutíveis no contexto da previsão e todas as probabilidades provisórias. No caso das mudanças climáticas (SAREWITZ; PIELKE, 1999) nota que o processo de previsão para a decisão é dificultado pelo fato de que as relações que informam probabilidades de especialistas são em si

⁷ Resumidamente, a história do Mundo B1 inclui um rápido crescimento econômico com redução de intensidade material e a introdução de tecnologias limpas e eficientes no uso de recursos naturais. A ênfase é sobre soluções globais aos problemas econômicos com aprimoramentos nas áreas ambiental, social e busca de maior equidade. A história do mundo A2 inclui um crescimento econômico regional e fragmentado orientado para crescimento econômico per capita e uma mudança tecnológica mais fragmentada e lenta que B. Não há preocupação ambiental (WATSON, 2001).

mesmas altamente não estacionárias e talvez influenciadas pelas próprias previsões. Entretanto, (SLAUGHTER; 1994) considera que tentativas de previsões com avaliações implícitas ou explícitas de especialistas são úteis no contexto dos sistemas sociais onde fenômenos qualitativos relativos à escolha humana são dominantes, pois nos ajudam a mapear as lacunas em nosso conhecimento sobre estes sistemas e a pensar em futuros prováveis.

A Tabela 1.1 tenta sumarizar os diferentes tipos de incertezas introduzidas neste capítulo. A “reflexividade” é o principal obstáculo para estimar probabilidades das mudanças climáticas. A modelagem de “reflexividade”, isto é, o comportamento humano iterativo, é fundamentalmente complexo e alguns concordariam ser impossível realizar tal modelagem. Embora possamos ver a reflexividade como um problema, não pensamos que

<i>Tipo de Conhecimento</i>	<i>Tipo de Incerteza</i>	<i>Possível de Representar com Probabilidades</i>
Incompleto	Epistêmica	Sim (Limitado pelo conhecimento da época.)
Incompleto - Inatingível	Estocástica Natural	Sim. (Com limites)
Inatingível	Humana Reflexiva	Não. (Há a necessidade de Cenários.)

Tabela 1.1: Características de diferentes tipos de incerteza no contexto das mudanças climáticas segundo (DESSAI; HULME, 2003).

ela deveria excluir a estimativa de probabilidades na área de mudanças climáticas. Podemos usar uma combinação de probabilidades para representar incertezas estocásticas naturais e epistêmicas, e métodos de cenários de questões do tipo “O que aconteceria se?” para representar a incerteza reflexiva humana. Estas probabilidades permanecerão altamente

condicionadas aos pressupostos adotados, porque é impossível saber o quanto de incerteza permanece não qualificada na representação. Uma representação híbrida como esta pode, entretanto, ser utilizada como uma ferramenta heurística para aprendizagem social, organizando a pesquisa, identificando interdependências e desenvolvendo melhor o entendimento geral das questões complexas além de ter um potencial de guiar a formulação de políticas baseadas em avaliações de cenários (ROTMANS; DOWLATABADI, 1998).

Neste trabalho representamos incertezas epistêmicas com distribuições de probabilidades, tais como as incertezas nos valores da sensibilidade climática e inércia térmica do Oceano e na vulnerabilidade de um ecossistema, mas também de incertezas reflexivas existentes no sistema econômico, quando falamos, por exemplo, da probabilidade do custo de abatimento de emissões de GEE ter este ou aquele valor. O custo de abatimento depende sensivelmente das expectativas dos agentes econômicos sobre o comportamento do mercado de carbono, e das ações anunciadas pelo governo para mitigar emissões. O conhecimento dos custos futuros apresenta incertezas sem dúvida reflexivas em face de políticas acordadas em negociações internacionais ou mesmo em face de possíveis desfechos de um acordo ainda a ser feito. Nosso intuito ao representarmos as incertezas dessa maneira é o de formarmos um esquema conceitual que nos ajude a compreender as possíveis interações entre os vários elementos do problema analisado aqui, organizando nosso conhecimento e revelando algumas das lacunas nele existentes. O modelo das incertezas em mudanças climáticas adotado a seguir, embora limitado, é útil para descobrir caminhos de pesquisa valiosos aos tomadores de decisões (Ver Capítulo 3 para mais detalhes).

1.8 O Modelo das Incertezas e Sua Evolução

A seguir desenvolvemos o modelo do ambiente informacional, que denominamos Ambiente de Incertezas. Ele é um modelo conceitualmente muito simples se constituindo de distribuições de probabilidades de parâmetros chave presentes em modelos de mudanças climáticas integrados (Figura 1.7). Baseados no estudo de (WEBSTER, 1997) usamos distribuições Beta que dependem de dois parâmetros forma. Esse tipo distribuição tem a vantagem de ser muito flexível, pois os dois parâmetros podem ser ajustados para se obter uma vasta gama de geometrias de distribuições. Assim, se pode usar a mesma ferramenta para organizar uma grande massa de informações. Embora as distribuições sejam provisórias, este autor deu um grande passo na direção de iniciarmos estudos mais objetivos das inúmeras incertezas paramétricas existentes na área.

Figura 1.7: O ambiente informacional, denominado Ambiente das Incertezas, é constituído por distribuições de probabilidades que variam no tempo,. Essas distribuições referem-se a alguns parâmetros chave sobre mudanças climáticas e mudam pela ação externa do usuário do modelo.

As entradas do modelo são os valores dos parâmetros das distribuições, que denominamos GAMA D e GAMA E. As saídas são as distribuições com aqueles parâmetros. As variáveis de controle do modelo são os parâmetros, que são alterados de fora do modelo pelo observador ou usuário. Dessa forma podemos simular seqüências de

distribuições representando cenários de evolução do conhecimento científico e econômico sobre mudanças climáticas globais.

1.8.1 Distribuições de Probabilidades

Representaremos a incerteza sobre o valor de um parâmetro incerto X , que pode assumir valores dentro de um intervalo $[X_e; X_d]$, tal que $X_e \leq X \leq X_d$, através de uma distribuição de probabilidades contínua denotada por $\text{DistPr}(X)$. A cada distribuição estarão associados o valor médio (ou esperado) de X , denotado por $\bar{X}$, e uma variância, denotada por $\sigma^2(X)$, (ou um desvio padrão, $\sqrt{\sigma^2}$) (Figura 1.8).

Figura 1.8: Algumas distribuições de probabilidades típicas usadas neste trabalho, para representar incertezas em alguns parâmetros chave. No exemplo o parâmetro X pode assumir valores no intervalo $[0,01; 0,51]$. Gráfico gerado no Proclin.

1.8.2 Modelo da Evolução do Conhecimento sobre as Mudanças Climáticas

Não existem teorias ou modelos sobre como o conhecimento científico pode evoluir, prevendo seu progresso em questões específicas. No dizer de Karl Popper, se pudéssemos prever a evolução de uma teoria científica, então já conheceríamos tudo o que ela procura explicar e a teoria não seria necessária (POPPER, 1980). Dessa forma na área de mudanças climáticas, como na ciência em geral, não existem estudos sistemáticos sobre como as incertezas em nosso conhecimento em uma área específica evoluirão. Ao invés disso, existem muitos programas de pesquisa para atacar inúmeras questões ainda não respondidas. Esses programas são planos para avançar nosso conhecimento em determinadas questões, e em muitos deles sabe-se que muitas incertezas diminuirão na medida em que se fizerem mais investimentos em pesquisa de determinadas áreas-problema. Nenhum deles, entretanto se propõe propriamente a prever o resultado final das pesquisas, em virtude da limitação intrínseca acima apontada.

Apesar da impossibilidade de prevermos a evolução do conhecimento científico em geral, e em particular em mudanças climáticas, podemos em alguns casos imaginar cenários de evolução desse conhecimento sem entrarmos em detalhes sobre como ele chegou a ser adquirido. Se um modelo de mudança de clima apresenta incertezas epistêmicas e paramétricas, contendo parâmetros cujas incertezas sobre os seus verdadeiros valores podem ser representados por distribuições de probabilidades subjetivas, então podemos imaginar várias evoluções destas incertezas através de transformações temporais da forma das distribuições. As probabilidades subjetivas baseiam-se em grandes conjuntos de informações de várias áreas e em opiniões de muitos especialistas e por isso estarão sujeitas a revisões contínuas. Novas evidências observacionais, conjugadas ao aprimoramento de

técnicas de modelagem levarão inevitavelmente a revisões de posição por parte desses especialistas e novas distribuições de probabilidades passarão a representar as incertezas sobre os valores dos parâmetros dos modelos.

Existem várias ferramentas que nos permitem modelar a revisão de crenças e por consequência a mudança de forma de distribuições de probabilidades, tais como a análise bayesiana generalizada para múltiplas evidências e múltiplas hipóteses e a dos Fatores de Certeza (KRAUSE; CLARK; 1993). A análise mais conhecida é a análise bayesiana que mediante a ocorrência de novas evidências altera a probabilidade de certas hipóteses. Tais ferramentas podem ser usadas para representar de maneira endógena a mudança da forma de distribuições de probabilidades no contexto do modelo do agente tomador de decisões desenvolvido nos Capítulos seguintes. Entretanto, seria necessária uma descrição de quais evidências e quais hipóteses deveriam ser usadas, o que exigiria um estudo mais aprofundado dos modelos e fenômenos envolvidos, nos levando para longe de nosso propósito. A estratégia adotada aqui será alterar de maneira exógena as formas das distribuições de probabilidades. Assim, essas distribuições passam a se constituir em ferramentas que nos permitem explorar, a partir de manipulações de sua geometria, os impactos das evoluções das incertezas sobre as decisões dos agentes governamentais acerca de abatimento de emissões de GEE (Figuras 1.9 e 1.10).

1.8.3 Tipos e Ritmos de Evolução das Incertezas

Para gerar cenários de evolução de uma incerteza adotaremos as seguintes definições. Por situação inicial de incerteza em um momento inicial k_0 , entenderemos o

valor médio ou esperado inicial do parâmetro, em foco, por exemplo, $\overline{X(k_0)}$, juntamente com a variância da distribuição associada, isto é, $\sigma^2(k_0)$. Em qualquer momento $k \geq k_0$ a situação de incerteza será definida pelo par $\overline{X(k)}$ e $\sigma^2(k)$.

A transformação da distribuição de probabilidades do parâmetro X , denotada por $\text{Trans}(X)$ levará a distribuição de probabilidades deste parâmetro desde o momento k até o momento $k+p$, $p > 1$, representando a transição da situação de incerteza $\overline{X(k)}$ e $\sigma^2(k)$ para a situação de incerteza $\overline{X(k+p)}$ e $\sigma^2(k+p)$. Se a taxa média de variação temporal da variância é dada por $\Delta[\sigma^2(k)]/\Delta t$ então a velocidade média será definida como:

$$g = \frac{(\Delta[\sigma^2(k)]/\Delta t)}{[\sigma^2(k)]} = \frac{\sigma^2(k+p) - \sigma^2(k)}{\sigma^2(k) \cdot \Delta t} \quad (\%/tempo) \quad (1.32)$$

Podemos classificar a evolução das incertezas em algumas categorias qualitativas básicas para nos guiar na construção de cenários de evolução do conhecimento. Consideraremos dois tipos básicos de evolução: evolução gradual e evolução abrupta. No primeiro tipo, a distribuição de probabilidades muda de forma gradual de ano a ano, a uma taxa constante e somente depois de muitos anos podemos notar uma alteração significativa dessa forma (Figura 1.9). Podemos imaginar varias transformações que poderiam se enquadrar neste esquema, por exemplo, a distribuição poderia mudar muito pouco de década a década, ou ao longo de um século. Assim podemos pensar em evoluções graduais

(A)

(B)

Figura 1.9: Dois exemplos de transformações graduais de distribuições de probabilidades. (A) Rápida: do centro (linha vermelha) transita para a esquerda em poucos anos, mas gradualmente. (B) Lenta: do centro (linha vermelha) se move para a direita, em muitas décadas e gradualmente.

rápidas ou lentas (Figura 1.9). No caso de uma evolução abrupta, podemos considerar também várias situações, por exemplo, inicialmente gradual, com um salto para a certeza total, ou inicialmente gradual e com saltos pequenos seguido de fases de estagnação ou avanço gradual, e assim por diante (Figura 1.10).

(A)

(B)

Figura 1.10: Dois exemplos de mudança abrupta na distribuição de probabilidades. (A) do centro, (linha vermelha) dá um salto em poucos anos para a esquerda e depois muda gradualmente. (B) do centro embaixo, (linha vermelha), dá um salto em poucos anos para o centro no alto e depois muda gradualmente.

Adotaremos, para fins práticos, somente duas velocidades de evolução de uma incerteza: rápida (R) e lenta (L). Definimos por velocidade rápida, uma mudança maior que 10% por década do valor da variância associada à distribuição de probabilidades. Isso significa que a essa taxa a incerteza estaria totalmente resolvida até o final do século. Por velocidade lenta, entendemos uma taxa de no máximo 5% por década do valor da variância de uma distribuição. Estas definições são totalmente arbitrárias e podem ser alteradas conforme a conveniência ou necessidade. Elas visam somente fixar um padrão nas simulações de cenários, que nos permita comparar resultados e obter indicações do que poderia ocorrer se uma incerteza ficasse totalmente ou parcialmente resolvida até o final do século. A partir dessas definições podemos pensar em velocidades muito rápidas ou muito lentas, adotando taxas de mudança da variância muito acima ou abaixo dos valores considerados acima, bem como em acelerações dessas velocidades.

Capítulo 2

Modelo de um Governo em Face da Decisão de Abater Emissões

2.1 Introdução

O problema geral da tomada de decisões de um governo em mudanças climáticas é amplo e complexo, pois envolve várias dimensões: física, econômica, social e cultural. Por isso não é uma tarefa fácil para os governos decidirem como responder a esse problema. Um modelo dessa situação que pretendesse representar tal complexidade também seria complexo. Nosso objetivo neste capítulo é construir um modelo simples de um governo diante da escolha do quanto abater de emissões em seu país, situação que ocorrerá muitas vezes no futuro.

Neste capítulo construímos uma estrutura de um agente tomador de decisões governamental que decide o quanto abater de emissões de GEE por um período limitado de tempo. Fazemos isso expandindo e adaptando algumas idéias desenvolvidas em trabalhos de outros autores, tais como (LEMPERT ET AL, 19977; DE VRIES; JANSSEM, 1998), além de seguir a estrutura básica de um decisor clássico presente na literatura econômica. Entretanto a abordagem seguida aqui está alinhada com a perspectiva de (SIMOM, 1966) de uma racionalidade limitada e por isso seguimos a estrutura básica de um agente decisor encontrado na literatura de Inteligência Artificial (RUSSELL; NORVIG, 1995).

A matriz conceitual que será desenvolvida a seguir, além de servir ao propósito deste trabalho no âmbito de um modelo das negociações sobre abatimento de emissões, pode ser utilizada para outros exercícios de modelagem em mudanças climáticas e na área de problemas ambientais globais e regionais em geral. Ela serve também para comunicar de

forma transparente a várias audiências de não especialistas o problema básico da decisão de reduzir emissões de GEE enfrentado pelos governos.

Finalmente, este modelo, apesar de representar de forma caricatural um tomador de decisões governamental, tem o potencial de ser aprimorado para representar estruturas decisórias mais complexas e realistas ajudando-nos a compreender melhor como as decisões são tomadas em políticas de mudanças climáticas e as possíveis trajetórias do aquecimento global geradas por estas decisões.

2.2 O Objetivo de um Governo Diante das Mudanças Climáticas

Modelaremos os governos como agentes decisores estilizados considerando-os como agentes tomadores de decisões unitários, isto é, sem estrutura institucional interna. No que se segue usaremos de maneira intercambiável os conceitos de um governo como um tomador de decisões, ou um formulador de políticas, ou como um analista ou planejador central, ou simplesmente como um decisor. Além disso, muitas vezes trataremos o agente decisor e o seu país, indistintamente, já que consideraremos que o governo de um país representa os interesses do mesmo.

Cada governo será considerado um planejador central interessado em garantir o Bem Estar dos cidadãos de seu país. Se representarmos por W^* o Bem Estar de seu país e por w^* o Bem Estar *per capita* consideraremos que o objetivo de um governo é maximizar o Bem Estar *per capita* w^* futuro. O Bem Estar W^* é o resultado do uso de recursos naturais e tecnológicos, e dos danos produzidos pelas mudanças climáticas globais. Isto é, se não houvesse mudanças climáticas, o Bem Estar Global seria $W > W^*$. Havendo essas mudanças, esse Bem Estar é reduzido de uma quantidade D , que são os danos climáticos

regionais advindos das mudanças climáticas globais, passando a ser $W^* = W - D$. Os danos D podem ser reduzidos por ações de abatimento global $\delta(A)$, para danos $D^*(A) = D \cdot (1 - \delta(A)) < D$. Mas esse abatimento implica para cada país em um custo, $C^*(A)$, levando a um Bem Estar final $W^*(A) = W - D^*(A) - C^*(A) = W - (D^*(A) + C^*(A)) = W - P^*(A)$, onde $P^*(A) = D^* \cdot (1 - \delta(A)) + C^*(A)$ é a perda social total devido às mudanças climáticas e as respostas de proteção. O objetivo do governo é então encontrar a melhor relação de custos e danos tais que o Bem Estar W^* seja maximizado. De forma equivalente, o governo procurará minimizar as perdas sociais $P^*(A)$. Entretanto a ação do governo para alcançar este objetivo está sujeita a restrições de vários tipos. A seguir desenvolveremos um modelo de um agente governamental que busca resolver este problema.

2.3 As Opções de Resposta de um Governo

As opções de resposta de um governo às mudanças climáticas podem ser classificadas quanto à abrangência e quanto à natureza. No primeiro caso as respostas podem se restringir a políticas e medidas dentro do próprio país ou âmbito doméstico. As repostas podem ainda fazer uso de mecanismos internacionais, tais como os mecanismos de flexibilização do Protocolo de Quioto: a compra e venda de créditos de reduções de emissões de carbono (CRE) no mercado de carbono internacional, ou a participação do país em projetos implementados conjuntamente com outros países, denominado Implementação Conjunta (IC), ou ainda, se o país for desenvolvido, no investimento em projetos realizados em países em desenvolvimento, como é o caso do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

(MDL). As respostas efetivas dos governos serão sempre uma conjugação de políticas e medidas domésticas e internacionais (Figura 2.1).

Figura 2.1: Opções de resposta de um governo às mudanças climáticas.

No que se refere à natureza das respostas, no âmbito das políticas domésticas existem basicamente três tipos de ação: mitigação das emissões de GEE, adaptação planejada às mudanças de clima, e medidas que não visam diretamente ao problema do aquecimento global, mas que podem implicar em reduções de emissões ou em maior capacidade adaptativa aos impactos climáticos (Figura 2.1).

A adaptação planejada tem o potencial de reduzir a vulnerabilidade de setores e regiões e realizar as eventuais oportunidades associadas com as mudanças de clima, independentemente da adaptação autônoma natural dos ecossistemas e, portanto, pode em princípio promover o desenvolvimento sustentável e a equidade entre países e setores da sociedade. A capacidade de se adaptar varia consideravelmente entre as regiões, países e grupos sócio-econômicos e também variará no tempo. As opções de adaptação ainda carecem de estudos detalhados, mas têm sido cada vez mais abordadas pelos analistas de

mudanças climáticas (HOUGHTON ET TAL, 1996, WATSON, 2001). Neste trabalho não consideraremos esta opção de resposta, nem as ações que possam levar indiretamente a reduções de emissões ou aumento da capacidade adaptativa. Não consideraremos também as ações em âmbito internacional. Nosso foco será sobre as ações domésticas de mitigação de emissões de GEE.

A mitigação é definida em (WATSON, 2001) como uma intervenção antropogênica para reduzir as fontes de gases estufa ou aumentar seus sumidouros. Por isso existem basicamente dois tipos de medidas de mitigação: as orientadas para as fontes e as orientadas para o aumento de sumidouros (Figura 2.2).

Figura 2.2: As opções de mitigação de emissões de GEE. Existem dois tipos de ação: medidas orientadas para a fonte e medidas orientadas para o aumento de sumidouros. Detalhes no texto.

Dentre as opções de mitigação voltadas para as fontes, como, por exemplo, na área de energia, estão a conservação de energia e a melhoria da eficiência de sua produção e consumo, a substituição de combustíveis fósseis por energia renovável, e o uso seguro da energia nuclear. Dentre as medidas voltadas para o aumento de sumidouros estão a captura

e estocagem geológica de CO₂, no interior de rochas, e o aumento de sumidouros florestais (Figura 2.2). Todas estas opções mitigadoras têm sido e estarão sendo analisadas continuamente por vários governos em todo o mundo, quanto a sua eficácia, seus custos e seus benefícios no que se refere ao problema das mudanças de clima global. Em particular, as medidas de reduções de emissões são as principais medidas que o mundo deve buscar para reduzir os riscos dos danos potenciais do aquecimento global.

O modelo de um governo tomando decisões em face das mudanças climáticas desenvolvido neste capítulo levará em conta unicamente as opções de mitigação voltadas para a fonte, isto é, as opções de abatimento de emissões de GEE. Neste sentido, os termos “decisão”, “tomada de decisão” e “escolha” usados no que se segue, se referirão unicamente às opções de reduções das emissões. Não nos preocuparemos, entretanto, com os tipos de medidas concretas que serão implementadas para alcançar este objetivo, podendo elas representar um conjunto de medidas que acarretem reduções de emissões na fonte.

2.4 Modelo das Opções de Abatimento de Emissões

Em algumas datas especiais o agente governamental tomará uma decisão sobre o quanto abaterá de suas emissões. A esses momentos denominaremos Momento de Decisão e denotaremos a sua data pela letra k . Por exemplo, podemos dizer que o governo toma ou tomará uma decisão no momento $k = 2030$, o que significará que essa decisão será tomada no ano 2030. Em geral os momentos de decisão de diferentes governos podem não ser coincidentes, e por isso um momento de decisão de um país P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, será

denotado por k_i . Quando não houver razão para confusão omitiremos o índice que especifica a que país pertence o momento de decisão.

Existem várias maneiras de expressar a quantidade de abatimento que um governo eventualmente escolha realizar. Ela pode ser expressa como uma quantidade total ao longo de um período, por exemplo, 40 Gt C em 10 anos, ou uma taxa de redução anual expressa em Gt C ou ainda em termos percentuais, levando em conta as emissões em uma data de referência, por exemplo, 4% das emissões de 1990. Neste trabalho, as medidas de redução de emissões serão expressas em termos da quantidade percentual de abatimento relativamente às emissões do país em uma data de referência. Consideraremos que em cada momento de decisão k_i cada agente P_i tem um conjunto discreto e finito de opções de abatimento, $\{A_{ij}(k)\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, e $j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$, com $m_i(k) \geq 2$, expressas como porcentagem anual de redução de suas emissões, com unidade (% / ano). Por exemplo, em um dado momento k um país pode ter três opções de abatimento, $\{0, 0.05, 0.1\}$ significando 0%/ano, 5%/ano e 10%/ano de suas emissões relativamente a uma data de referência e a serem realizadas em um período de tempo determinado. Essa data de referência pode ser móvel.

O número de opções pode variar ao longo do tempo e países diferentes terão em princípio conjuntos de opções de abatimento diferentes em cada momento de decisão k . Denotaremos por $A_{iMax}(k)$ e por $A_{iMin}(k)$ às quantidades máxima e mínima de redução de emissões no conjunto $\{A_{ij}(k)\}$. A diferença $(A_{iMax}(k) - A_{iMin}(k))$ denominaremos largura, $\ell_i(k)$, das opções de abatimento do governo P_i no momento de decisão k_i .

Graficamente, podemos representar as opções de abatimento de um governo em um momento k por uma árvore de decisões (Figura 2.3).

Figura 2.3: Ilustração de uma situação em que um país P_i tem em dois momentos de decisão, k_i e $k_i + p$, $p > 0$, dois conjuntos de opções de abatimento de emissões representados por duas árvores de decisão. Estão indicadas na figura os valores máximos e mínimos para cada conjunto de opções. No exemplo, o número de opções sofre uma redução de cinco opções em k , para três opções em $k+p$.

Uma medida de abatimento que for escolhida, dentre o conjunto de opções de abatimento em um momento k_i , será denotada por $A_i^*(k)$.

O valor mínimo $A_{iMin}(k)$ define o menor valor de abatimento de emissões que o governo P_i está disposto a realizar no momento de decisão k_i . O valor máximo $A_{iMax}(k)$ é maior valor de abatimento que esse governo está disposto a assumir no mesmo momento. Interpretaremos o valor mínimo como expressão do nível de precaução que o governo julga necessário adotar no momento k_i e o valor máximo como o resultado dos fatores limitantes impostos ao governo em k_i . Na Seção 2.6.2 descreveremos em detalhes essa interpretação.

Uma vez fixados os valores mínimo e máximo de abatimento de emissões para um governo, os valores intermediários podem ser definidos usando um valor incremental desde

o valor mínimo até o valor máximo. Esse valor incremental pode ser obtido simplesmente dividindo a largura $\ell_i(k)$ do conjunto de opções pelo número de opções que o agente deseja analisar. Por exemplo, se o agente quer avaliar uma árvore com cinco opções então, o incremento será $\ell_i(k)/5$. Partindo de $A_{iMin}(k)$, teríamos os valores intermediários $A_{iMin}(k) + \ell_i(k)/5$, $A_{iMin}(k) + 2 \cdot \ell_i(k)/5$, $A_{iMin}(k) + 3 \cdot \ell_i(k)/5$, $A_{iMin}(k) + 4 \cdot \ell_i(k)/5$, $A_{iMin}(k) + 5 \cdot \ell_i(k)/5 = A_{iMax}(k)$. Na Seção 2.6.2 descreveremos como as opções mínima e máxima de abatimento são definidas em cada momento de decisão.

2.5 Modelo de uma Metodologia de Tomada de Decisões de Abatimento

O agente governamental está diante do problema de tomar a melhor decisão de abatimento de emissões de GEE, dados os seus objetivos e as restrições da época em que deve decidir. Ele toma essa decisão apoiado nas informações que os cientistas e analistas lhe informam sobre o clima e a economia. Consideraremos que o agente e sua equipe governamental são assessorados continuamente por equipes de especialistas em mudanças climáticas regionais e globais. Baseados nestas informações e em seus critérios de escolha, o governo escolherá a sua melhor estratégia de abatimento dentro de um conjunto de opções. Este problema de decisão será recorrente na história futura dada a natureza de longo prazo das mudanças do clima e por isso fixaremos a atenção no ciclo de análise e tomada de decisão sobre a redução de emissões. A seguir cada agente unitário incluirá indistintamente a equipe de analistas que o assessoram e por isso muitas vezes diremos que o governo tem teorias e modelos sobre o clima e sua economia, o que deve ser entendido que ele é informado por aqueles analistas.

2.5.1 Modelos, Observações e Critérios de Escolha.

Um tomador de decisões governamental unitário, P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, dispõe de conceitos, teorias, modelos, métodos e critérios para tomar a sua decisão de abatimento. Para que ele possa calcular os custos para qualquer opção política de abatimento de emissões e os danos climáticos evitados subsequentes a esta ação, ele usa no momento de decisão k , um modelo, ${}_C M_i(k)$ que lhe permite calcular os custos, e um modelo de impactos econômicos que lhe permita calcular os danos climáticos, ${}_D M_i(k)$. Esses danos são a conjunção da resposta do sistema do clima e das características dos ecossistemas e por isso se faz necessário, para calculá-los, também um modelo climático, ${}_{\Delta T} M_i(k)$, que forneça ao agente os valores das grandezas correspondentes às mudanças climáticas. Em geral, um modelo climático fornecerá as elevações de temperatura global para cada nível de emissões, e pode também fornecer a mudança na precipitação e a elevação do nível médio do mar em virtude do aquecimento global. Consideraremos aqui somente as elevações de temperatura como os indicadores das mudanças climáticas. Além disso, para que o governo possa calcular o aumento de concentrações de GEE, ele deve usar um modelo de emissões, ${}_E M_i(k)$, que lhe forneça as trajetórias de emissões dentro do período considerado, para cada opção política possível. Esse modelo em geral depende de um modelo macroeconômico ou dos setores da economia que produzem emissões de carbono. Por simplicidade, consideraremos que o modelo de emissões e da economia formam um único modelo, ${}_E M_i(k)$.

Em geral o tomador de decisões pode ao longo do tempo fazer uso de diferentes modelos $MAI_i(k)$. O aprimoramento científico e tecnológico leva à utilização de versões

cada vez mais eficientes, precisas, robustas e confiáveis de modelos e métodos que apóiam a tomada de decisões em diversas áreas problema e o mesmo vale para a área de mudança de clima. Assim, o índice k nos símbolos dos modelos indica que eles são modelos utilizados pelo agente em um momento de decisão específico k e que, em princípio, podem mudar ao longo de uma seqüência de decisões de um país.

As análises científicas e econômicas das mudanças climáticas têm gerado uma grande quantidade de modelos que são em geral módulos separados e trabalhados por especialistas das diferentes áreas (Ver Capítulo 1). Existe uma classe de modelos que busca integrar em um único arcabouço todos os componentes envolvidos na estrutura de decisão que estamos considerando. Estes modelos são chamados Modelos de Análise Integrada (MAI). Para simplificar a análise, mas sem perder a generalidade, suporemos que cada decisor usa um modelo de análise integrada, $MAI_i(k)$, ao invés de modelos separados (Figura 2.4).

Cada agente P_i usa um $MAI_i(k)$ seguindo a cadeia causal das mudanças climáticas, desde as emissões até os impactos e calcula os seus custos e danos para cada opção de abatimento no momento k . A escolha de uma dessas opções é feita mediante um critério de decisão, $\Psi_i(k)$, que pode ir além da avaliação da relação entre os custos e benefícios, como pode ser visto em detalhes no Capítulo 5. O agente pode também utilizar diferentes critérios de escolha em diferentes momentos de decisão (Figura 2.4).

As simulações realizadas por um agente usando seu $MAI_i(k)$ produzem fluxos de informações entre os sub-modelos, e entre estes e o critério de decisão, e vice-versa, já que os modelos integrados seguem basicamente a estrutura causal do problema do clima. Por exemplo, a saída do sub-modelo do clima é em geral uma entrada para outro modelo, por

exemplo, o dos danos climáticos, e todos os modelos alimentam, direta ou indiretamente, o critério de escolha do agente. Este, por sua vez, tem como saída uma meta específica de abatimento (Figura 2.4).

Figura 2.4: Os modelos climático, $\Delta T M$, de emissões, $E M$, de custos, $C M$, de danos, $D M$ e o critério de escolha Ψ de um decisor individual para escolher metas de abatimento de emissões. As setas representam o fluxo de informações entre os modelos. Baseado em um exemplo de MAI em (LEMPERT ET TAL,1997)

Existem vários modelos de análise integrada em mudanças climáticas com finalidades diversas. Em virtude dos objetivos deste trabalho, restringiremos nossa atenção a modelos de mudança climática global, $\Delta T M$, que informem ao tomador de decisões: i) as trajetórias de elevações de concentração de GEE, do forçamento radiativo, de temperatura de equilíbrio e realizada, calculadas a partir de um nível de emissões dado, instantâneo ou gradual; ii) nos modelos, $D M$, com os quais que se podem representar a vulnerabilidade de seus países às elevações de temperatura global e calcular os danos econômicos, e iii) nos modelos, $C M$, que os governos usam para estimar os custos que seus países incorreriam caso abatessem uma certa quantidade de emissões de GEE; iv) e, finalmente, em modelos econômicos, $E M$, que lhes permitam calcular as emissões (Ver Capítulo 1 para uma descrição destes termos).

Um modelo incorpora, de forma estruturada, um conjunto de hipóteses sobre vários aspectos acerca da natureza e comportamento do sistema alvo. No caso das mudanças climáticas globais, muitas dessas hipóteses não podem ser testadas em escalas de tempo da ordem do tempo de vida dos cientistas que as formulam, nem de muitas instituições sociais que duram algumas gerações, já que muitos dos fenômenos representados ocorrem em escalas de tempo da ordem de décadas e séculos. Esses modelos são calibrados continuamente com observações tais como séries temporais da elevação da temperatura, dos danos climáticos e dos custos de abatimento. Denotaremos esse banco de dados observacionais por $BD_i(k)$. Ao conjunto $\{MAI_i(k), BD_i(k)\}$ denominaremos Base de Projeções do agente P_i , no momento de decisão k_i , sobre as mudanças climáticas globais e regionais e o denotaremos por $BP_i(k)$. A Base de Projeções de um tomador de decisões é então um conjunto de hipóteses estruturadas em um modelo integrado, que está calibrado com as observações de algumas das variáveis desse modelo. Baseado em toda a informação gerada e armazenada nessa base de projeções, até o momento k_i , o agente P_i analisará as opções que existem para a sua decisão de abatimento e, usando o critério $\Psi_i(k)$, ele escolherá a melhor opção, $A_i^*(k)$, nesse momento, dentre um conjunto de opções. Ao conjunto total $\{BP_i(k), \Psi_i(k)\}$ denominaremos Metodologia do Governo P_i , simbolicamente, $\Phi_i(k)$, para analisar e escolher políticas de abatimento de emissões de GEE no momento k (Figura 2.5).

Figura 2.5: Diagrama representando uma metodologia $\Phi_i(k)$ de um governo P_i para analisar e escolher metas de redução e emissões de GE

2.5.2 Ciclo de Decisões Seqüenciais sobre Abatimento de Emissões

Até aqui desenvolvemos um modelo da metodologia que um agente usa para tomar decisões de abatimento em um momento de decisão genérico k . Entretanto esses momentos ocorrerão repetidamente ao longo do tempo, e por isso o ciclo análise-decisão será recorrente. Esse ciclo de decisão pode ser descrito da seguinte maneira. Suponhamos que no momento k existam $m_i(k)$, $m_i(k) \geq 2$, opções de políticas de abatimento a serem analisadas por um país P_i . Primeiramente, a partir de observações dos valores de algumas variáveis do meio ambiente de base, o agente atualiza as informações contidas em seu banco de dados $BD_i(k)$ sobre essas variáveis e parâmetros. Com sua Base de Projeções $BP_i(k)$ atualizada até o momento k , e fixada uma opção de abatimento $A_i(k, j)$, $j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$, ele usa o modelo $MAI_i(k)$ para projetar um grupo de trajetórias futuras formado pelas trajetórias de emissões globais, da concentração atmosférica, do forçamento radiativo, da elevação de temperatura, dos impactos regionais em seu país, dos danos evitados pela ação de abatimento $A_i(k, j)$, e dos custos de abatimento dessa ação. A cada grupo dessas

trajetórias denominaremos um Cenário Futuro, $\Theta_i(k)$, da mudanças climáticas projetado pelo agente P_i e denominaremos cada uma destas trajetórias de cenários de emissões, de elevação de concentração, de forçamento radiativo, etc. Esse processo gera uma família de $m_i(k)$ grupos de Cenários Futuros, uma para cada opção de abatimento $A_i(k, j)$. Através do critério de decisão adotado, $\Psi_i(k)$, ele compara as variáveis relevantes, por exemplo os danos evitados e os custos de abatimento de cada um dos $m_i(k)$ cenários, e escolhe uma ação de abatimento $A_i^*(k)$, que satisfaz a esse critério $\Psi_i(k)$. (Para fixar idéias estamos supondo aqui que a ação escolhida é única). Essa ação de abatimento será realizada em um período subsequente à decisão. Assim, nos próximos momentos de decisão $k+1$, $k+2$, etc, esse processo se repete (Figura 2.6)¹.

Figura 2.6: O agente usa no momento de decisão genérico k sua metodologia $\Phi_i(k)$. Esse processo se repete várias vezes ao longo do tempo.

A tomada de decisão de cada agente é assim sequencial, constituída por ciclos de análise e decisão onde em cada etapa o agente constrói um conjunto de antecipações ou cenários futuros das mudanças climáticas globais e de seus impactos em seu país para cada

¹ Quando estivermos interessados somente na sequência de momentos de decisão, podemos referi-los como momentos, k , $k+1$, $k+2$, etc, sem considerar explicitamente os intervalos de tempo entre momentos sucessivos.

ação de abatimento disponível. As observações feitas em cada etapa, além de renovar o banco de dados, se acumulam e permitem ao agente construir uma série temporal para cada variável relevante.

É importante ressaltar que cada um dos $m_i(k)$ grupos de canários incluem hipóteses sobre possíveis medidas de abatimento que os outros países, além de P_i , poderiam adotar e as conseqüentes trajetórias de emissões de cada um deles no período considerado. Tais trajetórias devem ser calculadas para que se possa obter uma trajetória das emissões globais como uma entrada no modelo climático $\Delta T M$. Este aspecto do problema de decisão será considerado em detalhes no Capítulo 6 quando abordarmos as negociações sobre abatimento de emissões. Na Figura 2.7 mostramos uma situação onde um agente no ano 2060 projeta várias trajetórias de elevação de temperatura, tendo ao mesmo tempo registrado uma série temporal de aquecimento global até aquela data.

Figura 2.7: Um exemplo das informações analisadas pelo agente em um momento de decisão. O gráfico mostra uma trajetória de elevações de temperatura observadas até o ano 2050 (linha vermelha) e algumas trajetórias futuras possíveis projetadas nesse ano. A linha azul é a trajetória caso não houvesse reduções de emissões a partir desse ano. As outras linhas abaixo desta são trajetórias para algumas alternativas de redução de emissões a partir desta data.

Assumiremos que os modelos usados pelos agentes para realizarem suas análises e tomar suas decisões são de tempo discreto. Isto implica em considerarmos duas escalas de tempo, a dos modelos que os agentes usam e a do meio ambiente de base no qual estão imersos. Consideraremos que o ciclo completo de análise e decisão ocorre em um único momento de decisão k , no qual cada agente realiza um número finito de operações para calcular os cenários para um período finito adiante de seu momento de decisão k para todo o conjunto de opções de abatimento disponíveis naquele momento. Esse aspecto reflete o fato de que os analistas do problema das mudanças climáticas fazem simulações que têm durações muito menores que as escalas de tempo dos sistemas alvos modelados. Como ilustração, consideremos a situação típica mais extrema em simulação de mudanças climáticas, que é a simulação com um Modelo de Circulação Geral Oceano-Atmosfera (MCGOA), que envolve centenas de milhares de parâmetros, realizada em um supercomputador, podendo demorar várias horas, dias ou até algumas semanas. Um MAI típico demora muito menos tempo, pois é menos complexo que um MCGOA.

O modelo de um agente realizando um ciclo análise-decisão em um único momento está de acordo, também, com uma das características gerais definidoras de um agente com capacidade antecipatória presente na Teoria dos Agentes Antecipatórios e Adaptativos de (RIVERO, 1999). Isto é, um agente com essa capacidade, é um agente que tem um modelo de um sistema sobre o qual pode atuar, e que simula o comportamento desse sistema em um tempo bem menor que o tempo característico dos processos que ocorrem no próprio sistema. Para que o agente possa realizar as projeções para o futuro com seu modelo $MAI_i(k)$ ele deve fixar horizontes de tempo. Esse aspecto será abordado a seguir.

2.6 Projeções Futuras e Antecipações

A tomada de decisão em face das mudanças climáticas é essencialmente um processo seqüencial sob vários tipos de incertezas e ignorância. A questão relevante não é “qual é o melhor curso de ação ao longo dos próximos cem anos?“, mas ao invés disso “qual é o melhor curso de ação para o curto prazo dada a mudança climática esperada de longo prazo e as incertezas que a acompanham?” (WATSON, 2001).

Um curso de ação de abatimento no curto prazo acarreta custos que devem ser estimados para cada opção disponível na época da decisão. Os impactos esperados no longo prazo dependem da capacidade antecipatória da ciência do clima da época. Essa capacidade aumenta na medida em que as incertezas diminuam. Para que o tomador de decisões possa calcular efetivamente os seus custos de abatimento e os danos climáticos potenciais, e fazer, por exemplo, uma análise de custos e benefícios, se faz necessário que use dois horizontes de tempo básicos. Um deles é usado no cálculo dos desembolsos anuais, que seriam feitos por um país para uma opção política de abatimento durante um certo período de tempo. Denotaremos o horizonte para a avaliação dos custos de abatimento de um país P_i , por $hp_i(k)$. Em nosso modelo de uma metodologia de análise e decisão de abatimento de emissões, assumiremos que o cálculo dos custos de abatimento será feito para o período que se inicia em k e termina em $k+hp_i(k)$. Por exemplo, se um governo no ano 2010 considerar a possibilidade de um programa de abatimento de suas emissões durante os 20 anos seguintes, teremos $k = 2010$, $hp(2010) = 20$ anos, e o período de abatimento iria desde 2010 até 2030. Chamaremos a esse horizonte de tempo o Horizonte de Planejamento $hp_i(k)$ do país P_i no momento de decisão k . O $hp_i(k)$ de um governo refere-se somente às

ações de abatimento do país P_i e à avaliação dos custos domésticos desse país para abater emissões no período entre k e $k+hp_i(k)$. Por exemplo, no caso do Protocolo de Quioto, os países do Anexo B desse Protocolo devem ter considerado, para firmar esse acordo, os seus custos de abatimento durante o período $k=2008$ e $hp(k) = 5$ anos. Se eventualmente algum país iniciou efetivamente seu programa de reduções de emissões a partir da sua ratificação ao Protocolo, por exemplo, no ano 2000, então seus cálculos seriam feitos desde $k=2000$ até $k+hp(k) = 2012$, isto é, $hp(k) = 12$ anos.

Para os cálculos dos danos climáticos um agente deve usar um horizonte de tempo distinto de $hp_i(k)$. Em virtude dos longos tempos de residência dos gases de efeito estufa na atmosfera e da inércia térmica do Oceano, as emissões produzidas em um certo ano levarão a um aquecimento que ocorrerá continuamente e poderá se manter por várias décadas, ou até mesmo por séculos. Denotaremos este horizonte por $HP_i(k)$ e o chamaremos Horizonte de Antecipação das mudanças climáticas ou dos danos climáticos do agente P_i . Em geral teremos que $hp_i(k) \leq HP_i(k)$. Com este horizonte um agente sonda o futuro distante para avaliar os impactos potenciais das ações decididas no presente e sonda a possibilidade de impactos climáticos perigosos muito tempo antes de ocorrerem (Ver Capítulo 5 para o conceito de impactos perigosos). Ele avaliará os danos climáticos em seu país desde o momento k até $k+HP_i(k)$. No exemplo acima, se ele considerar um horizonte $HP_i(k) = 100$ anos, então seus cálculos estimariam a distribuição de danos anuais desde o ano 2010 até o ano 2110. O horizonte de antecipação não se relaciona somente ao que ocorre domesticamente em um país, mas também às mudanças climáticas em todo o globo. A antecipação de impactos regionais também depende de antecipações sobre o

comportamento do clima global e pressupõe antecipações de longo prazo das emissões globais (Figura 2.8).

Figura 2.8: Exemplos dos dois horizontes de tempo básicos de um governo ideal. Dois exemplos de $hp(k)$, igual a 10 e 50 anos à frente do momento de decisão. O horizonte de antecipação é $Hp(k) = 100$ anos à frente do momento de decisão, e poderia ser qualquer outro desde que $HP(k) \geq hp(k)$.

Um aspecto importante a ressaltar sobre os horizontes de tempo é que eles não dependem dos modelos $MAI_i(k)$. Os horizontes de tempo são parâmetros dentro desses modelos que podem, em princípio, ser escolhidos arbitrariamente antes de se fazer simulações. Pode-se, por exemplo, fazer análises de sensibilidade dos modelos fazendo-se várias simulações, mudando-se os valores dos horizontes de tempo envolvidos. No presente trabalho exploraremos o efeito de possíveis valores desses horizontes introduzindo algumas relações funcionais entre eles e as incertezas dos valores de alguns parâmetros que descrevem aspectos do problema da mudança de clima (Ver Seção 2.8.1).

2.7 Incertezas Paramétricas sobre Mudança de Clima

As diversas áreas do conhecimento humano envolvidas nas análises do problema geral das mudanças climáticas apresentam inúmeras incertezas sobre vários aspectos dos

sistemas estudados, que impedem que se façam previsões seguras sobre a evolução do clima e dos impactos advindos das mudanças climáticas. Algumas destas incertezas podem ser reduzidas pela obtenção de mais informações sobre o comportamento daqueles sistemas. Elas podem ser representadas como distribuições de probabilidades subjetivas, também chamadas bayesianas, que expressam o grau de crença de especialistas de uma determinada área da ciência sobre os valores que certas variáveis podem assumir. Essas incertezas são denominadas epistêmicas (Ver Capítulo 1).

Em qualquer empreendimento de modelagem existem dois tipos distintos de incertezas: a incerteza paramétrica e a incerteza estrutural. A incerteza paramétrica consiste em não se saber o valor exato que um certo parâmetro do modelo pode assumir. Em geral ela é uma incerteza epistêmica. A incerteza estrutural diz respeito à incerteza na forma ou estrutura de um modelo e é mais difícil de tratar de uma maneira rigorosa e consistente. Modelos com estruturas alternativas podem levar a um largo espectro de resultados. Entretanto mesmo quando nos restringimos a um único modelo, a incerteza em alguns dos valores de parâmetros pode levar a um largo conjunto de resultados prováveis (HOUGHTON ET TAL, 1996, WATSON, 2001).

No presente trabalho consideraremos unicamente incertezas paramétricas. E as representaremos por distribuições de probabilidades subjetivas. Como estamos tratando os especialistas e os decisores indistintamente, diremos algumas vezes que o próprio governo tem incertezas, atribui probabilidades ou tem graus de crença.

2.7.1 Distribuições de Probabilidades e a Metodologia de um Governo

Como vimos, um modelo de análise integrada $MAI_i(k)$ é um elemento de uma Metodologia $\Phi_i(k)$ de um governo P_i . Cada modelo $MAI_i(k)$ contém um conjunto $\{\lambda_{ij}(k)\}$ de $n_i(k)$ parâmetros incertos, $j = 1, 2, 3, \dots, n_i(k)$, onde $n_i(k) \geq 0$, além de parâmetros sobre os quais não existem incertezas. Desde o primeiro relatório do IPCC, (HOUGHTON ET TAL 1992), os valores possíveis de vários parâmetros relevantes na modelagem e análise das mudanças climáticas vêm sendo informados como intervalos de valores prováveis. Por isso, assumiremos que em cada momento de decisão k , o agente decisor tem a informação dos especialistas de que cada parâmetro incerto λ_{ij} em seu modelo pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo $\lambda_{ej}(k) \leq \lambda_{ij}(k) \leq \lambda_{dj}(k)$ com uma certa probabilidade $Pr(\lambda_{ij})$. Por exemplo, recentemente especialistas estudando a sensibilidade climática em vários modelos climáticos, chegaram à conclusão de que este parâmetro pode ter um valor entre $0,5^\circ\text{C}$ e $6,7^\circ\text{C}$, e construíram uma distribuição de probabilidade lognormal, com valor mais provável em torno do ponto $2,8^\circ\text{C}$ (IPCC, workshop, 2004).

Os extremos do intervalo de uma variável incerta em mudanças climáticas podem em princípio variar ao longo do tempo, mas por simplicidade de análise, sem comprometer os objetivos da discussão, assumiremos que estes extremos nunca mudam. Dessa forma podemos representar os parâmetros incertos como variáveis aleatórias cuja probabilidade de assumir um certo valor dentro de seu intervalo de confiança é fornecido por uma distribuição de probabilidades $DPr(\lambda_j)$ definida para aquele intervalo (Figura 2.9).

Figura 2.9: Dois exemplos de distribuições de probabilidades hipotéticas $DPr(\lambda_1)$ e $DPr(\lambda_2)$ para dois parâmetros incertos, $\lambda_1 =$ Sensibilidade Climática e $\lambda_2 =$ Inércia Térmica do Oceano em um modelo $MAI_i(k)$ de mudanças climáticas (Gráfico gerado no PROCLIN)

Os intervalos de valores prováveis de um parâmetro incerto são contínuos o que significa que existem infinitos valores prováveis do parâmetro. Para que o agente possa rodar seu modelo se faz necessário que use um subconjunto discreto de cada intervalo de parâmetro incerto, o que pode implicar em uma quantidade muito grande de cálculos. No modelo apresentado aqui não precisamos assumir uma análise exaustiva com muitos valores de cada parâmetro em um intervalo. Podemos por simplicidade trabalhar com somente com alguns valores representativos, tais como o valor máximo e mínimo e os valores médios e as respectivas variâncias de cada parâmetro, calculados a partir das distribuições de probabilidades. Esses valores esperados e as variâncias de cada parâmetro incerto, podem ser obtidos por meio das expressões matemáticas onde eles comparecem nos sub-modelos do $MAI_i(k)$ e depois de calculados, as simulações podem ser realizadas, com estes valores esperados, tendo em conta a variância associada a cada um.

Assumiremos assim que uma Metodologia $\Phi_i(k)$ com incertezas consistirá em: 1) Atualizar no momento k as Distribuições de Probabilidades dos parâmetros incertos do

modelo; 2) calcular os valores esperados, no sentido estatístico, e as variâncias de cada parâmetro incerto do modelo $MAI_i(k)$ gerando um conjunto $\left\{ \left(\overline{\lambda_{ij}(k)}, \sigma^2(\lambda_{ij}, k) \right) \right\}$ desses valores esperados e variâncias; e 3) em seguida, para cada opção política $A_i(k, j)$, rodar o modelo uma única vez no momento k , fazendo as projeções de cada variável relevante por meio dos valores esperados daqueles parâmetros; 4) e finalmente, através da comparação dos resultados das simulações, escolher através do critério $\Psi_i(k)$ a melhor ação de abatimento nesse momento k sob as incertezas daqueles parâmetros (Figura 2.10).

Figura 2.10: Diagrama representando uma metodologia $\Phi_i(k)$ de um governo P_i com parâmetros incertos em seu modelo. O agente atualiza as distribuições de probabilidades e o banco de dados antes de iniciar as simulações.

2.8 Comportamento Adaptativo dos Governos

O problema da mudança climática global exige a consideração de estratégias adaptativas de tomada de decisões e a metodologia $\Phi_i(k)$ usada por um governo para escolher uma resposta de abatimento deve incorporar a flexibilidade exigida pela natureza desse problema. (LEMPERT ET TAL, 1997) demonstraram a importância de se considerar nos modelos de políticas de mudança de clima estratégias adaptativas, que permitem aos agentes mudarem de curso de ação se certas condições forem preenchidas, em particular

quando limiares climáticos ou econômicos forem alcançados. Estes autores construíram um modelo integrado com um único tomador de decisões global, que inicialmente escolhe e aplica metas de reduções de emissões pequenas sob a condição de que os danos climáticos não ultrapassem um certo valor, que representaria o valor máximo suportável de danos para esse governo. Quando o sistema alcança esse limiar, o governo muda de curso de ação, intensificando sua meta de redução de emissões. O objetivo destes autores foi demonstrar a superioridade de modelos exploratórios com agentes dotados da capacidade de mudar o curso de ação, caso as circunstâncias assim o exijam, sobre os modelos de otimização tais como o DICE de (NORDHAUS, 1992). A argumentação básica é que dadas as grandes incertezas envolvidas na análise das mudanças climáticas, os modelos que calculam políticas ótimas para longos horizontes de tempo não podem ser considerados como realistas e por isso não se constituem em bons suportes à tomada de decisões. Os modelos com estratégias adaptativas permitem explorar um espectro maior de possibilidades de evolução do sistema climático e das possíveis políticas de mitigação das emissões de GEE. Os valores das metas de reduções de emissões, bem como os valores dos limiares de danos utilizados por esses autores não têm realidade empírica, mas foram utilizados para explorar a robustez de estratégias que permitem mudança de curso dentro de um largo espectro de futuros plausíveis.

Uma limitação importante do modelo de (LEMPERT ET TAL, 1997) é que o tomador de decisões somente muda seu curso de ação uma vez alcançado o limiar. Uma estratégia capaz de antecipar o limiar, levando o agente a mudar o curso de ação para evitar o limiar, superaria aquela limitação em uma análise exploratória de políticas de abatimento. (ROBALINO ET TAL, 1998) aplicaram essa idéia aprimorando o modelo de (LEMPERT ET TAL, 1997), introduzindo um filtro de Kalman, que é um estimador bayesiano linear,

para antecipar um limiar de dano previamente definido, a partir de observações de danos com ruídos que representam a mistura de efeitos de origem antropogênica e de variabilidade natural do clima. No presente trabalho incorporamos a mudança de curso antecipada quando as análises dos agentes revelem a aproximação de algum limiar previamente fixado.

Para incorporar este comportamento, construímos duas regras de caráter puramente exploratório. Como (LEMPERT ET TAL, 1997) não estamos supondo que de fato os decisores reais adotam ou venham a adotar estas regras, mas queremos investigar o que ocorreria em suas decisões, e em especial, nas negociações sobre cotas de reduções de emissões, se eles adotassem tais regras. Elas são regras que relacionam as incertezas no momento de decisão k , com os horizontes de antecipação e planejamento, e as reduções mínimas e máximas que um governo estaria disposto a adotar neste momento de decisão k , acarretando também a definição da largura $\ell_i(k) = (A_{i \text{ Max}}(k) - A_{i \text{ Min}}(k))$ das opções políticas de abatimento de cada governo no momento k . A seguir discutiremos como podemos construir estas regras adaptativas .

2.8.1 Regras de Mudanças dos Horizontes de Tempo

A capacidade de antecipar danos depende do horizonte de antecipação e das incertezas associadas aos modelos que fazem a exploração da evolução das mudanças de clima e seus impactos. Quanto maiores as incertezas, menos confiáveis serão os valores próximos à extremidade futura daquele horizonte. E quanto menores forem aquelas incertezas, maior será a confiança que o tomador de decisões terá sobre os valores na

extremidade futura. Para representarmos essa confiabilidade definiremos um horizonte efetivo de antecipação, como sendo um horizonte de antecipação cujo grau de confiança nos valores da extremidade futura são iguais à confiança nos valores na extremidade presente do horizonte (Ver Apêndice G para uma justificativa dessa idéia).

O mesmo tipo de consideração vale para o horizonte de planejamento, que é usado para a projeção dos custos de abatimento. Se representarmos as incertezas de alguns parâmetros $\lambda_i(k)$ de um modelo $MAI_i(k)$ por distribuições de probabilidades, então as covariâncias $\sigma_i^2(k)$ são uma medida do grau de incerteza e podemos escrever:

$$hp_i(k) = hp_i(\{\sigma_i^2(k)\}) \quad (\text{Anos}) \quad (2.1)$$

$$HP_i(k) = HP_i(\{\sigma_i^2(k)\}) \quad (\text{Anos}) \quad (2.2)$$

isto é, os horizontes de planejamento e antecipação são funções de um conjunto de variâncias pertinentes aos modelos usados pelo agente para calcular os custos e os danos, respectivamente. Essas funções devem ser tais que se as incertezas diminuïrem ao longo do tempo, representando avanço no conhecimento dos parâmetros relevantes, então os horizontes de planejamento e antecipação deverão aumentar. Com a diminuição das incertezas, os agentes terão seus horizontes de antecipação e planejamento aumentados permitindo-lhes sondar mais profundamente o futuro e planejar políticas de abatimento para períodos de maior alcance. Uma regra simples para cada tipo de horizonte ilustrará os conceitos acima e será explorada em simulações usando um protótipo que está descrito no Capítulo 7.

No caso do horizonte de antecipação suponhamos que o seu alcance dependa do nível de incerteza sobre o valor verdadeiro da difusividade térmica do Oceano, ou de forma equivalente, da inércia térmica do Oceano. Esta inércia é da ordem de décadas a séculos e por isso está relacionada de forma natural ao horizonte de antecipação de danos. A regra é a seguinte:

$$HP(k) = HP(1) + 10 \cdot \left[\left[10 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{DO}^2(k)}{\sigma_{DO}^2(1)} \right) \right] \right] \quad (\text{Anos}) \quad (2.3)$$

Essa expressão fornece a cada momento de decisão k , um horizonte de antecipação efetivo $HP(k)$ para o governo realizar suas projeções, como um incremento do horizonte de antecipação usado por ele no momento inicial da seqüência de decisões, onde $k=1$. O incremento é calculado através da função “maior inteiro menor ou igual x ” aplicada ao valor dentro do colchete duplo. Por exemplo, se a razão entre a variância no momento k e a variância no momento inicial, $k=1$, é 0,75, então o valor no interior do colchetes duplo será 2,5, e o “maior inteiro menor ou igual a 2,5” será 2. O incremento ao horizonte inicial será então de 20 anos. Se o momento de decisão é $k=1$ essa razão vale um, e o termo no interior do colchete duplo se anula. O horizonte é o próprio horizonte inicial. Enquanto o conhecimento sobre a inércia térmica do Oceano não mudar, teremos um mesmo horizonte de antecipação. Se houver, por exemplo, uma variação de 40 % na variância, isto é, a razão entre as variância final e inicial for 0,4, então o termo no interior dos colchetes será 6 e o incremento ao horizonte inicial será 60 anos. A fórmula acima fornece incrementos que são múltiplos de 10 anos (Tabela 2.1). Poderíamos ter definido um incremento menor, tal como um ano, ou cinco anos, mas preferimos mudanças múltiplas de 10 anos, porque

consideraremos no Capítulo 6 seqüências de negociações que ocorrerão de 10 em 10 anos e esse valor de incremento será natural naquele contexto. De qualquer maneira pode-se mudar o valor do incremento unitário se se desejar fazer uma análise de sensibilidade sobre o comportamento final dos governos. Esses incrementos representam diminuição de variância (incertezas), e para situações de aumento de incertezas podemos estender a regra acima para fazer o horizonte diminuir.

	VARIACÕES										
σ^2 / σ_0^2	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0.0
ΔHP	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

TABELA 2.1: Incrementos no Horizonte de Antecipação HP(k) para cada variação percentual da variância da difusividade oceânica, conforme a Equação 2.3. Notemos que quando há certeza completa, isto é, quando a variância é zero, o incremento no HP é de 100 anos, acarretando um HP final de 110 anos.

A relação expressa na Equação 2.3, não tem fundamento empírico, e é considerada no modelo para explorarmos o papel do horizonte de antecipação de interesse ao político, considerando-o depender do grau de incerteza sobre a inércia térmica do Oceano. Se essa incerteza diminuir rapidamente esse horizonte aumentará rapidamente, senão o fará lentamente no mesmo ritmo que o próprio avanço do conhecimento sobre o parâmetro em questão. Nesses sentido ela não é uma regra totalmente artificial, e pode ser aprimorada através de uma pesquisa mais profunda sobre os horizontes que os governos reais utilizam para antecipar as mudanças climáticas bem como a relação das incertezas com esses horizontes.

Uma outra regra análoga à Equação 2.3, que ilustra a regra geral expressa na Equação 2.1, refere-se à mudança do horizonte de planejamento, hp(k) de um governo.

Como foi definido anteriormente, esse horizonte é usado para a projeção dos custos de abatimento. Em geral, pelas razões já expostas, $hp(k) \leq HP(k)$.

A incerteza sobre os custos de abatimento é a principal razão que regula o tempo de um programa de abatimento de reduções de emissões. Se existe muita incerteza sobre estes custos, os governos, por aversão ao risco de gastarem desnecessariamente em abatimento, não estão dispostos a elaborar programas de redução de emissões que durem muitas décadas. Assim, se essas incertezas diminuïrem, espera-se que os agentes estejam mais dispostos a programas de abatimento mais longos. Se denominarmos o custo marginal médio de abatimento por BETA, então a regra é a seguinte:

$$hp(k) = hp(1) + 10 \cdot \left[10 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{BETA}}^2(k)}{\sigma_{\text{BETA}}^2(1)} \right) \right] \quad (\text{Anos}) \quad (2.4)$$

Pelas mesmas razões anteriores ao caso do horizonte de antecipação, os incrementos do horizonte de planejamento são múltiplos de 10.

Para explorarmos os papéis que estes horizontes de tempo podem vir a ter nas decisões dos agentes, e em especial nas negociações sobre cotas de reduções de emissões, podemos considerar várias situações, tais como ambos horizontes se iniciando com o mesmo valor, e se diferenciando ao longo do tempo, ou iniciando com diferentes valores e convergindo ao longo do tempo, etc. Todas as situações, no entanto, devem ser derivadas das mudanças das variâncias, isto é, das evoluções das incertezas sobre a inércia térmica e dos custos de abatimento. Isso significa que para cada cenário de evolução de incertezas desses parâmetros podemos obter mudanças dos horizontes de antecipação e planejamento.

No Capítulo 7 descreveremos alguns desses cenários e os resultados das simulações em maior detalhe que têm interesses na análise das negociações.

2.8.2 Regras para Mudar as Opções Políticas

Seja $\{A_{ij}(k)\}$ um conjunto de opções de abatimento do país P_i no momento k_i . O valor mínimo $A_{iMin}(k)$ desse conjunto expressa o nível de precaução do governo diante das mudanças climáticas. Esse valor está associado à aversão ao risco de cada agente diante da probabilidade de danos climáticos severos e por isso depende de algum limiar de danos insuportáveis para cada governo. Um governo muito tolerante ao risco de danos severos não se empenhará muito em reduzir suas emissões significativamente, escolhendo um valor mínimo baixo ou até nulo como opção de abatimento. Se a aversão ao risco de um governo é alta, e seu modelo $MAI_i(k)$ indica a probabilidade de danos intensos em seu país ele buscará um valor mínimo elevado para se precaver contra os danos potenciais. Os governos reais nessa situação também pressionariam os outros governos a reduzirem intensamente suas emissões, como tem sido o caso, por exemplo, dos Pequenos Estados Ilhas, cujos territórios poderão desaparecer devido à elevação do nível do mar. Desde o início das negociações da Convenção estes atores propuseram metas ambiciosas de reduções de emissões. Se as incertezas são representadas por distribuições de probabilidades, então podemos expressar a dependência da opção mínima com relação a essas incertezas e ao limiar de danos por:

$$A_{iMin}(k) = A_{iMin}(k-1) + F_i\left(\sigma_i^2(k); D_i^*(k)\right) \quad (\%/ano) \quad (2.5)$$

onde $F_i(.)$ denota uma função incremento. A expressão afirma que o valor mínimo de abatimento em um momento de decisão k_i será o valor mínimo adotado no momento de decisão anterior $(k_i - 1)$ acrescido de uma certa quantidade $F_i(.)$ que depende do grau de incertezas dos parâmetros pertinentes, expresso pelas variâncias em torno dos valores esperados daquelas distribuições de probabilidades e de um limiar de danos climáticos D_i^* antecipado no momento de decisão k_i . Se dentro do horizonte $HP(k)$ a análise do agente não indica a aproximação de um dano limiar, então ele não precisa intensificar suas reduções de emissões, podendo manter o valor mínimo do momento anterior. Por outro lado, se dentro do horizonte $HP(k)$ a análise do agente antecipa algum dano limiar D_i^* , então ele deverá tomar alguma providência para evitar esse dano. Isso é feito elevando-se o valor mínimo do momento anterior de um incremento que deve ser tão maior quanto mais próximo estiver aquele limiar. O valor mínimo garante assim o mínimo de precaução diante do que o modelo $MAI_i(k)$ aponta como perigoso (Para mais detalhes sobre este tópico ver Capítulo 5, Seção 5.5).

As outras opções de abatimento estarão limitadas por outras preocupações, expressas na escolha do valor máximo de abatimento. O valor máximo $A_{iMax}(k)$ do conjunto de opções depende do custo máximo C_{iMax} que o agente estaria disposto incorrer dados os seus objetivos e as condições de incerteza sobre os danos e custos na data em que ele toma a decisão. Os custos de abatimento por outro lado, dependerão do horizonte de planejamento e das incertezas sobre setes custos. Quanto maior for o horizonte de planejamento maior será o custo total de abatimento calculado em todo o período $k + hp(k)$.

Expressando as incertezas como distribuições de probabilidades subjetivas, podemos escrever que:

$$A_{iMax}(k) = A_{iMax}(k-1) + G_i\left(\sigma_i^2(k); C_{iMax}(k)\right) \quad (\%/ano) \quad (2.6)$$

Onde $G(.)$ é uma função incremento para o valor máximo de abatimento de emissões em k_i . Esse incremento depende do grau de incertezas e do limiar de custos para essa data.

Em cada momento de decisão k_i as opções de reduções de emissões estarão definidas pelos horizontes de tempo usados para fazer as projeções de custos de abatimento e danos climáticos, pois os limiares eventualmente antecipados estarão dentro de tais horizontes. Além disso, aquelas opções também estarão definidas pelas incertezas envolvidas nas avaliações. Se as incertezas diminuïrem ao longo do tempo, o que se espera acontecer, a capacidade antecipatória dos agentes deve aumentar podendo revelar a aproximação de danos severos com um tempo de antecipação maior. Por outro lado, a diminuição das incertezas nos custos de abatimento poderá levar os agentes a considerar metas mais intensas de reduções de emissões. Um cenário como este elevaria as meta mínima e máxima de abatimento alargando o conjunto de opções (Figura 2.11).

Finalmente, é importante notar que uma vez definido um conjunto de opções para um governo, não há ainda uma definição da escolha final da ação de abatimento. Essa escolha dependerá das opções de escolha dos outros agentes, pois, como indicamos anteriormente, cada governo deve elaborar cenários de emissões globais levando em conta cenários de emissões para cada um dos outros países. Esse tópico será abordado no

Capítulo 6 quando então veremos as implicações das variações do conjunto de opções de abatimento dos países no resultado das negociações.

Figura 2.11: Ilustração de um processo de variação das opções mínima e máxima de abatimento de emissões de um país. Devido à variação das incertezas, bem como dos horizontes de planejamento e antecipação, o agente elevou gradualmente as suas opções mínima e máxima de forma a aumentar a largura do conjunto de opções.

No Capítulo 3 mostraremos uma regra específica para gerar as opções máximas de abatimento, baseada na Função Custo de Abatimento, e no Capítulo 5 mostraremos uma regra específica para gerar as opções de abatimento mínimas a partir de uma interpretação do Artigo 2 da Convenção do Clima sobre danos perigosos.

2.9 Conclusão: Síntese da Estrutura do Agente Tomador de Decisões

Neste capítulo desenvolvemos a estrutura de um agente unitário tomador de decisões de políticas de abatimento de emissões de GEE. Ele representa um governo que toma suas decisões baseado em um conjunto de informações geradas por especialistas em mudanças climáticas globais e um grupo de assessores sobre assuntos relativos ao seu país.

A estrutura desenvolvida é genérica e pode ser replicada para representar a comunidade internacional de governos e será usada no Capítulo 6 para modelar as

negociações internacionais sobre mudança de clima. Cada um desses agentes está equipado com (Ver Figura I.7 da Introdução):

1. Um objetivo de desenvolvimento
2. Um conjunto de opções de abatimento que é atualizada no tempo através de regras de atualização.
3. Uma Metodologia que contém:
 - a) Base de Dados observacionais atualizável.
 - b) Um conjunto de Distribuições de Probabilidades atualizáveis.
 - c) Um modelo de Análise Integrada contendo:
 - i) Um modelo climático.
 - ii) Um modelo Econômico e de Emissões.
 - iii) Um modelo de custos de abatimento.
 - iv) Um modelo de danos climáticos.
- 4) Um critério de escolha.
- 5) Horizontes de Planejamento e Antecipação ajustáveis através de Regras para aumentar a capacidade antecipatória e de planejamento, baseadas na evolução do conhecimento científico e econômico.
- 6) Um Conjunto de Regras para gerar um conjunto de opções de abatimento aceitáveis a partir da definição de limiares, de danos e custos, e das incertezas sobre mudança de clima.

Alguns elementos da estrutura dos agentes ainda estão por serem definidos explicitamente. Mais exatamente, a metodologia $\Phi_i(k)$ de um país P_i contém um critério de decisão $\Psi_i(k)$. Este critério permite ao agente escolher, dentre um conjunto de opções, uma ação de abatimento que seja a melhor dadas as suas restrições na data de decisão k_i . O critério básico de decisão é a análise custo-benefício, mas existem outras ferramentas de decisão que vão além desse critério e teremos mais a dizer sobre elas no Capítulo 5. Além disso, os modelos constituintes da metodologia $\Phi_i(k)$ devem conter relações numéricas

entre as variáveis envolvidas e valores de parâmetros para que o agente possa obter informações quantitativas específicas. No Capítulo 3 descreveremos um modelo MAI(k) específico que usaremos nas simulações descritas no Capítulo 7.

Finalmente, deixamos implícito o fato de que cada agente ao projetar seus cenários de emissões deve formular hipóteses acerca das ações de abatimento do outros países. Isso se deve ao fato de que o aquecimento global depende das emissões globais e não das emissões individuais. No Capítulo 6 voltaremos a esse ponto e formularemos explicitamente a interdependência entre os países para dar respostas efetivas às mudanças climáticas.

Capítulo 3

Um Modelo Integrado para Uso dos Governos

3.1 Introdução

No Capítulo 2 desenvolvemos um modelo de um agente governamental estilizado que usa modelos do clima e da sua economia para analisar opções de abatimento. Esses modelos foram descritos em termos de suas características gerais, e em princípio podem ter graus variados de complexidade para diferentes agentes e em diferentes momentos do tempo. Podemos dividir os modelos dos agentes em duas largas classes: a) agentes que são equipados com mecanismos para escolher a cada momento k um modelo $MAI_i(k)$ dentre um conjunto de modelos integrados, e b) agentes que não são dotados desta capacidade e sempre usam o mesmo modelo. A representação de mecanismos de escolha entre diferentes modelos e métodos em diferentes momentos exigiria uma representação dos fatores, externos e internos aos agentes, que determinam as escolhas de um modelo por parte de um analista, que vai muito além dos propósitos e possibilidades do presente trabalho. Assim, nos restringiremos às situações mais simples em que os agentes não mudam seus modelos para fazer seus cálculos e tomar as suas decisões ao longo da sequência de decisões, isto é, assumiremos que a estrutura de um $MAI_i(k)$ permanece inalterada, para qualquer k e qualquer governo P_i . Isso não significa, entretanto, que os valores dos parâmetros internos a esses modelos não possam mudar ao longo do tempo. Estaremos interessados precisamente naquelas situações em que esses valores mudam e

estudaremos o papel que estas mudanças podem ter nas decisões finais de abatimento de emissões.

O IPCC é um corpo de cientistas que desempenha um papel muito importante no inventário, organização e comunicação do conhecimento sobre as mudanças climáticas globais. Uma de suas virtudes é seu caráter unificador através de análises padronizadas e do uso de modelos para gerar cenários de referência com os quais podem ser comparados os resultados de muitos outros modelos sobre mudanças climáticas. Embora vários programas de pesquisas desenvolvidos em diferentes países não usem os mesmos modelos, todos têm no IPCC uma referência, e a publicação regular, de cinco em cinco anos, de seus relatórios é um marco que fixa o estado da arte dos estudos das mudanças climáticas. Inspirados neste fato, suporemos que os N governos compartilham o mesmo conhecimento científico embutido no modelo $\Delta_T M$ sobre o clima global e as mudanças climáticas globais gerado pelo corpo de especialistas, que aqui representa um painel internacional de cientistas como o IPCC. Esse modelo climático comum implica que todos os agentes terão o mesmo horizonte de antecipação, $HP(k)$.

Os modelos $_E M_i(k)$ da economia e emissões de GEE, $_C M_i(k)$ dos custos de abatimento e $_D M_i(k)$ dos danos climáticos, serão considerados terem a mesma estrutura diferenciando-se somente nos valores dos parâmetros e condições iniciais, para refletir as diferenças regionais nos valores dos Produtos Internos Brutos e taxas de crescimento econômico, nos custos marginais de abatimento e na vulnerabilidade às mudanças climáticas. Os critérios de escolha $\Psi_i(k)$ serão considerados no Capítulo 4. Algumas destas simplificações poderão em trabalhos futuros ser abandonadas e desenvolvidos modelos mais complexos dos agentes, que nos permitam explorar o papel que a heterogeneidade de

modelos, além das incertezas nos parâmetros internos em cada um deles, podem exercer na coordenação política final dos países para tratar as mudanças climáticas .

A seguir desenvolveremos um exemplo de um modelo $MAI_i(k)$ clima-economia integrado simples que os agentes usarão com as características acima descritas. Ele é uma versão modificada do DICE de (NORDHAUS, 1992). Este modelo será utilizado por todos os agentes negociadores no modelo das negociações sobre mudança de clima do Capítulo 6.

O modelo contém quatro sub-modelos: i) um modelo do sistema do clima; ii) um modelo simplificado da economia nacional e das emissões de GEE; iii) um modelo da vulnerabilidade às mudanças de clima; e iv) um modelo dos custos de abatimento. Cada sub-modelo contém alguns parâmetros incertos aos quais associaremos distribuições de probabilidades que podem mudar com o tempo. A partir dessas distribuições podem ser calculados os valores esperados de cada variável pertinente (Figura 3.1).

Figura 3.1: Estrutura do Modelo Economia-Clima integrado $MAI_i(k)$ de cada governo P_i usado neste trabalho para implementar a tomada de decisões seqüenciais de abatimento de emissões. As setas indicam o fluxo de informações entre os sub-modelos. Ver explicações nas Seções correspondentes a cada sub-modelo.

Apesar do modelo abaixo ser desenvolvido no contexto do objetivo do presente trabalho, ele pode ser usado para outras finalidades. Sendo um modelo simples pode ser usado sem dificuldade por qualquer pessoa ou instituição envolvida com o problema das mudanças climáticas, como uma ferramenta de análise de custos e benefícios para um conjunto de opções quantitativas de abatimento de emissões. Pode ser usado também no ensino do problema básico de decisão em mudanças climáticas, para estudantes em nível de graduação e pós-graduação, como uma ferramenta exploratória para ajudar na tomada de decisão. Além disso, a transparência do modelo nos permite ver claramente as suas limitações e nos ajuda obter uma visão crítica sobre várias análises que usam modelos semelhantes para atacar as mudanças climáticas.

A seqüência da exposição seguirá a Figura 3.1 no sentido horário, partindo do Modelo econômico, isto é: na Seção 3.2 expomos o Modelo da Economia $E M_i(k)$ de cada país e das emissões resultantes da atividade econômica ; na Seção 3.3 descrevemos o modelo climático $\Delta_T M$; na Seção 3.4 descrevemos o Modelo dos Danos Climáticos, $D M_i(k)$; na Seção 3.5 mostramos o Modelo dos Custos de Abatimento, $C M_i(k)$; na Seção 3.6 definimos as Perdas Sociais; na Seção 3.7 discutimos como analisar as opções de abatimento no presente o modelo; e finalmente, na Seção 3.8 concluímos o capítulo com uma síntese do modelo apresentado, apontando algumas limitações e sua extensão ao caso das negociações sobre redução de emissões.

3.2 Modelo da Economia Nacional

Consideraremos cada governo como um planejador central que busca continuamente maximizar o Bem Estar de cada individuo de seu país. O desenvolvimento do país será considerado aqui como o processo de aumento de Bem Estar *per capita*. Existem inúmeras definições de Bem Estar e de desenvolvimento econômico, mas aqui o expressaremos como o nível de renda *per capita*, que pode ser medido pelo Produto Interno Bruto dividido pela população de cada país. (CHOUWDHURY; KIRKPATRICK, 1994; NORDHAUS; BOYER, 1998) O governo busca então o aumento do Bem Estar através do crescimento do PIB do país. A seguir detalharemos este objetivo e sua relação com as mudanças climáticas.

3.2.1 Demografia, Crescimento Econômico e o Objetivo da Política Econômica

Seja $L_i(t)$ a população do país P_i no ano t , e seu Produto Interno Bruto, $PIB_i(t)$ no mesmo ano. Então seu produto *per capita*, $\varepsilon_i(t)$ no ano t é dado pela razão:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{PIB_i(t)}{L_i(t)} \quad (\text{US\$ / Habitante}) \quad (3.1)$$

Tomando o logaritmo natural de ambos os membros desta expressão e derivando ambos os membros com relação ao tempo, teremos a seguinte relação entre as taxas anuais de variação destas grandezas:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\varepsilon_i} = \frac{\dot{\text{PIB}}_i}{\text{PIB}_i} - \frac{\dot{L}_i}{L_i} \quad (\% / \text{Ano}) \quad (3.2)$$

Nessa expressão, os pontos sobre os símbolos nos numeradores significam derivadas temporais. Essa equação nos permite descrever os elementos básicos do objetivo de desenvolvimento de um país. Por exemplo, se o planejador central, após análises sobre as necessidades de seu país, fixa como alvo de longo prazo, elevar a renda *per capita* de forma constante e igual a 4 % ao ano, (valor que corresponde ao primeiro membro na equação acima), e ele espera que a população cresça a uma taxa constante de 3% ao ano, (segundo termo no segundo membro da equação), então ele deve tomar decisões de política econômica que elevem o PIB a uma taxa de 7% ao ano, (primeiro termo do segundo membro da equação) (CHOUWDHURY; KIRKPATRICK, 1994).

No modelo presente assumiremos que cada governo P_i fixa, em cada momento de decisão k , um alvo de desenvolvimento para seu país, em termos de uma taxa de crescimento econômico *per capita*, (primeiro membro da Eq. 3.2), que denotaremos por $\delta\varepsilon_i(k)$, desde o momento de decisão k até o momento $k+HP(k)$, o que implica que ele deve atingir uma taxa de crescimento do PIB, que denotaremos por $\delta y_i(k)$, para o mesmo período, (correspondente ao primeiro termo do segundo membro daquela equação).

A meta de crescimento fixada pelo governo depende de inúmeros fatores que não consideraremos aqui, mas um elemento importante na fixação do objetivo de crescimento envolve hipóteses sobre o crescimento populacional e isso pressupõe a adoção de um modelo demográfico. Além disso, depois de fixado o alvo, para que um plano de desenvolvimento possa ser detalhado, o agente deve ter um modelo de sua economia para

lhe guiar sobre quais variáveis deverá agir e como o fará, a fim alcançar a sua meta. Existem vários modelos macroeconômicos que os agentes podem usar como ferramenta para ajudá-los a analisar e escolher políticas econômicas, entretanto não adotaremos nenhum deles, pois não será necessário, para nossos propósitos, explicitarmos as variáveis macroeconômicas de controle (Para detalhes ver Capítulo 1) (PETIT, 1990). Será suficiente assumir que a parte econômica do modelo ${}_E M_i(k)$ baseia-se em duas hipóteses sobre a economia em face das mudanças climáticas, que o agente formula a cada momento de decisão k : uma hipótese sobre o crescimento populacional e uma hipótese sobre a eficácia de sua política econômica. As hipóteses são as seguintes:

Hipótese H1: A população cresce a uma taxa exógena constante igual a $\delta L_i(k)$ (% / Ano), (correspondente ao segundo termo na Equação 3.2), e essa taxa independe do aquecimento global. Isto significa que o aquecimento global não tem o potencial de produzir um número significativo de mortes, nem de diminuir significativamente a taxa de natalidade de uma população. Dependendo da intensidade das mudanças climáticas esta hipótese pode ser falsa, pois existem inúmeros estudos que comprovam que o aumento da temperatura acelera o crescimento e propagação de vetores de doenças contagiosas aumentando a incidência destas doenças e a taxa de morbidez com a possibilidade de virem a ocorrer epidemias em certas regiões. Existem, além disso, casos de ondas de calor que vêm produzindo milhares de mortes na Europa. Além disso, vários impactos devido a eventos climáticos extremos, como furacões e tempestades, podem sem dúvida produzir muitas mortes. Mesmo com esta limitação, adotaremos esta hipótese para focalizar a análise unicamente sobre a taxa de crescimento do PIB e sua relação com as emissões de GEE e as perdas na produção devidas às mudanças do clima. Muitos modelos clima-economia, como

o DICE e o RICE também adotam implicitamente esta hipótese, pois as taxas exógenas de crescimento populacional não mudam devido ao aquecimento global. Nestes modelos, o que muda com a elevação da temperatura é a produção final, expressa na função Cobb-Douglas (Ver Capítulo 1), (NORDHAUS, BOYER, 1999).

Hipótese H2: Se não houvesse o aquecimento global, a taxa de crescimento pré-fixada, $\delta y_i(k)$, seria alcançada com sucesso. Isto significa supor que nunca ocorre nenhuma resistência por parte dos agentes econômicos, nem há qualquer tipo de surpresa aleatória que acarrete uma menor eficácia da política econômica. A única fonte possível de impedimento para que a taxa de crescimento seja alcançada são as mudanças climáticas. Esta hipótese também está presente implicitamente nos modelos econômico climáticos tais como os da família DICE/ RICE e também não pode ser considerada rigorosamente verdadeira. Ao contrário, uma das principais preocupações dos governos é sobre a eficácia de suas políticas de abatimento, através, por exemplo, de taxações sobre emissões, e mesmo de incentivos econômicos para mudança de tecnologias. Por isso, tem-se procurado aplicar instrumentos econômicos, que usam os mecanismos de mercado, para o controle de emissões, tais como os créditos de carbono, visando a aumentar as chances de sucesso nas políticas de abatimento. Pela mesma razão alegada para adotarmos a hipótese H1 adotaremos a presente hipótese, embora problemática.

Adotadas estas hipóteses, o problema das mudanças climáticas pode agora ser formulado em termos do impacto que a elevação da temperatura global produzirá na taxa de crescimento econômico $\delta y_i(k)$. Esse impacto inclui os custos para evitar os danos climáticos somados aos danos climáticos resultantes, com ou sem mitigação. À soma destes dois fatores denominaremos de Perda Social Total ou agregada (Figura 3.2).

Cada governo analisará, dentre um conjunto de opções de abatimento global, que inclui as suas próprias opções domésticas, (Ver Capítulo 2), aquela que minimize a Perda Social de seu país, ou de forma equivalente, maximize o Bem Estar de seus cidadãos. A seguir descreveremos os modelos do governo sobre as emissões, os danos climáticos e os custos de abatimento (Figura 3.2). No Capítulo 5, por meio do modelo abaixo, desenvolveremos uma interpretação simples do conceito de “interferência antropogênica perigosa” como expressa no Artigo 2 da Convenção Quadro de Mudança de Clima das Nações Unidas. A seguir desenvolvemos a parte das emissões do modelo ${}_E M_i(k)$.

Figura 3.2: (A): Ciclo de Operação do Modelo Econômico ${}_E M_i(k)$. Em cada momento k , o agente formula uma hipótese sobre a taxa de crescimento exógena da população, e fixa uma meta exógena da renda *per capita*, o que o leva a buscar uma taxa de crescimento do PIB. A partir de análises dos cenários das perdas sociais, o agente projeta cenários de crescimento econômico e avalia qual é a melhor política de abatimento. (B) Seqüência de Projeções do PIB usando o Ciclo de Operações da figura (A).

3.2.2 Projeções do PIB

Em cada momento de decisão k , cada governo projeta para o futuro, desde k até $k + HP_i(k)$ o seu crescimento econômico baseado na hipótese H2 que afirma que sua economia crescerá, se não houver abatimento de emissões por nenhum dos países, nem danos climáticos, à taxa de $\delta y_i(k)$ (% / Ano) durante todo o período de antecipação $HP_i(k)$. Nesses termos, o PIB projetado desde o ano $t = k$, até o ano $t = k + HP_i(k)$, denotado por $PIB_i(k, t)$, será calculado iterativamente pela simples equação diferença:

$$PIB_i(k, t + 1) = (1 + \delta y_i(k)).PIB_i(k, t) \quad (\text{US\$/ano}) \quad (3.3)$$

onde $k \leq t \leq k + HP_i(k)$, (Figuras 3.2 e 3.3). Em cada momento de decisão k , o governo atualiza o valor do PIB na data k , $PIB_i(k, k)$, por seu valor observado, que é o valor inicial de cada iteração da Equação 3.3.

As trajetórias projetadas que não consideram políticas de mitigação de emissões, $A_{ij}(k) = 0$, são chamadas Linhas de Base ou cenários “Business as Usual” (BAU). Através da aplicação iterativa da Equação 3.3 obtemos uma trajetória BAU do PIB.

Nas projeções do PIB existe um aspecto importante muito pouco explicitado nos modelos integrados clima-economia. A má compreensão deste aspecto pode gerar confusão na modelagem e análise dessas trajetórias. Existem duas maneiras de projetar trajetórias BAU do PIB, que não consideram políticas de abatimento e por isso, em ambas, os custos de abatimento não são incluídos. Uma delas é projetar uma evolução do PIB sem mudanças climáticas, isto é, sem danos produzidos pelo aquecimento global. Essa foi a maneira

indicada acima para projetar o PIB usando a Equação 3.3. A outra forma de projetar o PIB e as emissões para o caso BAU, é considerar os danos climáticos advindos do aquecimento global. Essa forma é mais realista, pois segue a cadeia causal das mudanças climáticas (Figura 3.3).

Figura 3.3: Exemplos dos dois tipos Projeção BAU do PIB, isto é, sem políticas de mitigação de emissões. (A) trajetórias de crescimento do PIB sem danos climáticos, e (B) com os danos climáticos computados, que produzem perdas econômicas diminuindo a taxa de crescimento. Nos exemplos: (A) $k = 2000$ e $HP(2000) = 100$ anos; (B) $k=2030$, $HP(2030) = 100$ anos. Ver também Seção 3.4.2 (PROCLIN, 2006).

Adotaremos as duas formas de projetar trajetórias BAU, o que permitirá a cada agente calcular as contribuições dos danos climáticos e dos custos de abatimento separadamente (Figura 3.3). Na Seção 3.4.3 explicitaremos a segunda maneira de calcular uma trajetória BAU do PIB. A seguir escrevemos as equações básicas utilizadas para fazer as projeções das emissões de GEE.

3.2.3 O Modelo das Emissões de GEE

Cada agente P_i calcula as emissões $E_i(t)$ de gases de efeito estufa de seu país por meio de uma identidade simples:

$$E_i(t) = \sigma_i(t) \cdot \text{PIB}_i(t) \quad (\text{Gt C / Ano}) \quad (3.4)$$

onde $\sigma_i(t)$ é um parâmetro, com unidades (Gt C / ano. US\$), denominado Intensidade Média de Carbono, que expressa o quanto de carbono é emitido em média, para produzir uma unidade de produto da economia. Esse parâmetro mede, indiretamente, o quanto a tecnologia de um país depende de combustíveis fósseis para gerar energia e o quanto as atividades de uso da terra ainda recorrem a práticas de desmatamento e queimada para explorar o solo, além de outras atividades emissoras de GEE. Para $t = k$ teremos $\sigma_i(t) = \sigma_i(k)$ e a cada momento de decisão k , o governo atualiza esse valor da intensidade de carbono, considerando o seu valor observado naquela data, e projeta a evolução dessa intensidade até $k + \text{HP}(k)$ para cada opção de abatimento usando seu modelo de emissões.

É um fato observado que algumas economias, independentemente do problema das mudanças climáticas, apresentam um desenvolvimento técnico que aumenta a eficiência das tecnologias e dos processos de produção, tornando-os mais limpos em termos da emissão de carbono na atmosfera. Dessa forma, se o problema das mudanças climáticas não existisse, a intensidade de carbono diminuiria de qualquer maneira nessas economias a uma taxa, que podemos chamar de Taxa Natural de mudança da intensidade de carbono, que será denotada por $\delta\sigma_i$, tal que $\delta\sigma_i < 0$. Entretanto, as políticas de abatimento são

necessárias para diminuir a intensidade de carbono além dessa taxa natural. Se não houver políticas de abatimento a intensidade de carbono em qualquer momento do tempo será dada por:

$$\sigma_i(t+1) = (1 + \delta\sigma_i) \cdot \sigma_i(t) \quad (\text{Gt C / ano. US\$}) \quad (3.5)$$

onde $\sigma_i(t)$ é a intensidade de carbono na data anterior a $t+1$. Existem economias, por outro lado, onde a taxa $\delta\sigma_i$ é positiva, produzindo um aumento da intensidade de carbono na economia. Países em desenvolvimento, com taxas de crescimento do PIB altas e que usam muito carvão mineral para gerar energia, como é o caso da China no início deste século, podem apresentar taxa naturais positivas, isto é, aumento da intensidade de carbono. Havendo políticas de abatimento, a intensidade de carbono a cada data t será dada por:

$$\sigma_i(t+1) = (1 + \delta\sigma_i) \cdot (1 - \mu_{ij}(k)) \cdot \sigma_i(t) \quad (\text{t C / ano. US\$}) \quad (3.6)$$

onde $\mu_{ij}(k)$, $0 \leq \mu_{ij}(k) \leq 1$, é a taxa percentual de redução de carbono da economia escolhida pelo governo no momento k para ser aplicada nos próximos $hp(k)$ anos. Esta taxa pertence a um conjunto de opções $\{\mu_{ij}\}$ a serem analisadas pelo governo, que nada mais são do que as opções de abatimento $\{A_{ij}(k)\}$ do Capítulo 2. Ela pode ser medida de várias maneiras como explicada naquele capítulo. A Figura 3.4 ilustra a aplicação da Equação 3.6 para projetar a evolução da intensidade de carbono para algumas opções de abatimento global, que incluem taxas domésticas, de longo prazo com um horizonte de planejamento $hp(k) = 100$ anos, que um governo fez no ano 2070.

Figura 3.4: Projeções da Intensidade de carbono feitas por um governo no ano $k = 2070$, com o horizonte $hp(2070) = 100$ anos. A curva em azul escuro superior indica a evolução natural da intensidade de carbono, isto é, sem abatimento de emissões. As curvas coloridas descrevem evoluções quando se aplicam algumas metas de abatimento. Quanto mais intensa a política de abatimento mais rapidamente será o decaimento da intensidade de carbono. (PROCLIN, 2006).

3.2.4 Projeções das Emissões

A ação de abatimento de emissões realizada por um governo, é representada na Equação 3.6 como uma mudança do valor da intensidade de carbono de uma economia. A projeção da evolução da intensidade de carbono, denotada por $\sigma_i(k, t)$, é realizada pela aplicação iterativa da Equação 3.6 desde $t = k$ até $k+hp(k)$, isto é:

$$\sigma_i(k, t+1) = (1 + \delta\sigma_i) \cdot (1 - \mu_i(k)) \cdot \sigma_i(k, t) \quad (\text{t C / ano. US\$}) \quad (3.7)$$

Para projetar as emissões no período que vai de k até $k+HP(k)$, denotada por $E_i(k, t)$, o agente usa iterativamente a expressão resultante da substituição das Equações (3) e (6) em (4), isto é:

$$E_i(k, t + 1) = \sigma_i(k, t + 1) \cdot \text{PIB}(k, t + 1) \quad (\text{Gt C / ano}) \quad (3.8)$$

o que resulta em:

$$E_i(k, t + 1) = (1 - \mu_i(k)) \cdot [(1 + \delta\sigma_i) \cdot \sigma_i(k) \cdot (1 + \delta y_i(k)) \cdot \text{PIB}(k, t)] \quad (\text{Gt C / ano}) \quad (3.9)$$

para todo t , tal que $k \leq t \leq k + HP(k)$. Se $\mu_i(k) = 0$ a Equação 3.6 se reduz à Equação 3.5, e teremos a trajetória BAU das emissões. Notemos que são usados aqui dois horizontes de tempo: um é o horizonte de planejamento $hp(k)$, que é usado para projetar a ação de abatimento durante o período que vai desde k até $k+hp(k)$. O outro horizonte é o de antecipação, $HP(k)$, que vai até $k+HP(k)$. Em geral $HP(k) > hp(k)$, (Ver Capítulo 2), e por isso a aplicação iterativa da Equação 3.8 é tal que, para t , tal que $hp(k) < t \leq HP(k)$, devemos ter $\mu_i(k) = 0$. O abatimento é considerado somente até a data $k+hp(k)$, mas o efeito desse abatimento sobre as emissões e suas conseqüências são projetados até a data $k+HP(k)$. Eventualmente, o agente pode avaliar uma política de longo prazo, fazendo, por exemplo, $hp(k) = HP(k)$ como na Figura 3.4.

A distinção entre trajetórias BAU e trajetórias que incluem a ação de redução de emissões, $\mu_i(k) \neq 0$, também vale para as projeções de emissões GEE (SRES, 2001). E existem também duas maneiras de projetar essas trajetórias em correspondência aos casos citados para o PIB. (Figura 3.5).

Figura 3.5 Duas Projeções BAU das Emissões, isto é, sem considerar políticas de abatimento, $\mu_i(k) = 0$. (A) sem considerar danos climáticos. Aqui $k=2000$ e $HP(2000) = 100$ anos. (B) computando os danos climáticos. Com $k = 2030$ e $HP(2030) = 100$ anos. Ambas projeções correspondem, respectivamente, às projeções BAU do PIB da Figura 3.

A rigor o agente a cada momento k também formula uma hipótese sobre o comportamento de $\delta\sigma_i$, mas suporemos aqui que esse valor é constante, podendo assumir diferentes valores para cada país. Na prática, para algumas economias que dispõem de séries históricas desse parâmetro, esse valor é estimado por simples extrapolação do seu comportamento observado no Século XX. A média mundial ao longo do Século XX foi 0,3% ao ano (GOLDENBERG, 2001). Suporemos que não existem incertezas sobre os valores das taxas naturais de mudança das intensidades de carbono, $\delta\sigma_i$. Apesar desse parâmetro também ser incerto, por envolver hipóteses sobre o processo de inovação e assimilação tecnológicas espontâneas, essa simplificação em nada prejudica o centro de nossa preocupação, que é entender como o agente tomará a sua decisão, dadas algumas incertezas relevantes.

3.3 Modelo do Clima Global

O modelo ΔT_M de clima global está na Base de Projeções de qualquer agente, permitindo a cada um obter as informações sobre mudanças climáticas regionais em seu país a partir das globais. Em geral isto é feito através de técnicas de redução de escala, onde se constrói um outro modelo em escala menor do que aquela do modelo global original, representando com mais detalhes a região sob estudo. Calibra-se esse modelo com o modelo global, o qual também pode fornecer as condições de contorno para o modelo menor nas fronteiras da região modelada. Não incorporaremos aqui de forma explícita modelos regionais de escala reduzida para representar os impactos regionais, embora sejam eles necessários para este tipo de estudo. As Funções Danos adotadas mais abaixo são uma maneira simples e direta de calcular os danos regionais agregados sem recorrer explicitamente a um modelo de clima regional de escala reduzida. A regionalização das mudanças climáticas será capturada por um simples parâmetro que mede o grau de vulnerabilidade de um país.

3.3.1 Modelo do Ciclo do Carbono

Seja $E_T(t)$ o nível de emissões globais, que é a soma das emissões de todos os países, na data t . Isto é:

$$E_T(t) = \sum_{i=1}^N E_i(t) \quad (\text{Gt C / ano}) \quad (3.10)$$

Assumiremos que o agente calculará as concentrações globais de CO₂ equivalente, Con(t) na data t, com a seguinte equação de diferenças finitas, com $\Delta t = 1$, (Ver Capítulo 1) :

$$\text{Con}(t+1) = (1 - \delta_M) \cdot \text{Con}(t) + \delta_E E_T(t+1) \quad (\text{Gt C}) \quad (3.11)$$

As constantes δ_M e δ_E referem-se, respectivamente, à taxa de assimilação de CO₂ pelo Oceano e à fração do CO₂ emitido que é efetivamente incorporado à atmosfera. Embora existam incertezas significativas nestes dois parâmetros, não as assumiremos aqui e adotaremos os valores $\delta_M = 0,002 \text{ ano}^{-1}$ e $\delta_E = 0,5$, ($\delta_E = 50\%$), (NORDHAUS, 1992; AMANO, 1997). Em estudos posteriores também poderemos associar a cada um destes parâmetros distribuições de probabilidades e fazer estudos sobre os impactos da evolução dessas incertezas sobre as decisões dos agentes, particularmente para o parâmetro δ_M que é muito importante por se relacionar ao tempo de residência do CO₂ na atmosfera, e conseqüentemente sobre seu potencial de aquecimento, e sobre o qual ainda persistem incertezas significativas (HOUGHTON ET TAL, 1992; WATSON, 2001).

A partir da Equação 3.11 o agente pode projetar uma trajetória de concentrações atmosféricas de GEE desde um momento de decisão k qualquer, até o momento k+HP(k). Essa projeção é feita calculando iterativamente as concentrações Con(k), Con(k+1), Con(k+2), ..., Con(k+HP(k)), (Figura 3.6 A). Usualmente se considera como nível de concentração original aquela da era pré-industrial

$Con(\text{pré Ind}) = 590 \text{ GtC}$, entretanto, o agente pode em cada momento de decisão considerar como concentração inicial aquela observada no próprio momento k , atualizando

Figura 3.6: (A) Exemplos de projeções da concentração atmosférica de GEE. A curva em azul escuro refere-se à evolução BAU e a curva em azul claro à evolução para uma política de abatimento específica. (B) Projeções do forçamento radiativo correspondentes, respectivamente, a cada caso da figura (A). O momento de decisão é $k = 2020$ e $HP(2020) = 100$ anos.

continuamente essa variável em seu modelo. Denotaremos uma projeção da concentração desde k até $k+HP(k)$ por $Con(k,t)$.

3.3.2 Modelo do Balanço Energético

O aumento das concentrações de GEE na atmosfera produzem um forçamento radiativo positivo, isto é, um fluxo de deposição de energia térmica na superfície da terra, que é dada por:

$$\Delta F(t) = 6,3 \ln \left(\frac{Con(t)}{Con(\text{préInd})} \right) \quad \left(W/m^2 \right) \quad (3.12)$$

Onde $Con(t)$ e $Con(\text{préInd})$ são as concentrações na data t e na era pré-industrial, respectivamente. Suporemos aqui, por simplicidade, que o agente não considera emissões

de aerossóis. O forçamento radiativo dos aerossóis é negativo, isto é, implica em resfriamento e seu efeito será atenuar o aquecimento global. Em modelos mais detalhados os aerossóis podem ser introduzidos sem dificuldade somando-se o termo correspondente no lado direito da equação acima. A não introdução do termo dos aerossóis em nada prejudica as simulações e análises deste trabalho. A partir da projeção da concentração, pode-se, usando a Equação 3.12, projetar a trajetória do forçamento radiativo para o mesmo período entre k e $k+HP(k)$ (Figura 3.6 B). Denotaremos essa projeção por $\Delta F(k,t)$ e observamos que na iteração da Equação 3.12) o denominador $Con(preInd)$ deve ser mantido em cada iteração.

O aquecimento produzido pela retenção de energia radiante na superfície da Terra vem acompanhado da elevação da temperatura média superficial global. Para o seu cálculo parte-se da elevação da temperatura como resposta de equilíbrio entre o Oceano e a Atmosfera à forçante das emissões globais, dada por:

$$\Delta T_{eq}(t) = \Delta T_{2xCO_2} \Delta F(t) \quad (^\circ C) \quad (3.13)$$

ou ainda, tendo em vista a Equação 3.11.

$$\Delta T_{eq}(t) = \Delta T_{2xCO_2} \ln \left(\frac{Con(t)}{Con(0)} \right) \quad (^\circ C) \quad (3.14)$$

onde ΔT_{2xCO_2} é a elevação de temperatura de equilíbrio que ocorreria quando se duplica a concentração de CO_2 . Essa quantidade é denominada Sensibilidade Climática (SC) (Ver Capítulo 1 para detalhes).

O Oceano não se aquece repentinamente, mas devido a sua enorme massa de água, absorve o calor retido na atmosfera lentamente. Isto reduz ao longo do tempo o aquecimento que seria produzido na atmosfera se esta estivesse em equilíbrio térmico com o Oceano. A rapidez com que esse processo ocorre depende da velocidade de mistura das águas superficiais com as águas profundas do Oceano. Modelamos aqui este processo de transporte de calor por um processo difusivo simples, com uma constante de difusão de calor, denotada por DO, e seu inverso, (1/DO), que é a constante de tempo característica da inércia térmica do Oceano. A temperatura que está associada ao aquecimento efetivo denomina-se temperatura realizada e, por causa da inércia térmica, será sempre uma fração da temperatura de equilíbrio. A expressão que relaciona as temperaturas de equilíbrio e realizada pode ser escrita como (HOFFERT ET TAL, 1980):

$$\frac{d\Delta T(t)}{dt} = \beta(\Delta T_{eq}(t) - \Delta T(t)) \quad (^\circ C/s) \quad (3.15)$$

Como estamos tratando de um modelo em tempo discreto, podemos reescrever esta equação diferencial em termos de diferenças finitas, com $\Delta t = 1$, isto é:

$$\Delta T(t+1) = \Delta T(t) + \beta(\Delta T_{eq}(t) - \Delta T(t)) \quad (^\circ C) \quad (3.16)$$

onde β é a difusividade térmica oceânica, DO, acima referida. O primeiro membro desta equação pode ser calculado a partir de uma elevação de temperatura observada, em qualquer época de referência. Usualmente na literatura do (HOUGHTON ET TAL, 1992;

WATSON, 2001; SRES, 2001) sobre cenários de aquecimento se adota $\Delta T(1990) = 0,6$ °C relativamente à temperatura média superficial global da era pré-industrial, $T(1760) = 15$ °C, e projeta-se a elevação de temperatura até 2100. No presente modelo cada agente realiza uma sequência de projeções ao longo do tempo e por isso toma como elevação de temperatura realizada inicial aquela observada no momento de decisão k , e calcula $\Delta T(k, t)$ até o momento posterior $k + HP(k)$, para todo t , $k \leq t \leq k + HP(k)$ (Figura 3.7).

Figura 3.7: (A) Exemplo de projeções de elevação de temperatura de equilíbrio para algumas políticas de abatimento, com $SC = 3,5$ °C. A curva em verde claro superior é a trajetória BAU. (B) Trajetórias correspondentes para a elevação de temperatura realizada. Com $SC = 3,5$ °C e $(1/DO) = 90$ anos. Notemos o atraso destas elevações relativamente às repostas de equilíbrio em (A). As projeções foram feitas em $k = 2020$ com $HP(2020) = 100$ anos. (PROCLIN, 2006).

A expressão para a projeção da elevação da temperatura realizada é, então:

$$\Delta T(k, t + 1) = \Delta T(k, t) + \beta \cdot (\Delta T_{eq}(k, t) - \Delta T(k, t)) \quad (^\circ C) \quad (3.17)$$

que é calculada iterativamente desde k até $k + HP(k)$. Em cada momento k , o agente atualiza o valor de $\Delta T(k, k)$. A temperatura média superficial global em cada ano será então:

$$T(t+1) = T(t) + \Delta T(t+1) \quad (^\circ\text{C}) \quad (3.18)$$

onde a temperatura inicial de referência será $T(1990) = 15,6^\circ\text{C}$. A seguir passamos a descrever os modelos dos custos ${}_C M_i$ e danos ${}_D M_i$ de cada país.

3.4 Modelo dos Impactos Climáticos Regionais

3.4.1 Função Danos Climáticos

Suporemos que cada governo P_i representa seus impactos climáticos em cada ano t , através de uma função que fornece a valoração econômica agregada desses impactos. Estes danos serão expressos como porcentagem do Produto Interno Bruto do país, $\text{PIB}_i(t)$, através da Função Danos Climáticos, cuja forma é:

$$d_i(t) = \alpha_i \cdot \Delta T(t)^{\theta_i} \quad (\%) \quad (3.19)$$

Onde os parâmetros α_i e θ_i representam a “visão” do governo, informada por especialistas, sobre como os danos dependem da elevação de temperatura global $\Delta T(t)$. O primeiro parâmetro indica a taxa de crescimento dos danos com o aumento da temperatura e o segundo parâmetro, o grau de não linearidade da função dano.

Para expressarmos os danos climáticos em unidades de PIB do país, escrevemos:

$$D_i(t) = \alpha_i \cdot T(t)^{\theta_i} \cdot \text{PIB}_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.20)$$

O coeficiente α_i pode ser pensado como um índice de vulnerabilidade médio do país. Se dois países P_i e P_j , têm coeficientes α_i e α_j em suas respectivas funções dano com o mesmo expoente $\theta_i = \theta_j$, tais que $\alpha_i > \alpha_j$, então P_i é mais vulnerável que P_j às mudanças climáticas. Isto é, para uma mesma elevação de temperatura, os danos em P_i serão maiores que os danos em P_j . Associaremos a cada coeficiente de vulnerabilidade uma distribuição de probabilidades subjetivas, que expressará a expectativa de especialistas sobre a vulnerabilidade regional do país P_i às mudanças climáticas globais. A variável ΔT é a elevação de temperatura realizada.

Suporemos os expoentes nas funções danos são o mesmos, $\theta_i = \theta_j$, para qualquer país, a fim de concentrarmos nossa atenção nos parâmetros α_i . Além disso, suporemos que os governos não esperam impactos que cresçam rapidamente, o que significa que o expoente de sua função dano deve ser pequeno na Equação 3.20. Assumiremos que $0 < \theta_i \leq 2$, que é um intervalo dentro da faixa de valores mais comumente utilizados nos estudos de danos (ROUGHGARDEN; SCHNEIDER, 1999) (Ver Capítulo 1).

3.4.2 Projeções de Danos

Cada governo P_i , em uma data de decisão k , calcula qual seria seu dano climático nas datas futuras t , $t \geq k$, até a data $k + \text{HP}(k)$, denotado por $D_i(k, t)$, para cada opção

política que deseja analisar. Isto é, ele faz uma projeção da trajetória dos danos climáticos, e pode também calcular o dano climático total do período considerado. Simbolicamente:

$$d_i(k, t) = \alpha_i \cdot \Delta T(k, t)^{\theta_i} \quad (\%) \quad (3.21)$$

Na Figura 3.8 vemos um exemplo de um feixe de projeções da Função Dano. As projeções podem também ser feitas em unidades de PIB:

$$D_i(k, t) = \alpha_i \cdot \Delta T(k, t)^{\theta_i} \cdot \text{PIB}_i(k, t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.22)$$

Figura 3.8: Projeções da Função Dano Climático realizadas para algumas opções de abatimento. No exemplo $k = 2020$ e $HP(2020) = 100$ anos. A curva azul escuro superior refere-se ao caso BAU, no qual as perdas climáticas são máximas. Notemos nas curvas coloridas abaixo daquela, o efeito atenuador dos danos produzido pelas políticas de abatimento produzem. (PROCLIN, 2006)

E a soma dos danos climáticos em todo o período considerado será:

$$D_i^{\text{TOT}}(k; k + HP(k)) = \sum_{j=k}^{k+HP(k)} D_i(k, j) \cdot \delta^j(k) \quad (\text{US\$}) \quad (3.23)$$

onde δ^j é a preferência temporal do agente adotada pelo agente para projetar as trajetórias de danos e depende da taxa de desconto. Adotaremos $\delta^j = 1$, (Ver Apêndice A sobre a taxa de desconto e equidade).

3.4.3 A Queda de PIB e os Danos Evitados

O Produto Interno Bruto observado, quando não se tomam medidas de redução de emissões, é o resultado líquido da atividade econômica juntamente com as perdas na produção devidas às mudanças climáticas. Esse PIB é a Linha de Base ou “Business as Usual” (BAU) na sua segunda versão citada no fim da Seção 3.2.3, que é calculado através da expressão:

$$\text{PIB}_i^*(t) = \text{PIB}_i(t) - D_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.24)$$

Ou ainda, por (20) temos:

$$\text{PIB}_i^*(t) = \text{PIB}_i(t) \cdot (1 - d_i(t)) \quad (\text{US\$}) \quad (3.25)$$

A projeção desse PIB desde k até $k + \text{HP}(k)$ é dada por:

$$\text{PIB}_i^*(k; t) = \text{PIB}_i(k, t) \cdot (1 - d_i(k, t)) \quad (\text{US\$}) \quad (3.26)$$

Onde $PIB_i(k, t)$ é calculado pela Equação 3.3. É importante ressaltar que a projeção BAU do PIB com os danos incluídos podem levar, substituindo a Equação 3.24 na Equação 3.4, a emissões que eventualmente diminuam, não devido a políticas de abatimento, mas por causa de danos climáticos que, ao diminuïrem o ritmo da produção, acarretam diminuição das emissões (Ver Figura 3.5 B). O mesmo pode ser dito dos danos climáticos. Esses danos em um cenário BAU podem, a partir de uma certa data, diminuir não por causa de políticas de abatimento de emissões, mas devido a perdas do produto interno total anteriores àquela data. O analista que usa estes modelos deve ficar atento a estas possibilidades e considerar as perdas de PIB devido ao aquecimento global, para poder saber se uma eventual queda nas emissões e nos próprios danos climáticos advém de medidas de abatimento ou de danos do clima ou de ambas. Esse é um aspecto importante no cálculo dos danos evitados por políticas de abatimento, raramente indicado nos modelos clima-economia.

Se as emissões globais $E_T(t)$, sem abatimento, isto é, são emissões BAU, e se forem reduzidas, por políticas de abatimento, de uma certa quantidade $\delta E_T(t)$ na data t , tal que a nova emissão é $E_T^*(t) = E_T(t) \cdot (1 - \delta E_T(t))$ então, percorrendo a seqüência de cálculos desde a Equação 3.10) até a 3.16 obtemos uma elevação de temperatura realizada diminuída por um fator $\delta \Delta T(t)$ relativamente àquela sem reduções de emissões (BAU). Pela Equação 3.21 obtém-se um novo dano:

$$D_i^*(t) = b_i \cdot (\Delta T(t) - \delta \Delta T(t))^{\theta_i} \cdot \text{PIB}_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.27)$$

Definimos Dano Evitado pela redução $\delta E_T(t)$ de emissões globais na data t , à quantidade:

$$\Delta D_i(t) = D_i(t) - D_i^*(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.28)$$

onde $D_i(t)$ é calculado para o caso sem abatimento (BAU). A partir dessa expressão um governo pode calcular a projeção de danos evitados, pelo pulso de redução de emissões em t , desde k até a $k+HP(k)$ iterando a Equação 3.28:

$$\Delta D_i(k, t) = D_i(k, t) - D_i^*(k, t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.29)$$

A partir desta definição, o governo pode calcular também, por simples extensão do procedimento acima, a trajetória de danos evitados devido à redução global de emissões realizada em um período finito desde k a $k+hp(k)$. E assim para cada política global de redução de emissões, teremos, em cada país, uma trajetória de danos evitados (Figura 3.9).

Figura 3.9: Projeções de danos percentuais evitados em um país P_i para três políticas globais de abatimento. As trajetórias correspondem aos danos projetados da Figura 8. Notemos que somente temos três curvas, pois os danos evitados são calculados com relação à curva BAU de danos daquela figura. (PROCLIN, 2006)

3.5 Modelo dos Custos de Abatimento

3.5.1 Função Custos de Abatimento

Suporemos que cada governo $P_i, i = 1, 2, 3 \dots N$, representa seus custos de abatimento de emissões, para cada ano t , através de uma Função Custo de Abatimento, cuja forma é:

$$c_i(t) = a_i \cdot \mu_i(t)^{\varphi_i} \quad (\%) \quad (3.30)$$

Onde $\mu_i(t)$, $0 \leq \mu_i(t) \leq 1$, representa a quantidade percentual de abatimento de emissões de GEE realizada no ano t calculada através da Equação 3.6. Essa função é expressa em termos de porcentagem (%) do PIB do país onde os parâmetros a_i e φ_i representam a “visão” do governo, informado por especialistas, sobre como os custos dependem da

quantidade de abatimento de emissões $\mu_i(t)$. Os custos de abatimento em unidades do PIB_i(t) do país no ano t, serão dados por:

$$C_i(t) = b_i \cdot \mu_i(t)^{\varphi_i} \cdot \text{PIB}_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.31)$$

As funções custo de abatimento que os agentes utilizam não correspondem necessariamente ao comportamento efetivo do mercado de suas economias. Isto pode ocorrer por uma série de razões. (Para detalhes ver Capítulo 1). A função escolhida no modelo do Ambiente Econômico de Base, pode não ser igual àquela que o governo representa esse ambiente. Nesse caso haverá uma discrepância entre os custos observados e esperados. Associaremos ao coeficiente a_i da função custo uma distribuição de probabilidades subjetivas, que expressará a expectativa dos custos de abatimento no país P_i . Adotaremos a faixa $2 \leq \varphi_i \leq 3$ de valores para o expoente da função custos, que inclui os principais valores que vêm sendo assumidos na literatura sobre modelos de custos, mas não consideraremos estes expoentes como incertos. E assumiremos que todos os países têm o mesmo expoente em suas funções custos.

3.5.2 Projeções dos Custos de Abatimento

Cada governo P_i faz uma estimativa dos Custos de Abatimento para o período que vai desde o momento k , até $k + hp(k)$, denotada por $C_i(k, t)$, onde é utilizado o horizonte de planejamento $hp(k) \leq HP(k)$. Esta avaliação está baseada na Função Custo que ele utiliza

para calcular os custos de abatimento (Equação 3.30). Através desta função ela faz a projeção dos custos no período em foco, obtendo as trajetórias desses custos para cada política de abatimento doméstica. Simbolicamente:

$$C_i^{TOT}(k; k + hp(k)) = \sum_{j=k}^{k+hp(k)} C_i(k, j) \cdot \delta^j \quad (\text{US\$}) \quad (3.32)$$

onde δ^j é a preferência temporal do agente adotada pelo agente para projetar as trajetórias de danos e depende da taxa de desconto. Adotaremos $\delta^j = 1$, (Ver Apêndice A, sobre taxa de desconto).

3.6 A Perda Social Total e Suas Projeções

A Função Perda Social Total de cada país, $PS_i(t)$ no ano t , é por definição a soma das Funções Custos de Abatimento e Função Danos Climáticos em t . Simbolicamente:

$$ps_i(t) = c_i(t) + d_i(t) \quad (\%) \quad (3.33)$$

A Perda Social, $PS_i(t)$, em t , é definida como a soma dos danos e custos em t em unidades de PIB, isto é:

$$PS_i(t) = C_i(t) + D_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.34)$$

A sua projeção feita em cada momento k será:

$$PS_i(k, t) = C_i(k, t) + D_i(k, t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.35)$$

O agente calcula também a soma total ao longo de um período entre k e $k+HP(k)$ das Perdas Sociais dada por:

$$PS_i^{TOT}(k; k + hp(k)) = \sum_{j=k}^{k+hp(k)} C_i(k, j) \cdot \delta^j + \sum_{j=k}^{k+HP(k)} D_i(k, j) \cdot \delta^j \quad (\text{US\$}) \quad (3.36)$$

onde $\delta^j = 1$.

3.7 O PIB Líquido e suas Projeções

O Produto Interno final, ou líquido, descontadas as perdas devido ao problema das mudanças climáticas é dado por:

$$PIB_i^{**}(t) = PIB_i(t) - PS_i(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.37)$$

Onde $PIB_i(t)$ é o PIB BAU sem reduções de emissões e sem a subtração dos danos climáticos, expresso na Equação 3.3. A projeção do PIB líquido desde k até $k+HP(k)$, denotada por $PIB_i^{**}(k, t)$ é dada por:

$$PIB_i^{**}(k, t) = PIB_i(k, t) - PS_i(k, t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.38)$$

para todo t , tal que $k \leq t \leq k + hp(k)$.

3.8 Uma Regra para Gerar a Máxima Opção de Abatimento

Uma vez definidas os danos, custo e perdas de forma quantitativa através das funções acima, estamos em condições de mostrar um exemplo concreto de uma regra para mudar a opção máxima consideremos a expressão. Se um governo planeja, no momento k , uma taxa de crescimento para seu PIB de $\delta y_i(k)$ e fixa, a partir de várias considerações sobre sua economia, que não nos interessa detalhar aqui, uma taxa mínima aceitável de crescimento, $\delta y_{iMin}(k)$, então a diferença em cada ano entre o seu PIB BAU, como calculado em sua segunda versão, Equações 3.24 ou 3.25, e o seu PIB mínimo nesse ano, que seria aquele que cresceria à taxa mínima $\delta y_{iMin}(k)$, nos fornece o custo máximo, C_{iMax} permitido para abater emissões, isto é,

$$C_{iMax}(t) = PIB_i^*(t) - PIB_{iMin}(t) \quad (\text{US\$}) \quad (3.39)$$

Usando a Função Custos de Abatimento acima, Equação 3.31, obtemos a taxa máxima de abatimento $\mu_{iMax}(k)$. Assim fixado um limiar de crescimento econômico mínimo devido a abatimento, podemos achar a taxa máxima de abatimento a cada ano.

3.9 Síntese do Modelo Integrado

A Tabela 3.1 mostra todas as variáveis que compõem o modelo integrado clima-

	Nome da Variável	Símbolo
	Modelo do Clima	ΔT_M
1	Concentrações Atmosféricas de GEE	$Con(t)$
2	Forçamento Radiativo	$\Delta F(t)$
3	Elevação de Temperatura de Equilíbrio	$\Delta T_{Eq}(t)$
4	Elevação de Temperatura Realizada	$\Delta T(t)$
	Modelo Econômico e de Emissões	$_E M_i(k)$
5	Intensidade de carbono	$\sigma_i(k)$
6	Emissões Nacionais	$E_i(t)$
7	Produto Interno Bruto	$PIB_i(t)$
	Modelo de Danos Climáticos	$_D M_i(k)$
8	Função Dano	$d_i(t)$
9	Danos Climáticos	$D_i(t)$
10	Danos Evitados	$\Delta D_i(t)$
11	Danos Climáticos Totais	$D_i^{TOT}(k, HP(k))$
	Modelo de Custos de Abatimento	$_C M_i(k)$
12	Função Custo de Abatimento	$c_i(t)$
13	Custos de Abatimento	$C_i(t)$
14	Custos Totais de Abatimento	$C_i^{TOT}(k, hp(k))$
	Perda Social	
15	Função Perda Social	$ps_i(t)$
16	Perda Social	$PS_i(t)$
17	Perda Social Total	$PS_i^{TOT}(k, hp(k), HP(k))$

Tabela 3.1: Nome das variáveis de cada sub-modelo do modelo integrado $MAI_i(k)$ e os símbolos usados para cada uma.

	Nome do Parâmetro	Símbolo	Tipo
	Modelo do Clima	ΔT_M	
1	Taxa de Assimilação de CO ₂ na Atmosfera	δ_E	Certo
2	Taxa de Absorção de CO ₂ pelo Oceano	δ_M	Certo
3	Sensibilidade Climática	SC	Incerto
4	Difusividade Térmica do Oceano	β	Incerto
	Modelo Econômico e de Emissões	$_E M_i(k)$	
5	Taxa de Mudança Natural da Intensidade de Carbono	$\delta\sigma_i$	Certo
6	Taxa de Crescimento BAU do Produto Interno Bruto	δy_i	Certo
	Modelo de Danos Climáticos	$_D M_i(k)$	
7	Coeficiente da Função Dano	b_i	Incerto
8	Expoente da Função Dano	θ_i	Certo
9	Taxa de Desconto	δ_i	Certo
	Modelo de Custos de Abatimento	$_C M_i(k)$	
10	Coeficiente da Função Custo de Abatimento	a_i	Incerto
11	Expoente da Função Custo de Abatimento	$\varphi_i(t)$	Certo

Tabela 3.2: Parâmetros usados nos sub-modelos do modelo integrado $MAI_i(k)$, onde estão indicados os quatro parâmetros que são considerados, neste trabalho, incertos e aos quais associamos distribuições de probabilidades.

economia que cada agente usa para tomar suas decisões de abatimento. E a Tabela 3.2 mostra todos os parâmetros do modelo, indicando aqueles que são considerados neste trabalho parâmetros incertos aos quais são atribuídas distribuições de probabilidades.

O modelo integrado clima-economia desenvolvido neste capítulo capacita cada governo a fazer projeções em cada momento de decisão k . Para isso em cada momento k ele atualiza seu modelo por observação direta dos valores das seguintes variáveis:

- a) Concentração atmosférica de GEE: $Con(k)$.
- b) Elevação de Temperatura Realizada: $\Delta T(k)$.

- c) Produto Interno Bruto: $PIB_i(k)$
- d) Intensidade de carbono: $\sigma_i(k)$.

A atualização dos valores das outras variáveis da Tabela 3.1 é feita mediante o cálculo de seus valores em k . Em seguida o agente faz, para uma seqüência de anos, indo desde o ano k até o ano $k+HP(k)$, as projeções de todas as variáveis da Tabela 3.1.

Se considerarmos o caso em que o agente é um único tomador de decisões global, e se em k existe um conjunto de $m_i(k)$, $m_i(k) \geq 2$ opções de abatimento de emissões, $\mu_{ij}(k)$, $j=1,2,3,\dots, m_i(k)$, então para cada uma das $m_i(k)$ opções projetará uma trajetória para cada variável da Tabela 3.1. A esse grupo de trajetórias denominamos Cenário de Evolução das Mudanças Climáticas com o modelo $MAI_i(k)$. O agente constrói então $m_i(k)$ Cenários de Evolução, um para cada opção da abatimento. Em seguida o agente compara cada uma das perdas totais para o período de k a $k+HP(k)$ e escolhe a menor, maximizando o seu PIB ou aplica algum outro critério complementar (Ver Capítulo 5) (Figura 3.10).

Figura 3.10: Diagrama representando o Ciclo Observação-Atualização-Projeção-Decisão que um governo global realiza em um único momento de decisão k com seu modelo integrado $MAI_i(k)$. As projeções dos cenários vão de k a $k+HP(k)$.

Se considerarmos N governos, $N \geq 2$, percorrendo o ciclo de operação acima cada um deles deve considerar, além das suas opções de abatimento, as opções de abatimento de todos os outros países, para poder gerar cenários de emissões globais para alimentar o modelo climático e obter as suas consequências regionais. A complexidade da situação aumenta bastante relativamente ao caso simples esquematizado acima. No Capítulo 6 abordaremos a situação geral quando introduzirmos as negociações para distribuir cotas de emissões. Na Figura 3.11 vemos um painel de uma seqüência de projeções realizada por um governo global, gerando e, cada momento k um Cenário de Evolução das mudanças climáticas globais.

Figura 3.11: Da esquerda para a direita e de cima para baixo, vemos uma seqüência de projeções do PIB Líquido Global, levando em conta os danos climáticos. A curva vermelha refere-se ao PIB observado pelo agente até a data indicada na linha vermelha vertical. A curva azul claro indica a projeção feita por ele dentro do horizonte de antecipação. Notemos que esse horizonte aumenta ao longo do tempo. O alcance da antecipação termina na linha azul claro vertical. A curva preta mais longa é a projeção BAU, que prolongamos além do HP para que se possa ter uma referência visual do alcance das antecipações. (Gráficos gerados no Proclin)

CAPÍTULO 4

Mudanças Climáticas e Tomadas de Decisão Sequencial Sob uma Cascata de Incertezas

4.1 Introdução

As decisões sobre o controle de gases de efeito estufa (GEE) não podem ser feitas de uma vez por todas, e as decisões tomadas hoje serão reconsideradas nos anos futuros à luz de novos dados e de maior entendimento sobre o problema. Este processo pode ser caracterizado como uma tomada de decisão sequencial sob incertezas.

No Capítulo 2 desenvolvemos a estrutura de um agente genérico representando um tomador de decisões governamentais diante de opções de abatimento de emissões de GEE. Mas o tratamento dado naquele capítulo às incertezas foi genérico, e se faz necessário dotar os agentes decisores de uma metodologia para lidar com estas incertezas para poderem decidir por uma ação de redução de emissões.

Neste capítulo expomos um método para tratar as incertezas em tomada de decisão sobre as mudanças climáticas globais, cuja utilidade vai além do modelo do agente desenvolvido neste trabalho. Sua utilidade reside na sua simplicidade e por tornar muito transparente a cascata de incertezas desde a ciência do clima até a tomada de decisão de políticas de mitigação. Este método é tradicionalmente utilizado em diversas áreas de ciência, economia, finanças, área ambiental e administração empresarial e foi utilizado por (VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN 1998) como uma ferramenta para análise de decisões em mudanças climáticas, a partir de simulações feitas em um modelo de análise integrada complexo do Massachusetts Institute of Technology (MIT).

O método proposto por estes autores baseia-se na análise clássica de decisões usando Diagramas de Influência, e apesar de usarem a ferramenta para os fins específicos de seu modelo do MIT, ela pode ser generalizada para análises de decisões em mudança climática global e regional aplicando-se a uma larga classe de modelos nessas áreas. A seguir fazemos esta generalização e ao mesmo tempo incorporamos conceitos e métodos que vêm sendo utilizados em modelagem integrada e no tratamento de incertezas de mudanças climáticas. Para isto seguimos o tratamento dado por (VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN 1998), mas modificamos a sua análise em vários pontos a fim de ampliá-la e aprofundá-la adequando-a a nosso propósito. De fundamental importância foi o trabalho de (CLEMEN, 1991) para a parte teórica e metodológica, que foi a fonte também para os autores citados. Ainda que este último autor não aborde o problema das mudanças climáticas, ele fornece vários exemplos com a mesma estrutura de decisão do problema tratado neste capítulo.

O objetivo de informar os formuladores de políticas exige que uma análise de decisões sequenciais esteja baseada em representações matemáticas relativamente simples dos processos subjacentes às decisões. Para a metodologia apresentada abaixo, consideramos que o tomador de decisões se apóia em modelos para lidar com sete componentes: (1) a trajetória das emissões dos gases de efeito estufa; (2) o efeito dessas emissões sobre as concentrações atmosféricas; (3) a tradução dessas concentrações em forçamento radiativo; (4) a resposta do clima a esta forçante em termos de elevação de temperatura; (5) os impactos dessas mudanças do clima, e (6) a valoração econômica desses impactos, em termos dos danos, e finalmente (7) os custos implicados por uma decisão de abater as emissões. Alguns modelos utilizados para analisar estes componentes foram

expostos no Capítulo 3 e se integram naturalmente à discussão que se seguirá, embora a discussão seja genérica.

A seguir abordaremos o problema da tomada de decisões com incertezas usando Diagramas de Influência (DI). Um diagrama de influência é uma ferramenta tanto visualmente eficiente para comunicar as conexões entre as incertezas e os outros elementos da decisão, quanto computacionalmente poderosa, e é um método particularmente útil quando uma representação em árvore de decisão pode ter muitos nós e ramos que acaba tornando-se fácil perder-se na “floresta”. Por ter estas qualidades, este tipo de diagrama serve bem ao propósito de comunicar incertezas e conexões entre elementos chave da estrutura de decisões em mudanças climáticas.

Para fornecer uma base para a discussão abaixo, começamos com um sumário da notação e dos conceitos que fundamentam a representação de escolhas diante de incertezas.

4.2 Diagramas de Influência: Conceitos e Notação

Diagramas de influência são redes gráficas desenhadas para representar os importantes aspectos qualitativos de elementos chave de um problema de decisão. O fluxo de informação e sua relação funcional com as escolhas de ação podem ser exibidas em qualquer nível desejado de agregação.

Muitos problemas de decisão do mundo real são formulados em um domínio consistindo de variáveis de decisões $D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ e de quantidades incertas ou aleatórias $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$; o DI fornece uma forma conveniente de representar as relações entre estes componentes.

Formalmente, um DI é um grafo acíclico dirigido cujos vértices ou nós representam ou 1) variáveis de decisão ou 2) variáveis aleatórias ou 3) funções valor. Nesse grafo podemos identificar os seguintes elementos (Figura 4.1):

- Nós de Decisão: representam ações sob o controle completo do tomador de decisão e são exibidos graficamente como quadrados.
- Nós de Acaso: representam variáveis aleatórias ou variáveis incertas e são exibidas graficamente como círculos ou ovais.
- Nós de Valores: representam alguma quantidade ou valor chave resultante a partir de decisões feitas ou associadas com um estado particular da natureza. É exibido graficamente como losângulos ou quadrados arredondados.

Figura 4.1: Os dois tipos de Arcos em um Diagrama de Influências: (a) Arcos de Informação e (b) Arcos de Relevância.

Os arcos em um DI podem ser de dois tipos: arcos de informação e arcos de relevância. Um arco saindo de um nó de decisão ou acaso A para um nó B de decisão é dito ser informacional no sentido de que o arco implica uma precedência temporal e assevera que a variável A é conhecida pelo tomador de decisão no momento em que a decisão B é

tomada (Figura 4.1(a)). Um arco saindo de um nó de decisão ou acaso A para um nó de acaso B, é chamado de arco de relevância e denota uma dependência funcional ou probabilística. A ausência de um arco de relevância representa independência condicional entre as variáveis em questão (Figura 4.1(b)) (CLEMEN, 1991).

Identificar a “relevância”, isto é, a dependência funcional e probabilística das variáveis, é uma importante tarefa na construção de um DI. Deve-se começar pelo ordenamento das variáveis de incerteza em $U = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, e para cada variável X_i especificar um conjunto de antecedentes, $ant(X_i) = \{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, D\}$, tais que

$$\Pr\{X_i \mid X_1, X_2, \dots, X_{i-1}, D\} = \Pr\{X_i \mid ant(X_i)\} \quad (4.1)$$

onde $\Pr$ denota probabilidade. A equação acima afirma que a probabilidade da variável X_i , depende das variáveis aleatórias $\{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$ e da variável de decisão D .

A construção de um DI requer que para cada variável $z \in ant(X_i)$ coloquemos um arco de relevância que sai de z para X_i no diagrama. Seguindo este procedimento, associado a cada nó do tipo acaso X_i em um DI estão as distribuições de probabilidade $\Pr\{X_i \mid ant(X_i)\}$. E segundo a chamada “regra da cadeia” de probabilidades, tem-se que

$$\Pr\{X_1, \dots, X_n \mid D\} = \prod_{i=1}^n \Pr\{X_i \mid X_1, \dots, X_{i-1}, D\} \quad (4.2)$$

Dadas as equações (1) e (2), segue que qualquer DI para o conjunto $U \cup D$ de variáveis aleatórias e de decisão, determina univocamente a seguinte distribuição de probabilidade conjunta para U dada a decisão D :

$$\Pr\{X_1, \dots, X_n \mid D\} = \prod_{i=1}^n \Pr\{X_i \mid \text{ant}(X_i)\} \quad (4.3)$$

Desta forma, os DI's fornecem uma base quantitativamente rigorosa para uma descrição probabilística completa das decisões sob incerteza. Durante a década passada vários procedimentos numéricos foram desenvolvidos para computar a política de decisão ótima a partir de um DI (VALVERDE; JACOBI; KAUFMAN, 1998; CLEMEN, 1991).

Finalmente, as probabilidades das variáveis aleatórias devem satisfazer a relação fundamental da teoria das probabilidades, isto é:

$$\sum_{i=1}^n \Pr\{X_i\} = 1 \quad (4.4)$$

Um problema de tomada de decisão sob incerteza tem a seguinte forma geral, representada com um DI (Figura 4.2):

Figura 4.2: A unidade básica de um Diagrama de Influência para uma decisão tomada sob incerteza

Como exemplo, consideremos um agente em face da questão do quanto abater de suas emissões de GEE. Suponhamos que ele tenha duas opções: nada abater ou abater uma certa porcentagem do seu nível atual de emissões. Dadas as incertezas que ele tem sobre o comportamento do clima e da sua economia, ele desconhece o resultado exato de qualquer uma de suas opções, em termos da mudança evitada do clima. O clima e a economia estão representados pelo nó de acaso, a sua decisão pelo nó de decisão, e o resultado efetivo, após a escolha de uma das duas opções, pelo nó de valor, que poderia ser, por exemplo, a elevação do nível médio do mar expresso em metros. O fato da seta do nó de acaso ir direto para o nó de valor significa que pelo menos alguns fatores dos sistemas do clima e da economia escapam do controle do tomador de decisões. Notemos, além disso, que não há no diagrama nenhuma seta chegando ao nó de decisão, isto é, no momento de decisão o agente não dispõe de nenhuma informação sem incerteza.

Um processo de tomada de decisão seqüencial sob incerteza é representado por um DI que é uma estrutura que repete a unidade básica do diagrama anterior pelo menos uma vez. Nesse processo existe um elemento adicional importante na seqüência de decisões. Se o tomador de decisões, a cada novo momento de escolha, souber qual foi o resultado de suas decisões anteriores e quais foram os valores das variáveis aleatórias, ele tomará cada nova decisão com um conjunto crescente de informações e isto pode fazer uma grande diferença nas suas escolhas futuras (Figura 4.3).

Figura 4.3: Um DI representando um processo sequencial de decisões sob incertezas. No exemplo, o decisor conhece, a cada momento de escolha, os valores anteriores das variáveis aleatórias e dos valores resultantes de suas decisões.

O diagrama da Figura 4.3 nos mostra que no primeiro momento de decisão o agente não tem informações anteriores sobre o processo ‘escolha da ação-efeito da ação’, pois este ainda não havia começado. A partir do segundo momento ele passa a ter informações sobre os resultados de suas decisões, além de acompanhar, no nosso exemplo, o comportamento passado do clima, representado pelo nó de acaso. O diagrama também indica que apesar dele obter a cada momento mais informações, continua tendo incertezas sobre o resultado de suas escolhas. Estas incertezas podem, em algumas situações, diminuir com o tempo. No caso em que houver uma solução completa de suas incertezas a partir de algum momento, o processo será representado por um outro diagrama (Figura 4.4).

Figura 4.4: Um exemplo de um processo de decisões sequenciais no qual as incertezas são resolvidas a partir de um certo momento.

Para se compreender a estrutura geral do problema básico de tomada de decisões sob incerteza em mudanças climáticas, consideremos um exemplo ilustrativo. Imaginemos um fazendeiro que cultiva um grande laranjal para fornecer laranja e suco de laranja ao mercado e que as árvores estejam carregadas de frutos que ainda não foram colhidos, e a época da colheita está próxima (CLEMEN, 1991).

Se a previsão do tempo para os próximos três dias, feita pelo departamento meteorológico, prevê um tempo ameno ele não tem com o que se preocupar, mas se a previsão é de geada, ele deve tomar medidas apropriadas se quiser evitar a perda da colheita. Isto implicará no gasto de dinheiro para adotar as medidas protetoras que salvarão a colheita. Em uma tal situação o fazendeiro tem de tomar uma decisão sobre se adotará ou não as medidas de proteção. Esta é uma decisão que deve ser feita com a informação que lhe está disponível e envolve comparar os custos de uma ação preventiva, com os benefícios de evitar perdas.

Se a previsão do tempo feito pela manhã afirmar que as condições do tempo dependerão do avanço de uma frente fria na direção da fazenda e que ainda não se pode afirmar com certeza qual será a direção que a frente tomará, então pode ser mais prudente esperar mais algum tempo para obter mais informações sobre a ocorrência da geada.

O fazendeiro pode ficar atento aos relatórios meteorológicos a cada duas horas, e nos próximos dias fazer o mesmo. Uma tal estratégia pode, entretanto, ter um custo mais alto do que o esperado, pois talvez ele tenha que contratar mão de obra emergencial para proteger a plantação, o que pode custar mais caro. Além disso, algumas medidas podem levar tempo para serem realizadas e se ele esperar para decidir, talvez não tenha tempo hábil para realizá-las, o que acarretaria uma grande perda.

Outra possibilidade seria uma estratégia preventiva, que lhe custasse menos pagando a alguns trabalhadores para trabalharem no turno da noite, para o caso de ser necessária uma ação rápida. Todas estas alternativas dão ao fazendeiro flexibilidade, embora cada alternativa tenha um custo a ser considerado. O diagrama de influências da Figura 4.3 pode representar esta situação. Os nós de acaso são os estados atmosféricos, notificados periodicamente pelo departamento meteorológico. Os nós de valores são os resultados sucessivos das ações tomadas pelo fazendeiro. A cada noticiário sobre o tempo, ele tem diante de si um espectro de opções que deve avaliar. À medida que acumula informação, ele tem condições de tomar uma decisão mais segura.

O problema básico que os governos enfrentam com relação às mudanças climáticas é semelhante ao do fazendeiro respeitadas algumas diferenças importantes. Um governo de um país emissor deve avaliar a cada ano ou período específico, com toda informação que lhe estiver disponível, a melhor política de abatimento para seu país. Ele é informado pelos cientistas naturais sobre os estados prováveis do clima, e pelos cientistas sociais, em especial os economistas, das possíveis reações de suas decisões na economia de seu país. Estas informações estão repletas de incertezas e ele deve tomar uma decisão mesmo diante delas.

Uma primeira diferença marcante entre o caso da mudança de clima e a ilustração anterior é que o resultado de sua escolha não será conhecido a não ser em uma época muito distinta no tempo, dada as inércias características dos sistemas climático e social. A outra diferença importante é que estas incertezas não se resolverão rapidamente, mas poderão levar também muitos anos, talvez até décadas para diminuir significativamente. E uma terceira diferença importante refere-se ao fato de que o governo não está sozinho no mundo. Suas decisões devem ser avaliadas juntamente com as decisões de outros governos,

pois mesmo que ele abata suas emissões, se os outros governos não o fizerem o problema não será resolvido.

A semelhança importante entre os dois casos é que sua decisão deve ser tomada em face de dois riscos: um se refere à possibilidade de descobrir, depois de tomada a decisão, que não havia necessidade dela, pelo menos na intensidade em que foi tomada, o que implicaria em custos excessivos desnecessários; o outro risco se refere à possibilidade de sofrer, se não for tomada a decisão em tempo, perdas muito grandes. Sem dúvida a melhor estratégia é fazer alguma coisa para evitar os danos, mesmo com as incertezas, mas quão intensa deve ser esta ação? A seguir descrevemos uma ferramenta para o tomador de decisões avaliar seus custos e danos evitados para poder tomar uma decisão mais bem informada. Esta ferramenta será utilizada pelos agentes dos Capítulos 2 e 3.

4.3 Um Modelo de Tomada de Decisão Seqüencial em Mudanças Climáticas

4.3.1 A Estrutura Geral da Decisão de Abatimento de Emissões sob Incertezas

A seguir aplicamos os conceitos expostos até aqui para representar a estrutura geral de um problema de tomada de decisão de abatimento de emissões de gases de efeito estufa sob incerteza. Em geral a análise básica que um decisor realiza para escolher uma ação de abatimento de emissões de GEE é a análise custo-benefício. Adotaremos este análise como o paradigma a partir do qual outras análises mais sofisticadas poderão ser desenvolvidas. Durante toda a exposição estaremos considerando modelos de decisão de tempo discreto.

Consideremos a tomada de decisão básica em mudanças climáticas para o caso abstrato de um único decisor global, pois esse caso é mais simples e pode depois ser generalizado sem dificuldades para N agentes. Esse tomador de decisões em um momento, k , deve escolher a melhor política de abatimento de emissões dentre um conjunto discreto de opções, para ser executada em um certo período, que se inicia em k e termina em $k + hp(k)$, onde $hp(k)$ é o horizonte de planejamento adotado no momento de decisão.

A decisão de uma política de abatimento implicará em um custo de abatimento, $C(t)$, relativo ao horizonte de planejamento $hp(k)$. Por outro lado, as suas ações de abatimento produzirão uma resposta do sistema climático, que depende de variáveis fora do controle do decisor. Os estados climáticos sucessivos à decisão produzirão impactos climáticos ao longo de um tempo indefinido, mas que podem ser avaliados desde o momento k até $k + HP(k)$, onde $HP(k)$ é um horizonte de antecipação. Suporemos que estes impactos podem ser valorados economicamente e expressos pelos danos $D(t)$ (Figura 4.5).

Figura 4.5: Estrutura geral da tomada de decisão de abatimento de emissões de GEE sob incertezas em um momento k , e as suas consequências.

O indicador usual de mudança climática escolhido é a elevação de temperatura média superficial global, ΔT , mas poderia ser qualquer outro indicador adequado à situação em análise, por exemplo, a elevação média do nível do mar ou o nível de precipitação média (Figura 4.5).

4.3.2 Alternativas de Decisões Seqüenciais

A Figura 4.6 ilustra uma situação hipotética com duas árvores de decisão representando as opções de abatimento em dois momentos de decisão sucessivos. No exemplo, existem quatro opções de abatimento em cada árvore. Estas opções podem ser expressas como valores absolutos de reduções de emissões, por exemplo, em toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano, ou em termos percentuais de um valor de referência, que pode ser fixo ou móvel. O Protocolo de Quioto fixou a meta de se reduzir até 2012, no mínimo um total de 5,2% das emissões que existiam em 1990. Mas pode-se, em princípio, estabelecer metas tais como reduzir em cada ano 5% das emissões do ano anterior, (referência móvel), ou em 10% relativamente à data do momento de decisão, e assim por diante.

Figura 4.6: Duas Árvores de Decisão para um conjunto finito de opções de abatimento de emissões, $A(k,i)$, e $A(k+1,j)$, em dois momentos de decisão sucessivos, k e $k+1$. No exemplo, temos 4 opções de abatimento em cada momento, mas ao longo do tempo as opções e o seu número podem variar.

Denotaremos formalmente uma política climática seqüencial desde o primeiro momento de decisão $k=1$, até um momento de decisão $k>1$, pela n -upla ordenada $\langle A(1, i_1), A(2, i_2), \dots, A(k, i_k) \rangle^1$, onde o índice i_k denota a opção de abatimento que existe no momento k . E denotaremos por $A(k, 0)$ a opção de no momento k , não se fazer abatimento algum, isto é $A(k, 0) = 0$. Esta opção levará a uma trajetória de emissões usualmente chamada de Linha de Base. As trajetórias de emissões da Linha de Base são também usualmente denominadas de trajetória ou cenário “Business as Usual” (BAU), e depende do ponto de origem temporal para seu cálculo.

Como exemplos ilustrativos, consideremos: a) o caso em que o tomador de decisão em cinco momentos de decisão sucessivos separados por tempos $hp(k) = 10$ anos, escolhe não fazer absolutamente nada para controlar as emissões. Nesse caso, a seqüência de abatimentos seria denotada por $\langle A(1, 0), A(2, 0), A(3, 0), A(4, 0), A(5, 0) \rangle = \langle 0, 0, 0, 0, 0 \rangle$; b) o decisor começa por nada fazer e sem seguida, abate as emissões com um incremento de 1% a cada decisão, relativamente a uma referência definida previamente, também em cinco períodos de abatimento. Podemos representar essa seqüência como:

$$\langle A(1, 0\%), A(2, 1\%), A(3, 2\%), A(4, 3\%), A(5, 4\%) \rangle = \langle 0\%, 1\%, 2\%, 3\%, 4\% \rangle.$$

Esta notação somente indica as decisões tomadas ou a tomar, mas não o conjunto de opções de cada momento k . Estas opções estão indicadas na árvore de decisão.

¹ Usaremos alternativamente as notações $A_{ij}(k)$ e $A_i(K, j)$ para as taxas de abatimento de emissões.

As opções na árvore de decisão não precisam ser somente cotas de redução de emissões como no Protocolo de Quioto. Pode-se considerar também opções que difiram qualitativamente uma das outras. Por exemplo, uma das opções pode ser “estabilizar as concentrações atmosféricas de GEE nos níveis de 2010 até o ano 2060”. Uma outra possibilidade poderia ser a remoção de carbono da atmosfera por sumidouros de uma certa quantidade pré-fixada. Neste trabalho, por simplicidade, somente consideraremos metas de redução de emissões por cotas, como aquelas do Protocolo de Quioto.

Os custos de abatimento geralmente são definidos como a diferença entre os custos no cenário da linha de base, que é uma referência, e os cenários políticos onde as emissões de carbono estão limitadas. Para simplificar os cálculos sem perder a estrutura do problema, adotaremos como referência o custo zero para a política BAU.

4.3.3 Representação dos Possíveis Estados do Sistema do Clima

Como foi indicado no DI da Figura 4.4, a magnitude da mudança climática estabelecida em termos de mudanças na temperatura média superficial global, ΔT , é representada por um nó de valor e depende da ação de abatimento, e do estado da natureza concernente à resposta do Sistema do Clima às emissões de GEE.

O Sistema do Clima é extremamente complexo, e para fins políticos deve-se buscar os fenômenos e variáveis que possam ter importantes repercussões sobre as decisões de abatimento. Duas variáveis serão usadas aqui para sumarizar a incerteza sobre as respostas do Sistema do Clima aos abatimentos de emissões: a Sensibilidade Climática, SC, e a Difusividade Oceânica, DO. A sensibilidade climática representa a resposta do sistema da atmosfera ao forçamento radiativo assumindo que esse sistema esteja em equilíbrio com o

Oceano Ela é uma medida da variação da temperatura por variação da concentração de GEE na atmosfera, se o sistema do clima estivesse em equilíbrio térmico com o Oceano (Ver Capítulo 1 para detalhes).

Assumiremos que as quantidades incertas da sensibilidade climática e difusividade oceânica podem assumir um número finito de valores, que nós definimos como segue. Segundo os três últimos relatórios do IPCC, (HOUGHTON ET TAL, 1992; HOUGHTON ET TAL 1996; WATSON, 2001), a sensibilidade climática é um valor dentro do intervalo $1,5^{\circ}\text{C} - 4,5^{\circ}\text{C}$. A difusividade oceânica, segundo vários estudos, é um valor que está no intervalo 20 – 140 anos (SOKOLOV; STONE, 2001). Para fins de análise política é interessante expressar esses parâmetros em termos qualitativos. Para isto, dividimos os intervalos da SC em três categorias: SC baixa, de $1,5^{\circ}\text{C}$ a $2,5^{\circ}\text{C}$, SC Média, de $2,5^{\circ}\text{C}$ a $3,5^{\circ}\text{C}$ e SC Alta, de $3,5^{\circ}\text{C}$ a $4,5^{\circ}\text{C}$ e um valor representativo para cada sub-intervalo: $2,0^{\circ}\text{C}$, $3,0^{\circ}\text{C}$ e $4,0^{\circ}\text{C}$, respectivamente (Tabela 4.1). É possível refinar essa divisão, introduzindo,

Sensibilidade Climática ($^{\circ}\text{C}$)		Difusividade Oceânica (anos^{-1})	
BAIXA	2,0	DO(1)	1/40
MÉDIA	3,0	DO(2)	1/80
ALTA	4,0	DO(3)	1/120
		DO(4)	1/140

Tabela 4.1: Categorias definidas para a Sensibilidade Climática e a Difusividade Oceânica em termos de valores representativos dentro dos intervalos de confiança de cada parâmetro.

por exemplo, subcategorias como Média Baixa e Média Alta. Ou ainda dividir o intervalo da SC em vários pequenos sub-intervalos, por exemplo, de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ cada um e definindo o valor central como representativo. Como veremos essa divisão acarreta custo computacional, e é questionável o que se ganha dividindo em muitas partes esses intervalos, considerando que a finalidade da análise é informar a políticos, cientistas e não-especialistas as possíveis conseqüências das decisões dos políticos de uma forma que lhes seja transparente. A mesma observação vale para a difusividade oceânica. Dividimos a DO em quatro valores possíveis que têm significado informativo para o tomador de decisões: 40, 80, 120 e 140 anos (Tabela 4.1). Outros valores podem ser escolhidos, se for conveniente para a análise.

Figure 4.7. Estrutura de Dados para o nó de valor da elevação da temperatura realizada $\Delta T(HP(k))$, calculada para $HP(k)$ anos à frente do momento de decisão k .

Os possíveis estados do sistema do clima, expressos em termos de elevações realizadas de temperatura, podem ser representados por um diagrama de influências, onde para cada par $SC(k)$ e $DO(k)$ podemos calcular o valor de ΔT , para qualquer ano t à frente de k , tal que. Mais exatamente, é possível, mediante um modelo climático, $\Delta T M$, obter a trajetória de elevação de temperatura desde o momento k até o momento $k+HP(k)$. Esses fatos estão expressos no diagrama de influência da Figura 4.7 para o caso da elevação da temperatura no momento $k+HP(k)$. Como estamos ilustrando a metodologia com três possibilidades para a SC e quatro para a DO , teremos doze estados climáticos possíveis e conseqüentemente o mesmo número de trajetórias de elevação da temperatura no horizonte $HP(k)$ (Figura 4.8).

Figura 4.8: Ilustração da projeção de 12 estados climáticos correspondentes a valores da SC e da DO no diagrama de estados da Figura 4.7. No exemplo, os estados são as elevações de temperatura de equilíbrio, $k = 1990$, $HP(1990) = 120$ anos (Gráfico gerado no Proclín V 1.0)

As projeções dos doze estados climáticos devem ser calculadas para cada opção de política de abatimento presentes na árvore de decisão do político no momento k , como ilustrada na Figura 4.6. No exemplo daquela figura temos quatro opções a serem analisadas, e portanto o decisor deve computar 48 projeções de elevações de temperaturas assumindo um horizonte de antecipação $HP(k)$. Em geral, se a árvore de decisões tem n opções de abatimento, $n=1,2,3,\dots$, o decisor deverá analisar, para o diagrama da Figura 4.7, $12n$ trajetórias de aquecimento dentro do horizonte de planejamento escolhido. Aqui fica claro que se dividirmos o intervalo da SC em um número p de partes, $p=1,2,3,\dots$, e o intervalo da DO em um número q de partes, $q=1,2,3,4,\dots$, tomando os valores centrais desses intervalos como representativos de cada intervalo, teremos pq estados climáticos possíveis, e com n políticas a examinar teríamos npq trajetórias de aquecimento. Sem dúvida dependendo dos valores de p , q e n , podemos chegar rapidamente a um carga computacional grande, anulando a conveniência de se representar de forma simples e clara a estrutura de decisões para abater emissões. Entretanto fazendo escolhas adequadas desses números podemos obter bastante clareza sobre o que realmente importa no problema de abater emissões de GEE, como mostraremos adiante.

A fim de que o tomador de decisões possa especificar numericamente a estrutura de dados correspondente aos nós de valor ΔT , ele deve utilizar um modelo climático $_{\Delta T}M$ que inclua os parâmetros SC e DO, e o valor ΔT de saída deste modelo dependerá destes parâmetros. Simbolicamente denotamos essa relação por $_{\Delta T}M = _{\Delta T}M(SC, DO)$. Para cada um dos 12 estados da natureza possíveis acima definidos, isto é para cada par (SC, DO), o

modelo produzirá 12 projeções da mudança de temperatura média superficial global, para uma época $k \leq t \leq k + HP(k)$ escolhida pelo decisor (Figura 4.8).

4.3.4 Custos de Abatimento Seqüencial

A decisão de redução de emissões de GEE implica um custo de abatimento, representado por um nó de valor na Figura 4.5, que depende de vários fatores econômicos e tecnológicos, e até culturais, que indicamos no nó de acaso “Potenciais Econômicos e Tecnológicos” (WATSON, 2001). Evidentemente, estes fatores não estão sob o controle completo de um governo ou de qualquer instituição ou grupo de indivíduos. O tomador de decisões deve, para obter valores numéricos dos custos de abatimento em um horizonte de planejamento $hp(k)$, usar um modelo C_M que calcule esses custos. Por exemplo, C_M pode ser um modelo econômico de equilíbrio geral computável, que calcula os custos de equilíbrio para cada política de abatimento analisada, tendo em vista o mercado da produção e consumo de energia. Entretanto, deve-se reconhecer que os custos reais dependem de vários fatores que tornam a sua previsão impossível (GRUBB ET TAL, 1993; SAVIOTTI, 1996).

No Capítulo 3 mostramos que é possível sintetizar a complexidade por traz da análise dos custos de abatimento supondo que eles são definidos por uma Função Custo de Abatimento, (Equação 3.30). Uma vez assumindo esta hipótese, podemos introduzir o elemento de incerteza no coeficiente b_i daquela função. No contexto do capítulo atual denominaremos este coeficiente pelo nome BETA.

Analogamente ao caso da sensibilidade climática e inércia térmica do oceano podemos categorizar os custos qualitativamente. Por exemplo, podemos dividir o intervalo de valores plausíveis de BETA, $Beta_e \leq BETA \leq Beta_d$, fornecido por especialistas, em três categorias: custos Baixos, Médios e Altos (Figura 4.9). A partir disso, podemos

Figura 4.9: Exemplo de estrutura de dados para o cálculo dos custos de abatimento no momento de decisão k , para um abatimento durante o período $hp(k)$. Os parâmetros $Beta(k,i)$ são indicadores dos custos de abatimento de emissões. Ver Capítulo 3, Seção 3.5.

selecionar, para cada intervalo ou categoria de BETA, um valor representativo, por exemplo, o valor central de cada sub-intervalo, e construir um diagrama de influência como o da Figura 4.8, atribuindo probabilidades a cada ramo. Notemos que os ramos referem-se a possibilidades de custos. Assim, cada opção política de reduções de emissões poderá implicar, em princípio, qualquer um dos três valores do DI. Se a árvore de decisões no momento k tem, por exemplo, quatro opções, então teremos $4 \times 3 = 12$ possibilidades de custos (Figura 4.10).

Figura 4.10: Árvore de decisão das opções políticas do exemplo da Figura 4.5, acoplada ao diagrama de influência do coeficiente BETA dos custos de abatimento da Figura 4.9. Para cada opção $A(k,i)$ existem três possibilidades de custos (Baixo, Médio e Alto) representados pelos valores $BETA(K,j)$. $i = 1,2,3,4$, $j=1,2,3$.

Esta é uma das estruturas de dados fundamentais na análise de decisão de abatimento de emissões. Com ela pode-se calcular todos os custos possíveis, com suas respectivas probabilidades. Se as ações estiverem ordenadas na árvore por ordem decrescente, desde o ramo mais alto para o mais baixo, então os custos de abatimento também estarão assim ordenados, já que a Função Custo é monótona crescente (Ver Capítulo 3, Seção 3.5). Notemos que temos no diagrama da Figura 4.7, quatro grupos de valores finais de custos, distintos entre si, mas equiprováveis. Isso advém do fato de que o antecedente aos nós de acaso no DI dessa figura é um nó de decisão com quatro opções. Esse padrão se mantém para números maiores de opções de decisão.

4.3.5 Os Impactos Climáticos

O aquecimento produzirá mudanças climáticas, tais como mudança no regime de chuvas e elevação do nível médio do mar às quais em interação com o grau de vulnerabilidade dos ecossistemas e economias, acarretarão impactos climáticos ao longo do tempo subsequente à decisão de abatimento. Devido à inércia do sistema do clima, esses impactos podem se estender por várias décadas ou séculos (Ver Capítulo 1). A vulnerabilidade dos sistemas ecológicos e econômicos dependem de inúmeros fatores, muitos deles fora de controle do decisor e por isso ela é representada por um nó de acaso. Esses impactos produzem danos que em princípio podem ser valorados economicamente, e por isso são representados por um nó de valor e são calculados dentro do horizonte de antecipação, $HP(k)$.

Analogamente à representação que fizemos para os estados climáticos e os custos de abatimento, sintetizaremos a vulnerabilidade do sistema econômico através do coeficiente α_i da Função Dano Climático, Equação 3.19, como um indicador de vulnerabilidade, que será aqui denominado ALFA. Para ilustrar o método, atribuiremos cinco categorias à vulnerabilidade: Baixa, Média Baixa, Média, Média Alta e Alta. Em cada momento de decisão existe um diagrama de influência do nó de acaso “Vulnerabilidade” conforme a Figura 4.11.

Figura 4.11: Um exemplo de estrutura de dados dos impactos relacionados às mudanças climáticas, calculados no momento k para o horizonte de antecipação $HP(k)$.

Para cada categoria, ou ramo no DI dos danos, atribuímos probabilidades baseadas em avaliações de especialistas. Para uma avaliação dos valores possíveis na Função Dano, nos baseamos em (ROUGHGARDEN; SCHNEIDER, 1999; HORDHAUS; BOYER, 1999).

O DI da Figura 4.5, nos mostra que os nós de valor dos danos na Figura 4.11 dependem do nó de valor da elevação da temperatura e do nó de acaso da vulnerabilidade. Por outro lado, o DI da Figura 4.5 indica que o nó de valor dos danos depende também da decisão de abatimento. Podemos construir um diagrama que indique todos os elos da cadeia causal, desde a decisão até os danos climáticos. Dessa forma fica claro uma parte importante da cascata de incertezas sob a qual o tomador de decisões deve escolher sua política de mitigação (Figura 4.12).

Figura 4.12: Representação parcial do Diagrama de Influências do problema de decisão de abatimento, na parte que se refere aos danos climáticos. No exemplo existe um total de 240 estados de danos climáticos. É visualmente clara a conexão entre as opções de abatimento e as incertezas sobre a resposta do clima às emissões e a vulnerabilidade dos sistemas às mudanças de clima. Percebe-se também o sentido da propagação das probabilidades de um nó de acaso a outro.

Este diagrama juntamente com a regra da cadeia, Equação 4.2, nos permite fazer os cálculos das probabilidades conjuntas para cada possibilidade de impacto ou dano. Seguindo cada ramo, desde uma decisão específica, até uma extremidade teremos a probabilidade daquele estado de dano econômico. A partir da Equação 4.2 podemos escrever que esta probabilidade é dada por:

$$\Pr(D_l) = \Pr SC_m \cdot \Pr DO_n \cdot \Pr \alpha_o \quad (4.5)$$

onde os índices referem-se a $o = \text{Baixa, Média Baixa, Média, Média Alta, Alta}$, $n = \text{DO}(1), \text{DO}(2), \text{DO}(3), \text{DO}(4)$ e $m = \text{Baixa, Média, Alta}$, e $l = (m,n,o)$. Por exemplo, a probabilidade de um dano, dada a sensibilidade climática Baixa, inércia térmica do Oceano de 120 anos, isto é $OD = \text{OD}(3)$, e vulnerabilidade Alta, será:

$$\text{PrD}_{(\text{Baixa}, \text{DO}(3), \text{Alta})} = \text{PrSc}_{\text{Baixa}} \cdot \text{PrDO}(3) \cdot \text{Pr}\alpha_{\text{Alta}} \quad (4.6)$$

Notemos que não é necessário, para calcular as probabilidades conjuntas levar em conta a opção de abatimento. Vale o mesmo comentário feito para os danos e estados climáticos. A estrutura estatística do diagrama da Figura 4.12 contém grupos de estados finais equiprováveis. Os elementos de cada grupo se diferenciarão pelos valores concretos dos danos. Isso ocorre por causa da discretização que fizemos. Estes valores dependem da opção de abatimento. Apesar disso, na hora de calcular os valores esperados haverá diferenças.

Existem para cada decisão do diagrama da Figura 4.12, doze estados do clima, com probabilidades conjuntas em princípio distintas entre si, podendo eventualmente haverem algumas iguais, dadas coincidências de valores que levem a um mesmo valor do produto das probabilidades da SC, DO e ALFA. Para uma outra decisão teremos valores distintos de elevação de temperatura, mas com uma distribuição de probabilidades igual à anterior. Para duas decisões A1 e A2, teremos duas elevações de temperaturas distintas caracterizadas por um mesmo par SC, DO e, portanto com a mesma probabilidade conjunta.

4.3.6 Perda Social Total

Os custos de abatimento durante o período de abatimento, $[k, k + hp(k)]$, somados aos danos climáticos durante o período $[k, k + HP(k)]$ perfazem a Perda Social Total, representada por um nó de valor, que é a consequência final, valorada economicamente, da decisão de abatimento no momento k . Como os custos e os danos são medidos em termos de porcentagem do Produto Interno Bruto, então a perda social total poderá ser medida em termos de porcentagem do PIB mundial.

Representaremos sinteticamente por D_k , os danos climáticos $D(k + HP(k))$, calculados no momento k e com um horizonte de antecipação $HP(k)$, e por C_k os custos de abatimento $C(k + hp(k))$, calculados no momento k e com um horizonte de planejamento $hp(k)$. A perda global $P(hp(k), HP(k))$, será denotada sinteticamente por D_k e teremos:

$$P(hp(k), HP(k)) = C(hp(k)) + D(HP(k)) = C_k + D_k \quad (4.7)$$

ou, sinteticamente,

$$P_k = C_k + D_k \quad (4.8)$$

Se levarmos em conta que a política de redução de emissões será realizada ao longo do período $[k, k + hp(k)]$, e que os danos ocorrerão no período $[k, k + HP(k)]$, então:

$$P_k = \sum_{i=k}^{hp(k)} C_{ki} + \sum_{j=k}^{HP(k)} D_{kj} \quad (4.9)$$

Na Figura 4.13 podemos apreciar a cascata de incertezas a partir da decisão até as perdas sociais totais.

Figura 4.13: Diagrama de influência completo do problema de escolha de uma política de abatimento de emissões, em um momento k . A cada opção de abatimento, geram-se custos de abatimento no horizonte $hp(k)$ e estados climáticos, que geram danos climáticos no horizonte de antecipação $HP(k)$. As probabilidades se propagam tanto no sentido dos custos como no dos danos, gerando probabilidades conjuntas para cada um dos estados finais da perda social total. Na árvore de decisão duplicamos uma dos ramos de uma opção de abatimento por conveniência gráfica, para podermos representar todos os ramos na mesma figura.

4.3.7 A decisão de Abatimento sob Incerteza

O tomador de decisões é um agente racional, isto é, ele busca a melhor opção de abatimento em termos de custos e benefícios. A estratégia básica é tomar a decisão que minimize, dentro dos horizontes de tempo adequados, as perdas sociais totais esperadas.

O algoritmo de decisão é então o seguinte: para cada opção política $A(k,j)$ de abatimento, projeta-se a perda total desde o momento presente k , até a data futura $k+HP(k)$ percorrendo cada ramo completo do DI. Gera-se um conjunto de perdas sociais finais, cada uma com uma probabilidade conjunta. Calcula-se o valor esperado, como definido em estatística básica, gerando um conjunto de perdas esperadas, uma para cada ação de abatimento, e por fim escolhe-se a menor dentre as perdas.

Se o agente conhece antecipadamente quais serão os momentos de decisão $k+1$, $k+2$, etc, dentro de seu horizonte $HP(k)$ e qual são as árvores de decisão em cada um desses momentos, a maneira geral de realizar as projeções e comparações é considerar a sequência futura de todos os outros momentos de decisão, com as respectivas opções ou árvore de decisões em uma única árvore de decisão. Para o caso do número de opções de abatimento permanecer constante e igual a n , e termos p momentos de decisão dentro do HP , então a árvore de decisão completa teria n^p ramos (Figura 4.14).

Figura 4.14: Exemplo de uma Árvore de Decisão para o caso em que o agente analisa todas as seqüências possíveis de opções desde o momento k , até o momento $k+HP(k)$. No exemplo $HP(k) = 3k$ e a árvore total tem $4^3 = 64$ ramos. Para horizontes de tempo mais longos e árvores com mais opções políticas o número de ramos se prolifera rapidamente.

Por simplicidade consideraremos agentes que embora projetem trajetórias de mudanças climáticas de k até $k+HP(k)$, não considerarão antecipadamente árvores de decisão futuras. Assim, o tomador de decisões faz a análise das conseqüências de suas decisões dentro do horizonte de antecipação $HP(k)$, somente para as opções disponíveis em k . Entretanto, em cada momento de decisão, pode haver uma árvore de decisão distinta das anteriores (Figura 4.15).

Figura 4.15: Caso em que a análise das opções de abatimento somente leva em conta o momento presente k , e as suas conseqüências futuras dentro do horizonte de antecipação $HP(k)$, sem considerar as futuras opções de forma explícita.

4.4 Representando as Incertezas com Distribuições de Probabilidades Discretas

4.4.1 Distribuições Discretas

Podemos atribuir uma probabilidade de ocorrência a cada resposta possível de equilíbrio, e a cada resposta possível do Oceano, e admitindo que a SC e a DO são probabilisticamente independentes teremos, no exemplo do DI considerado acima, três valores de probabilidade para a sensibilidade climática $pr(SC = Baixa)$, $pr(SC = Média)$, $pr(SC = Alta)$, tais que $pr(SC = Baixa) + pr(SC = Média) + pr(SC = Alta) = 1$. E, analogamente, para a difusividade oceânica temos quatro probabilidades, uma para cada inércia térmica possível, tais que $pr(DO = 1/40) + pr(DO = 1/80) + pr(DO = 1/120) + pr(DO = 1/160) = 1$.

Para cada ação de abatimento e cada estado possível do clima em uma data $k \leq t \leq k + HP(k)$, representado pelos nós de valores no DI da Figura 4.5, temos uma probabilidade conjunta de ocorrência, que pela regra da cadeia, Equação 4.3, será dada por:

$$\text{pr}(\Delta T(SC, DO) | A(k, i_k)) = \text{pr}(SC) \cdot \text{pr}(DO) \quad (4.10)$$

Isto é, a probabilidade de um estado climático gerado pelo par de antecedentes $\text{ant}(SC, DO | A(k, j))$, que corresponde a percorrermos um ramo completo do DI da Figura 4.5, desde do nó raiz da SC até o nó de valor do estado correspondente, é igual à probabilidade conjunta desses parâmetros. Vejamos um exemplo concreto para ilustrar o método.

No trabalho de (VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN, 1998), seguindo o procedimento de (NORDHAUS, 1994), consultaram-se especialistas, e fizeram uma distribuição de probabilidades subjetivas específica como segue: a cada SC “Baixa” e “Alta”, foram atribuídas as probabilidades 0,2 e à Média foi atribuída a probabilidade 0,6. Para a Difusividade Oceânica, às DO(2) e DO(3) foram atribuídas as probabilidades de 0,6 e 0,199, respectivamente; para a DO(1) e DO(4) foram atribuídas probabilidades de 0,2 e 0.001, respectivamente (Figura 4.16).

Notemos que as distribuições de probabilidades de SC e DO, definem as probabilidades dos estados climáticos ΔT , independentemente dos valores desses estados. O diagrama de influência com uma distribuição de probabilidades fixa de uma vez por todas a estrutura estatística do problema de decisão, independentemente dos valores concretos dos estados do clima e a distribuição desses valores de ΔT dependerão do modelo climático utilizado.

Figura 4.16: Distribuição de probabilidades de (VALVERDE; JACOBY, 1996). Notemos que a soma das probabilidades de SC e de DO, bem como as probabilidades conjuntas para todos os estados climáticos, somam a unidade, como deve ser pela Equação 4.4.

Além dessas probabilidades os autores, baseados também na opinião de especialistas, atribuíram probabilidades a três valores para o coeficiente de vulnerabilidade ALFA considerando dois cenários de aquecimento: baixo e alto. Eles não consideraram incertezas para os custos de abatimento. A partir desta estrutura de dados buscaram a política ótima para dois períodos de tempo consecutivos onde as incertezas se resolviam completamente no segundo período (VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN, 1998).

As distribuições usadas por (VALVERDE; JACOBY; KAUFMAN, 1998) tiveram a finalidade de ilustrar o método numericamente e orientar pesquisa ulterior com o modelo do MIT por eles usado. No Capítulo 1 descrevemos a representação de parâmetros incertos por distribuições de probabilidades contínuas do tipo Beta. Para podermos aplicar a metodologia dos diagramas de influência exposta acima, precisamos transformar as

distribuições contínuas em distribuições discretas. Uma maneira simples de fazer estas transformações é atribuir a probabilidade de um parâmetro estar em um sub-intervalo a um valor representativo daquele intervalo. Assim, Por isso, para o propósito deste trabalho, suporemos que, em cada momento de decisão k , existem distribuições de probabilidades discretas associadas a cada uma das categorias da SC, da DO, do parâmetro BETA dos custos e do parâmetro ALFA dos danos climáticos.

Em cada momento k , o tomador de decisões tem a sua disposição quatro distribuições de probabilidades discretas fornecidas a ele por especialistas. Estas distribuições estão associadas aos nós de acaso da sensibilidade climática, $Dist_{SC}(k)$, difusividade oceânica, $Dist_{DO}(k)$, custos de Abatimento, $Dist_C(k)$ e vulnerabilidade da economia, $Dist_D(k)$. Essas distribuições são os graus de crença associados à ocorrência de cada categoria das variáveis aleatórias em questão (Figuras 4.17).

Figura 4.17: Exemplos ilustrativos de distribuições discretas de probabilidades em um momento k , atribuídas à Sensibilidade Climática e aos danos climáticos. As distribuições discretas são derivadas de distribuições Beta contínuas de forma simples: atribuímos a probabilidade de um parâmetro estar em um intervalo de uma categoria, por ex. Baixa, a um valor representativo, por exemplo, o valor central do sub-intervalo da categoria

4.4.2 Valores Esperados e Variâncias

As distribuições de probabilidade definem de forma unívoca os valores esperados e a variância de cada variável aleatória. Dessa forma é possível calcular em cada momento k , os valores médios $\overline{SC}$, $\overline{DO}$, $\overline{BETA}$, $\overline{ALFA}$ dos quatro parâmetros acima e de todas as grandezas derivadas deles nos modelos do clima, de custos e de danos.

De maneira geral, se X é uma variável aleatória discreta que pode assumir um conjunto de valores $\{X_n\}$, e $\text{Distr}(X) = \{\text{Pr}_n(X_n)\}$ é uma distribuição discreta de probabilidades sobre os valores possíveis de X , então, o valor médio ou esperado de X , denotado por $\overline{X}$, é definido como:

$$\overline{X} = \sum_n \text{Pr}_n \cdot X_n \quad (4.11)$$

onde $\text{Pr}_n = \text{Pr}_n(X_n)$ é a probabilidade de X assumir o valor X . Para cada variável de acaso do diagrama de influência da Figura 4.5, está associada uma distribuição discreta de probabilidades. Um agente pode, então, calcular para cada momento k , uma projeção do valor esperado, desde k até $k+hp(k)$ e até $k+HP(k)$. A variância do conjunto de valores da variável X pode ser calculada pela expressão:

$$\text{Var}(X) = \text{Var}(X) = \overline{X^2} - \overline{X}^2 \quad (4.12)$$

Estes valores podem ser calculados para cada grandeza no interior dos modelos de uma Metodologia Φ . Em geral será este o procedimento que os agentes modelados neste trabalho realizarão (Figura 4.18).

Figura 4.18: Estrutura geral da tomada de decisão de abatimento de emissões de GEE sob incertezas, em um momento k , e as suas consequências, juntamente com as distribuições de probabilidades subjetivas discretas dos parâmetros relevantes. A partir dessas distribuições os agentes tomadores de decisões podem calcular os valores esperados e as variâncias de cada grandeza de seu modelo.

4.11 Conclusão

O modelo apresentado neste capítulo exhibe as variáveis-chaves do processo de decisão sob incerteza de abatimento de emissões de GEE, e foram caracterizadas e representadas em termos que são familiares aos cientistas que trabalham em cada campo de estudo.

Essa formulação permite expor de forma integrada e simples os principais elementos da tomada de decisão, indicando tanto a cientistas, quanto a economistas e políticos, as relações mútuas entre os estados possíveis do sistema do clima, os valores das variáveis-chaves, e os impactos das decisões sobre o clima e a economia.

Além disso, com uma representação das incertezas por meio de distribuições de probabilidades, pode-se analisar vários cenários de resolução destas incertezas, e avaliar o impacto dessas evoluções sobre o nível de abatimento das emissões.

Para completar o modelo e análise que buscamos fazer neste trabalho, se faz necessário especificar claramente o método de decisão do agente. Qual é o critério de escolha do agente? Estamos assumindo que basicamente ele realiza uma análise custo-benefício, mas existem outras possibilidades ainda não exploradas na literatura de mudanças climáticas (Ver Capítulo 5).

Aqui supusemos também um tomador de decisão individual global isolado. Na realidade temos muitos governos negociando distribuições de cotas de reduções de emissões para determinados períodos. No Capítulo 6 estendemos a análise feita aqui para considerar que cada governo leva em conta as decisões dos outros países quando vão decidir o quanto abater de suas emissões.

Capítulo 5

Crítérios de Decisão Sob Incerteza e Impactos Climáticos Perigosos

5.1 Introdução

Nos Capítulos 2, 3 e 4, desenvolvemos um modelo de agentes governamentais denotados por P_i , $i = 1, 2, 3, \dots, N$, que estão diante da decisão de abater emissões de GEE. Cada um tem um modelo de análise integrada $MAI_i(k)$ com o qual fazem projeções futuras sobre o aquecimento global, que lhes permite projetar os danos climáticos regionais, além de calcularem os custos de abatimento de qualquer ação de abatimento $\mu_i(k, j)$ ¹, $j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$, onde k é o momento de decisão. Os agentes fazem tais projeções usando dois horizontes de tempo, o horizonte de antecipação $HP_i(k)$ e o de planejamento $hp_i(k)$. Eles usam diagramas de influência e árvores de decisões para calcularem os valores esperados das grandezas relevantes, a partir de distribuição de probabilidades.

Naqueles capítulos descrevemos também um modelo de uma Metodologia $\Phi_i(k)$ com a qual cada agente escolhe ações de abatimento, que inclui um critério de decisão $\Psi_i(k)$. O critério de decisão básico é a análise custo-benefício. Este critério afirma que uma ação de abatimento é aceitável se, e somente se os danos evitados (benefícios) pela ação superam os custos de abatimento dessa ação. Entretanto, existem vários outros critérios de decisão sob incerteza e nos capítulos anteriores não aprofundamos este tópico. É importante considerar estas alternativas para nos ajudar a compreender as possíveis fontes de divergências entre os tomadores de decisões nas negociações internacionais e para

¹ Usaremos alternativamente a notação $\mu_{ij}(k)$ ou $\mu_i(k, j)$ para denotar uma opção de abatimento.

abrirmos possibilidades de modelagem do processo dessas negociações levando em conta a heterogeneidade dos agentes também quanto aos critérios de decisão adotados.

No presente capítulo descreveremos alguns desses critérios, além da análise custo-benefício, e mostraremos que a decisão final de um agente depende sensivelmente do critério utilizado para fazer suas escolhas e das crenças que ele tem sobre os estados climáticos expressas nas distribuições de probabilidades destes estados. Na Seção final do capítulo, construiremos um modelo de critério de decisão apoiado sobre uma interpretação simples do Artigo 2 da Convenção Quadro, que se refere à “interferência antrópica perigosa no sistema do clima”. Para isto imaginaremos uma situação simples de um tomador de decisões global, considerando somente dois estados possíveis do clima, e duas possibilidades quanto à eficácia das suas políticas de abatimento de emissões. Analisaremos os efeitos de duas distribuições de probabilidades juntamente com alguns critérios de decisão sob incerteza e compararemos os resultados das decisões resultantes.

Com exceção da última Seção, seguimos de perto o trabalho de (BRETTEVILLE, 1999; AAHEIN; BRETTEVILLE, 2001) adaptando o seu tratamento aos modelos dos agentes dos capítulos anteriores, e preparando a discussão para o Capítulo 6 sobre as negociações internacionais sobre cotas de abatimento. O modelo simples de tomada de decisão em face de danos climáticos perigosos exposto no final do capítulo procura explicitar de forma estilizada a estrutura do problema das mudanças climáticas. Buscamos uma forma de exposição transparente que possa ser usada para comunicar a cientistas e políticos, bem como ao não especialista com uma razoável formação em ciências, a influência das visões sobre o problema das mudanças climáticas, na solução do mesmo. O modelo permite formar uma base de discussão sobre o importante tópico da interpretação e

implementação política do Artigo 2 da Convenção e pode ser aprimorado para modelagens mais sofisticadas do Regime da Convenção e de tomada de decisão de governos.

5.2 Os Riscos de Agir e Não-Agir

O debate sobre o aquecimento global tem mostrado que existem dois principais riscos envolvidos. O primeiro é o risco de impactos humanos significativos em ecossistemas a partir de mudanças climáticas em larga escala no século atual. Esse é um problema ambiental de dimensões potencialmente imensas.

O segundo risco é aquele de incorrer em grandes custos econômicos agora, em políticas que possam tornar o aquecimento mais lento ou mitigar seus impactos, quando existem consideráveis incertezas sobre a eficácia das políticas tanto quanto sobre a severidade do problema. O debate tem sido sobre evidências científicas, mas a questão fundamental é sobre qual dos dois riscos é percebido como a maior ameaça (BRETTEVILLE, 1999). Os defensores da tese de que o primeiro risco é o maior, argumentam que por causa das incertezas se deveria abater intensamente as emissões dos GEE agora, a fim de reduzir a possibilidade de danos extensos e severos. Por referência ao Princípio da Precaução eles vêem o abatimento de emissões como um seguro contra eventos catastróficos. Seu ponto de vista é que as incertezas, ao contrário de impedirem ações firmes contra o aquecimento, fornecem os argumentos para uma disposição a pagar pela proteção às ameaças climáticas. Podemos fazer um paralelo com o seguro contra incêndios, que é considerado uma medida sábia, mesmo se não é realista esperar que uma residência ou empresa pegue fogo.

Os defensores do segundo tipo de risco, entretanto, argumentam que não se deveria impor fortes políticas de redução de emissões antes que o estado do conhecimento tenha se aperfeiçoado significativamente. Ao adiar a ação, eles argumentam, podemos aprender mais sobre os efeitos e encontrar novas tecnologias mais limpas. Enquanto aprendemos, podemos investir em projetos alternativos, que nos tornarão mais preparados para abater os GEE e se adaptar às mudanças no futuro (BRETTEVILLE, 1999).

Estas duas posições são sem dúvida extremas, mas existe um amplo espectro de posições intermediárias. Ambos os lados colocam o peso da prova sobre o outro lado e qual grupo parece ter a razão parece ser, antes de tudo, uma questão de crenças. Esse espectro de posições advém das grandes incertezas científicas sobre a intensidade das mudanças climáticas e sobre a eficácia das medidas de repostas a essas mudanças.

Se acreditarmos que as probabilidades de danos severos ou eventos catastróficos são pequenos então esperar para ver é a estratégia preferível. Se, entretanto, acreditarmos que a probabilidade desses eventos é não desprezível, a ação imediata deve ser a melhor estratégia. Isto nos leva a outra importante questão: quão pequenas são as probabilidades de danos severos ou eventos catastróficos, a fim de serem considerados desprezíveis? Esta é uma questão de muito mais difícil resposta.

5.3 O Problema do Quanto Abater Agora

A questão do quanto abater agora existe da forma como a observamos, com suas posições extremas e intermediárias acima citadas, porque estamos no início do processo de aquecimento global. A elevação de temperatura, comparada à era pré-industrial, ainda não é muito grande (0,6 oC) e existem ainda muitas incertezas sobre a evolução futura do

aquecimento global. Essa questão terá diferentes respostas em época futuras e dependerá do conhecimento científico futuro sobre as mudanças climáticas, que será derivado das observações dessas mudanças, bem como da capacidade de previsão dos modelos futuros. Podemos esperar que em um futuro distante a resposta á questão do quanto abater “agora” terá respostas muito diversas daquelas atuais.

A questão sobre o quanto abater “agora” pode ser estilizada da seguinte maneira. Seja k um momento de decisão. Designaremos por “O problema do quanto abater em k .” ao problema de escolher o quanto abater de emissões desde a data k até a data $k+hp(k)$, tendo em vista a história das respostas do clima às ações de abatimento anteriores até o momento k e as incertezas existentes em k no conhecimento das mudanças climáticas futuras, adiante do momento k . Vejamos a seguir alguns critérios de decisão sob incerteza que podem ser adotados no momento de decisão k para responder ao problema do quanto abater em k .

5.4 Os Critérios de Decisão para Saber o Quanto Abater Agora

5.4.1 Análise Custo Benefício

A primeira questão que um tomador de decisões deve estabelecer é em que condições uma decisão possível lhe é aceitável. O critério básico para aceitar uma decisão é uma comparação dos custos e dos benefícios para assegurar que o valor líquido presente (VLP) dos benefícios daquela ação seja positivo. O valor líquido presente entre as datas k e $k+HP(k)$ é definido por :

$$VLP(k) = \sum_{t=0}^{HP(k)} \left[\frac{B(t) - C(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (5.1)$$

onde $B(t)$ e $C(t)$ são os benefícios e os custos no t -ésimo ano no intervalo $[k, k+HP(k)]$, r é a taxa de desconto (Ver Apêndice sobre a Taxa de Desconto) e $HP(k)$ é o horizonte de antecipação adotado (JEPMA; MUNASINGHE, 1998). Tanto os benefícios quanto os custos são definidos como a diferença do que ocorreria com e sem a decisão sendo implementada. Os benefícios das políticas de abatimento são os danos evitados por essas políticas e os custos de não abater emissões serão tomados serem nulos.

A segunda questão que o tomador de decisões deve responder é qual decisão escolher dentre um conjunto de decisões aceitáveis. Suponhamos duas ações de abatimento $\mu_i(k,1)$ e $\mu_i(k,2)$ de um agente P_i , que levem a valores líquidos presentes $VLP_i(k,1)$ e $VLP_i(k,2)$ ambos positivos e portanto aceitáveis. Se $VLP_i(k,1) > VLP_i(k,2)$ então a ação $\mu_i(k,1)$ será a escolhida, senão a ação escolhida será $\mu_i(k,2)$. Se valer a igualdade entre os valores, o agente será indiferente quanto a que medida tomar. A análise custo-benefício (ACB) permite também ao decisor classificar um conjunto de opções, com VLP positivos, por ordem de preferência. No Apêndice A descrevemos outros critérios derivados da análise custo benefício que podem orientar um tomador de decisões sobre a melhor opção a adotar.

Se adotarmos para o cálculo dos custos de abatimento um horizonte de tempo $hp(k) < HP(k)$ então alguns termos de $C(t)$ na somatória (5.1) serão nulos. A somatória pode ser decomposta em

$$VLP = \sum_{t=0}^{hp(k)} \left[\frac{B(t) - C(t)}{(1+r)^t} \right] + \sum_{t=hp(k)+1}^{HP(k)} \left[\frac{B(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (5.2)$$

ou ainda

$$VLP = \sum_{t=0}^{HP(k)} \left[\frac{B(t)}{(1+r)^t} \right] - \sum_{t=0}^{hp(k)} \left[\frac{C(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (5.3)$$

A condição $VLP > 0$ para uma opção ser aceitável no momento k leva a:

$$\sum_{t=0}^{HP(k)} \left[\frac{B(t)}{(1+r)^t} \right] > \sum_{t=0}^{hp(k)} \left[\frac{C(t)}{(1+r)^t} \right] \quad (5.4)$$

isto é, os danos climáticos evitados totais calculados no horizonte $HP(k)$, descontados, devem ser maiores que os custos de abatimento (descontados) realizados no horizonte $hp(k)$. Neste trabalho assumiremos que a taxa de desconto r é nula (Ver Apêndice sobre Taxa de Desconto). Essa Equação contém o problema do quanto abater agora de forma implícita. Suponhamos que $hp(k)$ seja um horizonte de curto prazo, por exemplo, cinco anos, e que $HP(k)$ seja da ordem o tempo de residência do CO_2 na atmosfera (150 anos), ou ainda da inércia térmica do Oceano (80-120 anos). Então $HP(k)$ é muito maior que $hp(k)$ e a comparação entre os custos e benefícios implica em custos certos agora, para benefícios futuros muito incertos.

Suponhamos que os danos acumulados de k a $k+HP(k)$ sejam D se nenhuma ação de abatimento for realizada, e que uma ação de abatimento $\mu_i(k, j)$ reduza esses danos em um fator δ_{ij} , passando a ser $D \cdot (1 - \delta_{ij})$. Nesse caso, os benefícios são iguais a $\delta_{ij} \cdot D$. Se o custo acumulado dessa ação de abatimento é C , considerando o horizonte $hp(k)$, então, pela

ACB a ação $\mu_i(k, j)$ será aceitável se, e somente se $\delta_{ij} D > C$, ou seja $D > \frac{1}{\delta_{ij}} C$. Por

exemplo, se em um horizonte de 50 anos, a redução de danos de uma política de abatimento de cinco anos é 20% relativamente ao cenário de não intervenção, ($\delta_{ij} = 0,2$), então a condição de aceitabilidade da política é $D > 5C$.

5.4.2 Critérios de Decisão Sob Incerteza

Para simplificar a discussão, consideremos uma economia mundial com um planejador central benevolente. Os resultados obtidos neste capítulo para um único agente global podem ser ampliados sem dificuldade para um mundo com N países. O objetivo político desse planejador é, por definição, maximizar o Bem Estar futuro com os recursos disponíveis no presente. Esses recursos são escassos e podem ser utilizados para investimentos, de forma a aumentar o Bem Estar, ou podem ser usados para abater emissões de GEE, evitando perdas futuras desse Bem Estar. Devido à incerteza nos indicadores climáticos, o efeito do abatimento sobre o clima também é incerto. O abatimento pode ser interpretado parcialmente como uma forma de reduzir os danos esperados. Implicitamente nós podemos também interpretar o abatimento como um meio de mudar a distribuição de probabilidade dos danos futuros.

Simbolizemos o Bem Estar Social com uma notação funcional:

$$W = W(\mu, s) \tag{5.5}$$

O Bem Estar W é uma função do abatimento global μ , e de um parâmetro ou vetor de parâmetros, denotado por s , sobre o qual o planejador não tem nenhum controle. Esse parâmetro representa as incertezas sobre as mudanças climáticas e as incertezas sobre os efeitos de uma política de abatimento μ . Esta função Bem-Estar Social é agregada sobre os países e no tempo de uma maneira adequada. Como isto deve ser feito é uma questão controversa, que será abstraída da discussão que se segue. A partir disso, discutiremos alguns critérios de decisão $\Psi(k)$ sob incerteza que esse agente poderia adotar para escolher sua melhor ação. Uma vez escolhido um critério o agente dispõe de uma metodologia $\Phi(k)$ completa para escolher metas de redução de emissões sob uma cascata de incertezas. Estamos pressupondo aqui o ciclo de análise e decisão descrito Capítulo 2, Seções 2.5.1 e 2.5.2). Esses critérios estão baseados em (BRETTEVILLE, 1999; AAHEIN; BRETTEVILLE, 2001). Para o que se segue assumiremos implicitamente que os danos são calculados com um horizonte HP e os custo com um horizonte hp , tais que $hp \leq HP$.

5.4.2.1 Maximizando o Bem Estar Social Esperado

Este critério de decisão pode ser formulado como segue:

$$\max_{\mu} \{E_s W(\mu, s)\} \quad (5.6)$$

Esse critério diz que o planejador deveria escolher o nível de abatimento que maximiza o Bem Estar Social Esperado, $E_s W$.

Suponhamos que o agente planejador tem que escolher entre uma ação preventiva, isto é, uma ação de acordo com o Princípio da Precaução (PP) e inação (NA)². Suponhamos, além disso, que os custos de adotar o Princípio da Precaução, que denotaremos por C , incluem tanto custos políticos quanto sociais do Bem Estar diminuído, W^* . O dano possível a partir das mudanças climáticas é denotado por D e assumiremos, para fixar a discussão, que este dano é bem maior que os custos de implementar uma política de ação preventiva, sendo no mínimo três vezes o custo de implementar o Princípio de Precaução, $D > 3C$. Suponhamos também que existem três estados futuros possíveis do mundo:

- S_1 - Danos climáticos (D) severos na ausência do PP.
- S_2 - Danos climáticos insignificantes ($D = 0$) na ausência do PP.
- S_3 - Danos climáticos severos (D) na ausência do PP e o PP é ineficaz.

Se a ação de acordo com o PP for implementada e esta política se mostrar eficaz, consideraremos que o dano D é totalmente evitado. Aqui C e D são medidos em unidades de Bem Estar Social. Mantendo todos os outros fatores do problema iguais, podemos comparar o Bem Estar gerado por duas políticas em cada estado da natureza:

- $W(PP, S_1) = -C$, pois o PP evita, por hipótese, completamente os danos D e se custo é C .

² Este problema pode ser interpretado como um jogo contra a natureza, que é um jogador não estratégico.

- $W(NA, S_2) = -D$, pois sem abatimento não existem custos e os danos não são evitados.
- $W(PP, S_3) = -C - D$, pois o PP é ineficaz em evitar os danos e há ação de abatimento com custo C. (O sinal negativo indica que temos perdas de Bem Estar).

Estes resultados são mostrados em valores absolutos, na Tabela 5.1.

	Estados da Natureza		
Estratégia	S_1	S_2	S_3
PP	C	C	C + D
NA	D	0	D

Tabela 5.1: Danos e Custos para cada estado da natureza em valores absolutos. Ver texto para detalhes. (BRETTEVILLE, 1999)

Analisemos a seguir o que ocorre com o Bem Estar Esperado, no sentido estatístico, para dois casos de distribuições de probabilidades: a) Distribuição Uniforme; b) Distribuição Normal.

a) Distribuição Uniforme

Quando as probabilidades são desconhecidas, nós podemos considerar uma distribuição de probabilidades uniforme. Então todos os estados da natureza terão a mesma

probabilidade de ocorrer. Simbolicamente: $p(S_i) = 1/3$, $i = 1, 2, 3$. O Bem Estar Social Esperado de cada uma das duas políticas será:

$$EW(PP, s) = -\left(C + \frac{1}{3}D\right) \quad (5.7a)$$

$$EW(NA, s) = -\frac{2}{3}D \quad (5.7b)$$

onde s denota o conjunto de todos os estados do clima, $\{S_1, S_2, S_3\}$.

Os cálculos acima mostram que dada uma distribuição de probabilidades uniforme o critério da maximização do Bem Estar Social Esperado, esse Bem Estar será mais alto sob a ação preventiva, (PP) e o planejador escolherá o Princípio da Precaução, se, e somente se:

$$D > 3C \quad (5.8)$$

Condição que é preenchida pela hipótese assumida no início.

b) Distribuição Normal

Consideremos agora uma distribuição de probabilidades normal (em forma de sino simétrico). Em nosso exemplo isto significa que poderíamos atribuir uma pequena probabilidade ao estado S_1 , uma igualmente pequena probabilidade ao estado S_3 e uma

maior ao estado S_2 . Consideremos, por exemplo, o caso em que as probabilidades fossem $p(S_1) = p(S_3) = 1/4$ e $p(S_2) = 1/2$. Nesta situação o planejador escolheria uma política de acordo com o Princípio da Precaução somente se:

$$D > 4C \quad (5.9)$$

Dada a hipótese inicial sobre a relação entre os danos e os custos, nenhuma ação será preferida sob esta distribuição de probabilidades. A partir destes dois exemplos simples, constatamos que o resultado da escolha de um agente é muito sensível a qual estado do mundo ele atribui o maior peso. No caso acima foi colocado o maior peso sobre o caso onde os danos climáticos não ocorrem, S_2 .

Se o planejador tem razões para acreditar que o estado da natureza S_1 é mais provável de ocorrer do que os outros dois estados, a conclusão será modificada. Consideremos, por exemplo, o caso em que a probabilidade de S_1 é $2/3$, isto é, $p(S_1) = 2/3$ e as duas outras são $p(S_2) = p(S_3) = 1/6$. O Bem Estar Social será então, para cada ação:

$$EW(PP,s) = -\left(C + \frac{1}{6}D\right) \quad (5.10 a)$$

$$EW(NA,s) = -\frac{5}{6}D \quad (5.10b)$$

Esta distribuição de probabilidades também implica em selecionar o Princípio da Precaução se o dano climático na ausência desta política é suficientemente maior do que os custos de adotá-lo. Aqui, entretanto, D deve ser maior uma vez e meia o tamanho de C :

$$D > \frac{3}{2}C \quad (5.10c)$$

Assim, a restrição para escolher a ação segundo o PP é reduzida à metade comparada à restrição da distribuição de probabilidade uniforme. Isto é devido ao fato de que o peso maior foi dado ao caso em que a mudança de clima ocorrerá e a política é eficaz.

Estes cálculos simples ilustram o ponto óbvio de que as decisões de um planejador que são feitas de acordo com o critério da Maximização do Bem Estar Esperado são altamente dependentes da distribuição de probabilidades e da magnitude relativa dos custos e danos.

Em particular, consideremos a situação em que em uma certa data k , os especialistas não saibam ainda estimar os pesos relativos dos estados da natureza e por isso usam uma distribuição uniforme. Em um momento posterior $k+p$, $p > 0$, devido à análise de várias fontes de informação, acredita-se que a uma distribuição normal, como a primeira exemplificada acima, representa melhor os pesos dos estados possíveis. Esta mudança na distribuição de probabilidades implica em uma avaliação diferente por parte do planejador, levando-o a escolher uma política de abatimento diferente daquela que escolheria no momento inicial. Ao longo do tempo espera-se que o conhecimento sobre as mudanças climáticas e sobre a eficácia das políticas irá mudar e isto será refletido nas distribuições de probabilidades de parâmetros chaves da análise do problema das mudanças climáticas. Se o

tomador de decisões usar como critério $\Psi(k)$, aquele da Maximização do Bem Estar Esperado, certamente suas decisões mudarão em consonância com a evolução do conhecimento sobre o problema. Esta ilustração mostra de forma muito clara como o problema do quanto abater agora depende do grau de crenças sobre a ocorrência de certos estados no clima e de como as respostas a esta questão podem variar no tempo.

A Teoria da Utilidade Esperada é muito útil para lidar com situações onde as probabilidades e os possíveis resultados estão dentro do horizonte normal da experiência humana. O problema do clima não está dentro deste horizonte. Não temos experiência para calcular os pesos apropriados para agregar a utilidade sobre os estados. Existem, entretanto, critérios não probabilísticos que podem ser mais adequados. A seguir analisamos alguns deles.

5.4.2.2 Critério Maxmin

Este não é um critério probabilístico. O critério Maxmin afirma que se deveria maximizar o Bem Estar no pior caso possível. Essencialmente ele permite que a aversão à perda torne-se infinita. Simbolicamente este critério afirma:

$$\max_{\mu} \left\{ \min_{\mu} W(\mu, s) \right\} \quad (5.11)$$

Este é um critério muito conservador ou cauteloso e em geral levará à escolha de não abater emissões. Para ver isso, consideremos a Tabela 5.2, onde reescrevemos a Tabela 5.1 inserindo a perda máxima em cada situação possível.

	Estados da Natureza			
Estratégia	S_1	S_2	S_3	Perda Máxima
PP	C	C	C + D	C+D
NA	D	0	D	D

Tabela 5.2: A Tabela 5.1 com as perdas máximas em cada situação (política e estado da natureza). (BRETTEVILLE, 1999)

Considerando a possibilidade da ineficácia da política, o pior resultado possível é implementar a estratégia de precaução, PP, que falha completamente em evitar os danos severos (estado S_3), e neste caso a perda total será C+D. Pelo critério Maxmin, deve-se escolher a opção de menor perda dentre as piores, que neste exemplo é a perda D. Isso implica em nada fazer, NA. Entretanto se ignorarmos o estado S_3 , onde o PP é ineficaz, vemos que o critério Maxmin implica sempre em selecionar a ação de acordo com o PP. Isto é, neste caso, o pior caso seria uma perda igual a D, com a estratégia NA, contra uma perda igual a C com a estratégia PP. Lembrando que $C < D$, pelo critério Maxmin deve-se escolher a política que leva à menor perda, isto é, C, que corresponde à estratégia PP.

Assim, a menos que não exista incerteza considerando a eficácia da política, o PP não será escolhido como a estratégia apropriada neste jogo contra a natureza. Esta conclusão é, contudo dependente da crença de que a perda (-C) é negativa. Se não, isto é, se os benefícios secundários do PP superam os custos de implementação, o PP será sempre superior.

5.4.2.3 Maxmin-Maxmax Generalizado

Este critério pode ser formalizado como segue:

$$\max_{\mu} \left\{ \alpha \cdot \min_s W(\mu, s) + (1 - \alpha) \cdot \max_s W(\mu, s) \right\} \quad (5.12)$$

Este critério afirma que se deveria escolher o nível de abatimento de forma a maximizar a média ponderada do Bem Estar Social entre a melhor e a pior situação com respeito ao parâmetro incerto. O parâmetro α pode ser interpretado como refletindo a crença do planejador sobre a probabilidade de ocorrer o pior caso no futuro.

Este critério é uma simplificação do critério do Bem Estar Esperado. Nós podemos ou encontrar o pior caso e o melhor caso e em seguida lhes atribuir probabilidades subjetivas, ou nós podemos dividir todos os resultados em dois grupos: os piores resultados e os melhores resultados. Com esta perspectiva, a interpretação de α será a probabilidade de realização de qualquer um dos piores resultados.

Como exemplo, a partir das expressões que definem as perdas de PP e NA no caso analisado acima (Tabelas 5.1 e 5.2), e aplicando este critério para o caso PP, temos:

$$PP : -\alpha(C + D) + (1 - \alpha)(-C) \quad (5.13a)$$

Da mesma forma, aplicando o critério ao caso NA, temos:

$$NA : -\alpha D + (1 - \alpha).0 \quad (5.13b)$$

Simplificando estas expressões, o planejador escolherá o máximo dentre:

$$PP : -(\alpha D + C) \quad (5.13c)$$

$$NA : -\alpha D \quad (5.13d)$$

Vemos por esse critério que nenhuma ação será preferida, NA, a menos que C seja negativo ou que não existam incertezas considerando a eficácia das políticas. Neste último caso, a escolha será por PP desde que D seja tal que:

$$D > \left(\frac{1}{\alpha}\right) C \quad (5.13e)$$

que vale pela hipótese inicial $D > 3C$ se $0 < \alpha \leq \frac{1}{3}$.

5.4.2.4 Grau Limitado de Confiança

Este critério, em termos formais, é o seguinte:

$$\max_{\mu} \left\{ \gamma E_s W(\mu, s) + (1 - \gamma) \min_s W(\mu, s) \right\} \quad (5.14)$$

Aqui o planejador maximiza a soma ponderada do critério do Bem Estar Social Esperado e o critério Maxmin. O parâmetro γ é tal que $0 \leq \gamma \leq 1$ e mede o grau de confiança do planejador na distribuição de probabilidades subjacente ao cálculo de $E_s W$. Para o caso de confiança completa, $\gamma = 1$, e ele usará o critério da Utilidade Esperada, enquanto que sob a incerteza completa, $\gamma = 0$, a regra de decisão Maxmin prevalece. Assim, o fator $(1 - \gamma)$ denota o grau de incerteza do agente na distribuição de probabilidades. Nesta interpretação a incerteza é simplesmente a contraparte da confiança na avaliação probabilística subjacente ao cálculo do Bem Estar Esperado (BRETTEVILLE, 1999; HIRSHLEIFER; RILEY, 1992).

Novamente usando o exemplo simples analisado acima (Tabela 5.1), com uma distribuição de probabilidades uniforme, o planejador escolherá o máximo dentre:

$$PP : - \left[C + \left(1 - \gamma \frac{2}{3} \right) D \right] \quad (5.14a)$$

$$NA : - \left(1 - \gamma \frac{1}{3} \right) D \quad (5.14b)$$

A partir dessas expressões vemos que estados igualmente prováveis favorecem a estratégia do PP quando:

$$D > \frac{1}{\gamma} 3C \quad (5.14c)$$

A restrição sobre a magnitude do dano advindo das mudanças climáticas na ausência de ação preventiva (PP), relativamente aos custos de abatimento desta política, depende do grau de confiança na distribuição de probabilidades. A inequação 5.14 nos informa que quanto maior for o grau de confiança mais baixa será a restrição. Para o caso de confiança completa, $\gamma = 1$, temos exatamente a restrição da Utilidade Esperada (Equação 5.8), e o planejador escolherá a ação (PP), mas quando o grau de confiança é mais fraco, $\gamma < 1$, nenhuma ação será preferida, (NA). Então o critério MaxMin, que reflete a aversão extrema ao pior caso, domina o critério do Bem Estar Esperado completamente.

A distribuição de Probabilidades Normal (em forma de sino) leva á restrição: Seleccione o PP se:

$$D > \frac{1}{\gamma} 4C \quad (5.14.d)$$

Dada a nossa hipótese do tamanho relativo de C e D, o planejador escolhe PP se $\gamma > 4/3$, que por hipótese nunca é satisfeito, pois $0 \leq \gamma \leq 1$. Assim, uma distribuição em forma de sino simétrica implica em que nenhuma ação será tomada (NA). Mas se a distribuição é $p(S_1) = 2/3$ e $p(S_2) = p(S_3) = 1/6$, o planejador selecionará a política do PP se

$$D > \frac{1}{\gamma} \frac{3}{2} C \quad (5.14e)$$

Novamente, a confiança completa dá a restrição da Utilidade Esperada (Equação 5.8), e uma confiança suficientemente baixa na distribuição de probabilidades leva a nenhuma ação. Se os danos climáticos somam, por hipótese, três vezes os custos da ação, o planejador escolherá a política de acordo com o PP se $\gamma > 1/2$.

5.4.2.5 Segurança Primeiro

Uma das maneiras de mostrar precaução nas decisões é abaixar a probabilidade do Bem Estar futuro ser muito baixo, isto é, de estar abaixo de um certo limiar. Aqui estão duas alternativas para expressar essa idéia formalmente:

$$\min_{\mu} \{ \Pr[W(\mu, s) \leq \rho] \} \quad (5.15)$$

$$\max_{\mu} \{ E_s W(\mu, s) \} \text{ sujeito a } \{ \Pr[W(\mu, s) \leq k] \leq \rho \} \quad (5.16)$$

A primeira alternativa é um critério probabilístico de utilidade não esperada. Ela minimiza a probabilidade do Bem Estar ser menor que alguma constante ρ , que fixa o limiar. A segunda alternativa maximiza o Bem Estar Esperado, sujeito à restrição de que a probabilidade do Bem Estar menor que ρ , deve ser menor do que β .

A estrutura de incertezas do problema da mudança de clima em face do critério Segurança Primeiro coloca algumas questões difíceis sobre como determinar ρ e β . O que

determina um tamanho aceitável para β , que é a probabilidade do Bem Estar ser menor do que ρ ? Quão provável esse Bem Estar pode ser? Esta questão pode depender do tamanho de ρ . Que nível mais baixo do Bem Estar seria o aceitável? Isto novamente depende de se ρ mede o Bem Estar na média. Se ρ é uma média ponderada por grupos da sociedade ou entre os países, como são esses pesos determinados? E como desagregá-los? Além disso, se ρ e β estiverem determinados, como o planejador sabe, diante das incertezas, que uma certa decisão política satisfará a restrição acima?

Uma outra abordagem desse critério é impor restrições sobre o pior Bem Estar dentre grupos sociais, regiões ou países. Um exemplo pode ser:

$$\max_{\mu} \{E_s W(\mu, s)\} \text{ sujeito a } \{\Pr [\min_i W(\mu, s)_i \leq \rho] \leq \beta\} \quad (5.17)$$

onde o índice “ i ” percorre os grupos, as regiões ou países considerados.

Nesta formulação se supõe que o planejador maximizará o Bem Estar Social futuro sujeito a que a probabilidade do Bem Estar do pior caso, seja menor que β . Se β for igual a zero, o vínculo pode ser interpretado como fixando um piso de Bem Estar. Se o tamanho de ρ é escolhido adequadamente, este critério assegurará um desenvolvimento sustentável. Sinteticamente, podemos dizer que o desenvolvimento sustentável exige que cada geração não use mais do que a sua parte legítima dos recursos naturais mundiais. Se uma ou várias gerações têm um consumo muito alto, ou seu consumo gera muita poluição, isto afeta as possibilidades de consumo das gerações posteriores. Se isto ocorrer, as gerações posteriores podem não ser capazes de alcançar o nível de Bem Estar Social ρ e o critério é violado.

Os exemplos acima são suficientes para demonstrar a variedade de critérios de decisão sob incertezas em mudanças climáticas. A sensibilidade das escolhas sobre as crenças dos agentes também fica evidenciada, e indica a grande complexidade de um modelo das negociações internacionais sobre mudança do clima, que pretenda ter um grau significativo de realismo. É uma área interessante de pesquisa considerar vários agentes equipados com distintos critérios interagindo em uma negociação. Pode-se estudar vários tipos de agentes negociando metas de redução de emissões, onde cada um estaria utilizando um critério distinto de escolha. Tais negociações poderiam capturar alguns aspectos da complexidade das negociações reais, e nos informar sobre possíveis desenhos institucionais que fossem robustos relativamente à variedade de critérios de decisão usados.

No modelo $MAI_i(k)$ integrado que os agentes usam para fazer projeções existe o PIB líquido, definido na Seção 3.7, Equação 3.37 como o PIB bruto, isto é do PIB BAU, projetado pelo plano de crescimento de um governo, subtraído das Perdas Sociais devido às mudanças climáticas. Se os danos climáticos produzidos pelo aumento da temperatura global crescerem a uma taxa maior do que aquela do PIB, então este a decrescerá. Esta situação é indesejável para qualquer país, dados os seus objetivos de desenvolvimento, definidos na Seção 3.2.1. O critério Segurança Primeiro pode ser usado para definir um tipo de decisão dos agentes construídos nos capítulos anteriores. A seguir desenvolvemos esta idéia.

5.5 Um critério de Segurança Primeiro para Impactos Climáticos Perigosos

5.5.1 O Artigo 2 da Convenção e a Interferência Antropogênica Perigosa no Clima

No Artigo 2 da Convenção Quadro de Mudanças Climáticas lemos:

“O objetivo último desta Convenção e de quaisquer instrumentos legais que a Conferência das Partes possa vir a adotar é alcançar, de acordo com as provisões relevantes da Convenção, a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em um nível que impeça uma interferência antropogênica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável” (CQMC, 1992, Artigo 2).

Até recentemente a questão de como interpretar e implementar esse Artigo da Convenção havia recebido tratamento esporádico. Desde a publicação do Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança de Clima (IPCC) em 2001 (HOUGHTON ET TAL, 2001; MACCARTHY ET TAL, 2001; METZ ET AL, 2001), uma variedade de contribuições governamentais e não governamentais começaram a abordar essas questões em profundidade (GUPTA ET TAL, 2003; PEW CENTER, 2001). Entretanto não tem havido até o presente, nenhuma discussão formal entre as Partes da Convenção sobre a interpretação e implementação desse artigo.

O objetivo por parte de cientistas e economistas de interpretar o Artigo 2 determinando o que é “interferência antropogênica perigosa” é criar quadros para

implementar esse Artigo através da determinação de trajetórias de emissões consistentes com as várias interpretações particulares. Para alcançar este objetivo tem havido diferentes abordagens para responder à questão do que devemos entender por “perigoso” no contexto das mudanças climáticas.

Há muito tempo, mesmo antes da existência da Convenção, um grande conjunto de fenômenos tem sido propostos para definir o que seria potencialmente perigoso com as mudanças climáticas. Alguns perigos derivam diretamente de mudanças geofísicas, como a elevação do nível médio do mar, algumas de respostas biológicas às mudanças de clima, tais como o branqueamento de recifes de corais, e outras de respostas socioeconômicas a essas mudanças, tais como taxa de mortalidade. Os impactos usados como definição de “perigoso” variam desde locais a regionais e globais e afetam sistemas naturais ou humanos, desde infra-estrutura até saúde humana, ou ecossistemas e espécies biológicas e algumas vezes todas estas categorias juntas. Em alguns casos, níveis absolutos de mudança de clima, por exemplo, quantidade de aquecimento ou elevação do nível do mar, determinam o impacto, e outras vezes é a taxa de mudança que é o elemento mais importante.

O (WATSON, 2001) em seu Terceiro Relatório organizou as vulnerabilidades de indivíduos e sistemas sócio-econômicos, bem como ecológicos, em cinco categorias denominadas “razões para se preocupar”, que relacionam a elevação da temperatura média global com:

- a) Danos ou perdas irreparáveis de sistemas únicos e ameaçados, por exemplo, os recifes de corais.
- b) A probabilidade de eventos extremos, tais como secas e enchentes.

- c) A distribuição de impactos, por exemplo, a quebra de certos tipos de colheitas em algumas áreas e o surgimento em outras áreas.
- d) Danos agregados globais.
- e) A probabilidade de eventos singulares de larga escala, tais como a desintegração da faixa ocidental de gelo da Antártica, ou a parada da Circulação Termohalina.

Dentro do contexto da análise custo-benefício, tem-se usado caminhos de concentração ótima de GEE, obtidos pela maximização da utilidade esperada, para definir o que seria “perigoso” e adotar uma estratégia para implementar essa interpretação do Artigo 2. Essa abordagem fornece um meio comumente utilizado para acessar quantitativamente as opções envolvidas na escolha de caminhos de concentrações e emissões em termos de um numerário monetário. Esta abordagem pode ser particularmente adequada para implementar estratégias que evitem alguns perigos dentro das categorias c) e d) acima. A otimização fornece um meio internamente consistente de identificar o perigo, por exemplo, fixando algum nível sub-ótimo ou algum desvio do ótimo como “perigoso”, a partir da perspectiva econômica.

Baseados nessas considerações formulamos como uma definição útil de “perigoso” para ser explorada no modelo integrado desenvolvido neste trabalho, o ponto no tempo a partir do qual a taxa de crescimento do PIB** líquido torna-se negativa, devido aos danos climáticos. Como vimos no Capítulo 3, Seção 3.2.1, cada país busca continuamente o crescimento econômico visando aumentar a sua renda *per capita*. Se as mudanças climáticas produzirem danos em uma taxa temporal tal que o PIB** de seu país comece a decrescer sistematicamente, então podemos dizer que estamos em uma situação economicamente perigosa.

5.5.2 Danos Climáticos Perigosos e a Evolução das Opções e Abatimento de Emissões

Consideremos o critério de decisão Segurança Primeiro na sua última formulação (Expressão 5.17). Se considerarmos o PIB** como uma medida do Bem Estar W de um país P_i , então podemos reescrever aquela expressão como:

$$\max_{\mu} \{E_s \text{PIB}_i^{**}(\mu, s)\} \text{ sujeito a } \left\{ \Pr \left[\min \text{PIB}_i^{**}(\mu, s)_i \leq \rho \right] \leq \beta \right\} \quad (5.18)$$

Podemos, entretanto, reformular este critério, considerando não o PIB** líquido, mas a sua taxa de crescimento. Dessa forma o critério passaria a ser:

$$\max_{\mu} \{E_s \text{PIB}_i^{**}(\mu, s)\} \text{ sujeito a } \left\{ \Pr \left[\min \frac{d\text{PIB}_i^{**}(\mu, s)_i}{dt} \leq \rho \right] \leq \beta \right\} \quad (5.19)$$

isto é, a probabilidade de que a taxa de crescimento do PIB** seja inferior a um certo limiar ρ deve ser menor ou igual a β . Se fixarmos $\rho = 0$, e $\beta = 0$, teremos:

$$\max_{\mu} \{E_s \text{PIB}_i^{**}(\mu, s)\} \text{ sujeito a } \left\{ \Pr \left[\min \frac{d\text{PIB}_i^{**}(\mu, s)_i}{dt} \leq 0 \right] = 0 \right\} \quad (5.20)$$

ou seja, a probabilidade de que a taxa de mudança do PIB** seja negativa deve ser nula. Isto significa que ela não poderá ser negativa. O critério então afirma que o agente deve buscar a opção de abatimento que maximize seu PIB** sujeito à restrição de que a sua taxa nunca poderá ser menor que zero. O agente deve procurar primeiro evitar que este limiar seja atingido, e uma vez que não o seja, escolherá a estratégia de abatimento que maximize seu PIB**.

Em mudanças climáticas como em muitos problemas ambientais e de segurança nacional, a questão é como o agente pode antecipar a ocorrência de um limiar em tempo de agir para evitá-lo. A antecipação de eventos climáticos futuros é uma área de investigação da ciência do clima, e como vimos no Capítulo 2 envolve o horizonte de antecipação $HP(k)$. Cada governo em cada momento de decisão k , projeta o crescimento de seu PIB** desde k até $k+HP(k)$ e calcula a taxa de crescimento deste PIB, dados os danos climáticos e os custos de abatimento de uma política $\mu_{ij}(k)$ sob avaliação. Se na projeção do PIB** em algum momento posterior, dentro do horizonte $HP(k)$, ele começa a decrescer, então um limiar é detectado e deve ser buscada uma política de abatimento que retire o limiar do horizonte de planejamento, lançando-o para além desse horizonte. Na Figura 5.1 mostramos duas projeções de PIB líquido de dois agentes que representam dois Blocos de países, A e B. As linhas vermelhas indicam as trajetórias observadas dos PIB de cada um e o momento de decisão é indicado pelas linhas vermelhas verticais. As linhas verde clara e azul indicam as trajetórias projetadas de cada PIB. As linhas verticais, em verde claro e azul, indicam o alcance máximo de cada projeção. No exemplo da Figura, escolhemos $HP(k) = 80$ anos. Ambas as projeções mostram limiares de queda do PIB. No caso do Agente A o limiar ocorre no ano 2050, e no caso de B em 2080.

Figura 5.1: Dois agentes projetam seus PIB líquidos com um horizonte de 70 anos. Ambos esperam a ocorrência de limiares, respectivamente, em 2050 (esquerda) e 2080 (direita). As linhas vermelhas referem-se ao PIB observado até a data indicada pela linha vermelha vertical. As linhas verde claro e azul escuro, verticais indicam a o alcance do HP. As curvas que vão além de HP são usadas para referência e correspondem ao caso BAU.

Formulemos com mais precisão essas idéias. Seja P_i um governo, $k > 1$ um momento de decisão e $\{\mu_{ij}(k-1)\}$, $i, j = 1, 2, \dots, N$, o conjunto de opções desse agente no momento de decisão anterior a k . Seja $PIB_i(k, t)$ uma projeção BAU do PIB desse país, sem políticas de mitigação de emissões, com horizonte de antecipação $HP(k)$, e com taxa de crescimento planejada δy_i . Então se a trajetória projetada $PIB_i(k, t)$ é tal que para algum momento τ , $k \leq \tau \leq k + HP(k)$, $dPIB_i(k, t)/dt < 0$, então o agente deve recorrer a um novo conjunto de opções de abatimento tal que $\mu_{iMin}(k) > \mu_{iMin}(k-1)$, isto é, a opção mínima de abatimento da nova árvore de opções deve ser maior do que a opção mínima do momento anterior, para tentar evitar o limiar. Idealmente, o agente deveria calcular o valor mínimo de abatimento que deslocasse o limiar para além do horizonte $HP(k)$. Por simplicidade não consideraremos esse cálculo no presente modelo, deixando-o para um estudo futuro. Aqui somente introduziremos uma regra simples de aumento da opção mínima de abatimento, a saber:

$$\mu_{iMin}(k) = \mu_{iMin}(k-1) + 100 \cdot \left(\frac{\Gamma_{Di}}{\tau - k} \right) \quad (\%/ano) \quad (5.21)$$

onde Γ_{Di} é um índice que mede a aversão ao risco³ do agente P_i aos danos severos, tal que $0 < \Gamma_{Di} \leq 1$. A diferença $(\tau - k)$, com $\tau > k$, refere-se à distância entre o momento presente, k , e o momento esperado de ocorrência do limiar. Essa expressão é um caso particular daquela discutida na Seção 2.8.2. Essa regra é usada aqui em caráter exploratório e provisório. Apesar de artificial satisfaz alguns requisitos exigidos pela intuição. Por exemplo, para uma aversão ao risco fixa, quanto menor for a distância entre o momento presente do agente e o limiar, maior deve ser o incremento na opção mínima de abatimento para tentar afastar o limiar. E para uma distância fixa do limiar, quanto maior for a aversão ao risco de um agente maior também será o incremento da opção mínima.

Para ver como a regra acima funciona, consideremos dois agentes, A e B, com aversões ao risco $\Gamma_{DA} = 0,4$ e $\Gamma_{DB} = 0,8$, respectivamente, isto é, o agente B tem o dobro da aversão ao risco de A. E consideremos que em $k-1$ as suas opções mínimas eram iguais e valiam $\mu_{AMin}(k-1) = \mu_{BMin}(k-1) = 2\%$. Se ambos detectam um limiar 46 anos à frente do momento k , isto é, $(\tau - k) = 46$ anos, então, suas próximas opções mínimas de redução de emissões de emissões serão, respectivamente, 2,87 % e 3,74 %.

Consideremos uma sequência de momentos de decisão, nos quais o agente faz uma projeção de seu PIB líquido, com um horizonte $HP(k)$. Se ele constata em uma projeção a presença de um limiar, então ao aplicar um abatimento mínimo maior do que o anterior, ele

³ Esses índices de aversão ao risco podem ser derivados de funções utilidade que incorporam o comportamento de um agente em face do risco. Por exemplo, a função utilidade exponencial. Ele depende da variância ou incerteza do PIB esperado, mas deixamos aqui esta dependência implícita (Ver Apêndice G).

“empurra” o limiar para a frente por um certo número de anos, e quanto maiores forem os abatimentos dos outros países, maior será o “empurrão” para a frente do seu limiar. A cada projeção em que ele ainda percebe um limiar no horizonte de antecipação, maior deverá ser a quantidade de abatimento se ele quiser evitar o colapso de sua economia. O agente realiza as escolhas de abatimentos mínimos cada vez maiores sem fazer qualquer tipo de análise para maximizar seu PIB. Quando ele percebe a aproximação de um limiar, coloca em suspenso a lógica da maximização do Bem Estar e procura evitar o pior. Esse modelo é então uma aplicação do critério segurança primeiro. Embora caricatural, é um modelo de critério de decisão adaptativo que é um ponto de partida para modelagens mais sofisticadas.

Capítulo 6

Modelo de Uma Seqüência de Negociações sobre Cotas de Reduções de Emissões

6.1 Introdução

Nos Capítulos anteriores desenvolvemos um modelo de tomadores de decisões governamentais com planos de desenvolvimento para seus países, e que assessorados por equipes nacionais e internacionais de especialistas, cujas informações lhes permitem projetar mudanças climáticas futuras e impactos regionais, avaliam opções de reduções de suas emissões de GEE para evitarem danos climáticos. Usando ferramentas para tratar as incertezas e baseados em critérios de decisões sob incertezas, escolhem a melhor política de abatimento tendo em vista seus custos e danos evitados e a possibilidade de impactos climáticos perigosos. Contudo, esse modelo ainda está incompleto, pois cada governo não leva em conta explicitamente as opções de abatimento dos outros países para decidir qual será a sua melhor opção de abatimento. Esse é um elemento importante na estrutura de decisões de cada país, pois o aquecimento global é o resultado das emissões globais envolvendo virtualmente todas as nações. E por isso, a solução do problema das mudanças climáticas somente pode ser alcançada coletivamente. Neste capítulo a dimensão dessa interdependência será introduzida e realçada.

No presente capítulo modelamos de forma simples as negociações sobre mudanças climáticas, integrando-as com o modelo dos agentes tomadores de decisões previamente desenvolvidos. Restringimos o tema dessas negociações a reduções de emissões de GEE baseadas em distribuição de cotas de reduções de emissões, como no caso do Protocolo de Quioto (PQ). Não é certo que este esquema de distribuição de responsabilidades continuará

após o primeiro período de comprometimento do PQ, mas por ter sido o primeiro a ser adotado, talvez se aprimore e perdure ainda por vários anos, valendo a pena explorar essa possibilidade para tentarmos compreender como um Regime como o de Quioto poderia evoluir. Assim, suporemos que os agentes estão dentro de um Regime Internacional semelhante em alguns aspectos importantes ao fixado pela Convenção e o Protocolo de Quioto e negociam regularmente entre si cotas de abatimento de emissões. Entretanto, como veremos, não o fazem por altruísmo, mas para preservar seus próprios interesses nacionais (Ver Apêndice C).

Primeiramente construiremos um modelo simplificado de um Regime internacional para abater emissões de GEE que fornecerá uma estrutura sequencial de negociações. Em seguida nos concentraremos em um modelo estilizado de uma negociação individual típica sobre o tema da distribuição de cotas de abatimento, e depois retornamos nossa atenção à sequência dessas negociações. Para isto nos baseamos na Teoria dos Jogos (TJ) sem, contudo, nos prendermos rigidamente às suas restrições e formalismo. Quando necessário afrouxamos aquelas restrições e adaptamos livremente aquela Teoria aos nossos objetivos. Para sermos mais precisos, usaremos uma abordagem denominada Teoria Global da Negociação, que nos permite bastante flexibilidade para representar uma negociação, usando elementos de várias fontes teóricas e empíricas, incluindo a TJ. (Ver Apêndice E para mais detalhes). Procuramos também comunicar as principais idéias retiradas da TJ sem pressupor conhecimento prévio dessa Teoria por parte do leitor.

A exposição busca mostrar de forma simples e caricatural para cientistas, políticos e não especialistas, alguns dos principais elementos envolvidos em uma sequência de negociações em mudanças climáticas ressaltando os interesses nacionais, o ambiente de incertezas sobre o tema e o papel que a evolução do conhecimento científico sobre o assunto

pode desempenhar nestas negociações. Apesar de adotarmos um modelo muito simples, procuramos construir um quadro conceitual que nos permita futuras expansões na modelagem desse tema.

6.2 Teoria dos Jogos, Acordos Internacionais Ambientais e Mudanças Climáticas: uma revisão da literatura.

A Teoria dos Jogos tem sido usada por vários autores para teorizar sobre as possibilidades de cooperação internacional (TAYLOR; WARD, 1982; LIVINGSTON, 1989; MÄLER, 1990; HOEL, 1991; WARD, 1993; SOROOS, 1994) e também sobre acordos ambientais internacionais como em (SPRINZ; LUTERBACHER, 2002), onde pode ser encontrada uma extensa lista de trabalhos aplicando a teoria dos jogos na análise do problema do clima. Em geral, salvo raras exceções como em (GERMAIN ET TAL, 2003; (Para uma extensa revisão da área ver (CISCAR ET TAL, 1997))), os modelos são jogos estáticos.

A literatura de Teoria dos Jogos sobre cooperação no contexto das mudanças climáticas tem se preocupado principalmente com a possibilidade de formação de coalizões estáveis e tem seguido duas abordagens. Por um lado, temos o que (TULKENS; 1998) chamou de tese das “pequenas coalizões estáveis”, (CARRARO; SINISCALCO, 1993; BARRET, 1994; PEREAU; TAZDALT, 2001). Por outro lado, temos a tese das “grandes coalizões estáveis” (CHANDER; TULKENS, 1997; EGTEREN; TANG, 1997; FUNAKI; YAMATO, 1999; HELM, 2001). De acordo com a primeira abordagem, somente um pequeno número de países aceitarão assinar um acordo (o conceito de estabilidade usado vem da análise dos cartéis em economias industrializadas). Neste quadro, a coalizão

incluindo todos os países não é sustentável desde que os benefícios a partir da cooperação são um bem público (distribuído a todos os países), enquanto os custos são assumidos somente pelos países formando a coalizão. Ao contrário, na segunda abordagem todos os países estão interessados em cooperação tomados individualmente ou em sub grupos. De acordo com (CHANDER; TULKENS, 1997) um acordo não deveria somente estar baseado sobre o Ótimo de Pareto para ser eficiente, mas deveria também evitar qualquer sub-grupo de países interessados em deserção. Portanto o objetivo seria uma regra de distribuição de ônus capaz de favorecer a cooperação em geral. O que estas duas abordagens têm em comum, é que não levam em conta as próprias negociações, tanto nas características significativas como a assimetria de informação e heterogeneidade de países, quanto nas possibilidades de renegociação. Nos jogos não cooperativos evocados por (CARRARO; SINISCALCO, 1993) a negociação é modelada como um discurso simultâneo, não deixando qualquer espaço para o dialogo, isto é, a possibilidade de contra propostas. Nos modelos de formação endógena de coalizões (CHANDER E TULKENS, 1995, 1997), a cooperação é o resultado de intervenção direta de uma terceira parte, uma autoridade supranacional agindo como um planejador central. Este planejador central é assumido ser benevolente, defender os interesses globais e ter poder de forçar o cumprimento dos acordos, pressuposições bem irrealistas no contexto das negociações sobre mudança de clima. Para superar estas limitações (CAPARRÓS; PEREAU; TAZDALT, 2003), analisaram as futuras negociações sobre mudança climática em um quadro com informações assimétricas, com coalizões heterogêneas e incluindo explicitamente a possibilidade de se fazer contra-propostas. Em termos técnicos, eles desenvolveram um jogo seqüencial com informação assimétrica em um quadro bilateral e multilateral. Todos estes modelos são desenvolvidos com o formalismo da Teoria dos Jogos e apresentam

resultados analíticos em forma fechada e trazem contribuições para avançarmos na arte de modelar as negociações sobre mudança de clima.

No presente trabalho modelamos cada negociação como um jogo não-cooperativo simultâneo (Ver definições mais abaixo). Apesar dessa representação da cooperação internacional ser amplamente reconhecida como inadequada, ela fornece importantes metáforas para certas formas de ação coletiva no nível internacional (KEOHANE, 1984; SNIDAL, 1986). No contexto do presente trabalho escolhemos um jogo simultâneo como representação de uma COP, pois não queremos entrar nos detalhes do processo de negociação, com propostas e contra propostas, ou movimentos e reações dentro uma COP. Jogos que consideram o movimento de um jogador e as reações do outros jogadores são denominados jogos em forma extensiva. Apesar dos modelos em forma extensiva serem mais realistas eles são mais úteis para estudar o fluxo de informação durante a negociação ou possíveis bifurcações da seqüência de uma negociação. No presente trabalho, estamos interessados, ao contrário, somente nos efeitos das incertezas externas e anteriores ao próprio jogo, sobre o resultado do mesmo. Em trabalhos posteriores, a modelagem pode estender seu raio de ação para incluir jogos em forma extensiva e mista. Uma área interessante de pesquisa é a aquela em que (SISCAR; FORGÓ, 2001), usando jogos extensivos, estudaram possíveis desdobramentos dos acordos pós-Quito considerando a possibilidade da entrada dos países em desenvolvimento nos acordos com metas obrigatórias de reduções de emissões. Em trabalhos futuros podemos introduzir estas questões tendo em cada COP a possibilidade de bifurcações da seqüência de negociações em diferentes direções políticas, se alguns países cooperarem ou deixarem de fazê-lo. Por outro lado, devido a nossa escolha metodológica (Ver Introdução), procuramos nos

aproximar da forma como as negociações realmente ocorrem desenvolvendo um modelo da Convenção do Clima e da sequência das negociações.

6.3 Modelo de um Regime Internacional para Abater Emissões

Segundo (YOUNG, 2002) um regime internacional ambiental é um conjunto de regras para mudar o comportamento das pessoas e instituições com relação a um problema ambiental internacional tal como poluição transfronteiriça que produz chuva ácida, ou depleção da camada de ozônio ou mudanças climáticas globais. Os regimes internacionais ambientais têm sua origem em um acordo internacional que fixa diretrizes para que cada país envolvido construa regulação doméstica para mudar o comportamento dos agentes sociais em nível regional, nacional e local. A Convenção do Clima fornece um quadro geral para que os países busquem coletivamente resolver o problema das mudanças climáticas mediante mitigação de emissões e medidas de adaptação. Em alguns de seus artigos e parágrafos estão explicitados certos princípios e objetivos que guiam a construção gradual de longo prazo de um Regime Internacional de Mudanças Climáticas. O Protocolo de Quioto foi o primeiro conjunto de regras específicas para abordar o problema em um determinado período, entre 2008 e 2012. Muitos outros acordos virão e contribuirão para o avanço do Regime da Convenção Quadro. A seguir consideraremos um modelo simplificado do Regime da Convenção Quadro no qual fixaremos algumas regras simples que capturam somente alguns dos princípios e objetivos dessa Convenção.

6.3.1 O Tema de uma COP e a Seqüência de Conferências

Para formular com precisão essas idéias suponhamos que N países, $N \geq 2$, que também denominaremos indistintamente Partes, agentes, governos, tomadores de decisões, ou negociadores, denotados por P_i , $i = 1, 2, \dots, N$, tenham elaborado conjuntamente, através de um processo de negociações, um documento que instaura um Regime Político Internacional para o controle das mudanças climáticas, que denominaremos sinteticamente Regime Climático (RClima). Para simplificar a discussão, suporemos que as medidas de seqüestro de carbono da atmosfera e de adaptação às mudanças de clima estão excluídas desse Regime como explicado no Capítulo 2, Seção 2.3.

Suponhamos que o RClima entra em vigor a partir de uma certa data k_0 , e que estipule a realização periódica de negociações para distribuir esforços de reduções de emissões de GEE entre os países que o assinaram. Na data k_0 ocorre a primeira de uma seqüência de negociações. No Regime da Convenção do Clima esses encontros são chamados Conferência das Partes, abreviadamente COP, em referência ao termo em inglês “Conference of Parties”¹. Assim, o RClima instaura uma seqüência de encontros ao longo do tempo, onde em cada COP os países decidirão coletivamente, por negociação multilateral, as metas de redução de emissões, para cada um de seus membros. A COP que ocorre em uma data $k \geq k_0$ será denotada por $COP(k)$. A primeira conferência é então a $COP(k_0)$. No Regime real o primeiro acordo foi o Protocolo de Quioto (PQ) que ocorreu em $k_0 = 1997$.

¹ Escreveremos COP tanto para a forma singular, “Conference of Parties”, quanto plural, “Conferences of Parties”.

Em geral em uma COP que visa firmar um acordo sobre abatimento de emissões, como foi o PQ, são tomadas, entre outras, três decisões básicas:

- a) Distribuir cotas de abatimento de emissões entre as Partes.
- b) Decidir o período durante o qual aquelas cotas serão implementadas. Esse período é usualmente denominado Período de Comprometimento (PDC).
- c) Decidir quando será a próxima COP para tomar o mesmo tipo de decisões para um novo PDC.

No presente modelo assumiremos por simplicidade que o RClima estipula que as conferências deverão se realizar periodicamente e separadas por intervalos com uma duração fixa de $\Delta\tau$ anos cada. Essa é uma simplificação que procura evitar que nos desviemos para direções que nos levariam muito longe de nosso propósito, pois em geral a duração do PDC, bem como a data da próxima COP, além de seu tema de discussão também são tópicos negociados. Existem trabalhos, como o de (PINTO; HARRISON, 2000), que modela uma negociação sobre cotas de redução de emissões de GEE usando funções utilidades para cada país, que incluem preferências sobre a duração do PDC. Este tipo de abordagem é promissora, mas complexa para ser desenvolvida aqui. A regra que fixa os intervalos entre COP consecutivas não deixará de capturar alguns dos principais componentes da relação entre as incertezas e as negociações, que é nosso objetivo neste trabalho.

Fixaremos como regra adicional do RClima que o cumprimento das metas de abatimento decididas em uma COP(k), deve ocorrer a partir do ano seguinte a essa COP até a data da próxima COP, e a duração de cada PDC será $\Delta\tau$ anos. A sequência de encontros será então $COP(k_0)$, $COP(k_0 + \Delta\tau)$, $COP(k_0 + 2\Delta\tau)$, $COP(k_0 + 3\Delta\tau)$, e assim sucessivamente, podendo em princípio continuar indefinidamente (Figura 6.1). Podemos

também, denotar cada COP pela sua posição na seqüência, denotando por COP(1), COP(2), COP(3), etc, a primeira, a segunda, a terceira COP, e assim sucessivamente. Além disso, podemos denotar os PDC, de forma análoga às notações para as COP. Em geral o PDC(k) sucederá a cada COP(k), (Figura 6.1).

Figura 6.1: As primeiras quatro COP de uma seqüência de encontros onde vários países negociam entre si cotas de reduções de emissões de GEE. Uma Conferência das Partes é representada por um hexaedro cujos vértices simbolizam os países e as arestas e diagonais as negociações. Estão indicados também os períodos de comprometimento, PDC, subsequentes a cada COP. Na ilustração consideramos $\Delta\tau = 10$ anos. A COP(1) pode ser considerada a negociação que deu origem ao Protocolo de Quioto.

Para fixar idéias imaginemos que $\Delta\tau = 10$ anos, que é aproximadamente a duração do processo diplomático que começou em Quioto em 1997 e termina em 2007. Como a seqüência de COP está igualmente espaçada no tempo, podemos alternativamente considerar os momentos sucessivos de negociação como $k = 1, k = 2, k = 3, \dots$, e podemos denotar uma seqüência qualquer de momentos iniciando em k com os índices $k, k+1, k+2, \dots$, significando que estamos percorrendo aos saltos a seqüência de momentos.

6.3.2 Os Resultados de um Acordo: Protocolos de Cotas de Abatimento

Seja uma COP(k) com a participação de N países. O resultado da negociação sobre cotas de redução de emissões será uma lista de medidas de abatimento, denotada por $\mu^*(k)$ tal que $\mu^*(k) = \{\mu_i^*(k)\}$ $i = 1, 2, 3, \dots, N$, onde cada $\mu_i^*(k)$ é uma taxa uniforme de redução de emissões do país P_i para o próximo PDC e será expressa como a porcentagem anual de redução das emissões $E_i(t)$ para cada ano do PDC. Por exemplo se $\mu_i^*(k) = 1\%$, então o governo P_i reduzirá em cada ano t do PDC, 1% das suas emissões em t . Ao conjunto de reduções $\{\mu_i^*(k)\}$ denominaremos também Protocolo(k) de cotas de redução de emissões para o PDC(k). A redução global de emissões resultante de todas as reduções individuais decididas em uma COP, medida também em porcentagem anual das emissões globais, será calculada por:

$$\mu_T(k, t) = \sum_{i=1}^N v_i(k, t) \cdot \mu_i^*(k) \quad (\% / \text{Ano}) \quad (6.1)$$

onde $v_i(t) = E_i(t)/E_T(t)$ é a contribuição do país P_i às emissões globais $E_T(t)$. Ao final de um PDC a quantidade total de emissões reduzida pode ser calculada pela soma de reduções globais desde k até $k+1$. Na Tabela 6.1 são mostrados os elementos do modelo de um Regime Internacional sobre abatimento de missões de GEE, onde fica evidente o seu caráter altamente caricatural.

O conceito de Protocolo(k) definido acima é amplo e inclui qualquer resultado final de uma COP. Ele é a lista de distribuição de reduções de emissões, uma para cada país, que

visa ocorrer no PDC(k). Uma situação extrema é aquela na qual em uma COP(k) os países não chegam a acordo nenhum ou, de forma equivalente, decidem coletivamente que nenhum deles abaterá qualquer emissão no próximo PDC, isto é, $\mu_i^*(k) = 0$ para qualquer país P_i .

Regime do Clima Para Abater Emissões (RClima): Elementos Constituintes			
Início: k_o		Fim: Indefinido	
Objetivo:	Reduzir as Emissões Globais de GEE		
Partes:	Todos os N países do Mundo		
Regras:			
Ação Coordenada:	Todos os países negociam redução de emissões periodicamente		
Intervalo entre Negociações	$\Delta \tau$ anos		
Conceito	Nome	Símbolo	Definição
Encontro para Negociar Abatimento de Emissões	Conferência das Partes	COP(k)	Jogo não-cooperativo para cotas de abatimento
Resultado de uma Negociação	Protocolo(k)	$\mu^*(k)$	$\mu^*(k) = \{\mu_i^*(k)\}$ (Equilíbrio de Nash)
Período no qual um acordo sobre abatimentos é cumprido	Período de Comprometimento	PDC(k)	Ocorre desde o ano seguinte à COP(k) até a COP(k+1)
Abatimento Global de um Acordo	Abatimento global de um Protocolo(k) no PDC(k)	$\mu_T(k, t)$	$\mu_T(k, t) = \sum_{i=1}^N \nu_i(k, t) \cdot \mu_i^*(k)$

Tabela 6.1: Descrição sucinta dos elementos constituintes do Regime do Clima (RClima), que é um modelo caricatural do Regime da Convenção do Clima.

No regime real existe um lapso de tempo entre a assinatura de um acordo e a sua implementação. Além disso, para que o acordo entre em vigor, se faz necessário que seja

ratificado por cada país, em geral pelos agentes legisladores de cada nação. O Protocolo de Quioto, por exemplo, foi firmado em 1997 e somente entrou em vigor em fevereiro de 2005. No modelo presente suporemos que não existe lapso de tempo entre o acordo e a ratificação. Suporemos que cada Protocolo(k) estará automaticamente ratificado. Após a ratificação de um acordo internacional, existe a possibilidade de que alguns países não cumpram o acordo durante o PDC. As razões para o não cumprimento são várias e não as consideraremos aqui. Para focalizarmos nossa análise na influência das incertezas nos valores dos parâmetros selecionados no Capítulo 4, sobre o resultado das negociações, suporemos que qualquer distribuição de emissões será sempre cumprida ao longo do PDC(k). Essa simplificação é extrema e retira da situação modelada algumas características importantes, tais como a influência dos riscos de não cumprimento de alguns países, sobre a disposição de outros países a cooperarem. Mesmo com esta restrição ainda conseguimos capturar alguns aspectos do problema, e o modelo proposto forma a base para que novas modelagens incluam aspectos relacionados à credibilidade de certos países no processo de negociações sucessivas e o papel de possíveis mecanismos de sanções para aqueles que não cumprirem os acordos.

6.4 Modelo de uma COP : um Jogo para Reduzir Emissões

6.4.1 O Problema Coletivo das Mudanças Climáticas

Sejam N países, $P_i, i = 1, 2, 3, \dots, N$, com funções Bem Estar Social Bruta W_i . Esta função pode ser representada pelo PIB nacional do país P_i , que é gerado pela atividade

econômica que produz emissões $E_i(t)$. Devido aos danos climáticos essa função é alterada para a Função Bem Estar Líquida W_i^* tal que:

$$W_i^* = W_i - D_i\left(\sum_j E_j\right) \quad (\text{Bens}) \quad (6.2)$$

onde $D_i\left(\sum_j E_j\right)$, $j = 1, 2, 3, \dots, N$, refere-se aos danos climáticos agregados, que são função

em última instância das emissões globais, isto é, os danos são uma função não somente das emissões do país P_i , mas também das emissões de todos os outros países, já que os gases estufa se diluem completamente na atmosfera, produzindo um aquecimento que acarreta impactos em qualquer outro país. A hipótese usual é que a função $D_i\left(\sum_j E_j\right)$ é crescente nas emissões, isto é, quanto maiores as emissões globais maiores serão os danos, devido à cadeia causal das mudanças climáticas.

A Equação 6.2 mostra um aspecto importante do problema das mudanças globais: a interdependência entre os países, no sentido de que o Bem Estar Social de cada um depende da ação de todos os outros países em termos das emissões agregadas de GEE. Essa equação indica também que, para diminuir ou evitar os danos em qualquer país, não é suficiente uma ação unilateral, mas uma ação conjunta, pelo menos entre os principais poluidores. Por outro lado, as emissões de um país P_i causam danos ambientais nesse país mas também em todos os outros países.

6.4.2 As Abordagens da Teoria dos Jogos ao Problema

A Teoria dos Jogos têm duas maneiras de analisar o comportamento dos países diante da sua interdependência no problema das mudanças climáticas: a abordagem cooperativa e a não-cooperativa. Essa terminologia visa capturar a distinção entre situações nas quais os acordos são forçados, e aquelas nas quais eles não são. Jogos nos quais existem mecanismos que tem o poder de obrigar aos jogadores a chegarem a um acordo e o cumprirem, situações chamadas acordos forçáveis, chamam-se jogos cooperativos e aqueles nos quais não existe esta possibilidade e os participantes individuais agem em seu próprio interesse, chamam-se jogos não-cooperativos. Esta terminologia é confusa, pois pode dar a entender que o primeiro tipo de jogo produz comportamento cooperativo e o segundo não. A ação individual auto-interessada, na realidade, pode ser compatível com ganhos mútuos especialmente em ações repetidas. A distinção importante é que em um jogo não-cooperativo, a cooperação emergirá somente se ela resultar dos interesses individuais e separados dos participantes em tomar as ações prescritas. Os termos ‘cooperativo’ e ‘não-cooperativo’ referem-se, então, à forma na qual as ações são forçadas ou implementadas, coletivamente no primeiro caso e individualmente no segundo caso.

Segundo a Teoria do Auto-Interesse dos Países nos acordos ambientais internacionais de (SPRINZ;VAATORANTA, 1998), que foi construída a partir do estudo empírico das posições de vários países em acordos ambientais internacionais, os países agem em seu próprio interesse. Eles se mostram mais propensos a reduzir emissões quanto maiores forem os danos esperados em seus territórios e quanto menores forem os custos de abatimento de suas emissões (Ver Apêndice C para detalhes). Além disso, segundo (BARRET, 1994), o cumprimento dos acordos ambientais internacionais não podem ser

forçados, pois não existe uma autoridade supranacional que puna o país que não cumprir o acordo. Esses acordos somente podem existir voluntariamente, onde cada país se obriga a si mesmo a cumprir o que prometeu. Se eventualmente um país não cumpre sua parte no acordo, não há meios de fazê-lo retroceder em sua posição a não ser que se lhe ofereça algum tipo de compensação. Os Estados Unidos da América e a Austrália não ratificaram o Protocolo de Quioto e não sofreram por isso qualquer sanção de qualquer Parte da Convenção do Clima, nem da Organização das Nações Unidas. Por isso, a própria existência do Regime da Convenção do Clima pode ser interpretada como o resultado do auto-interesse de cada país e não de algum comportamento altruísta ou resultado de ameaças de alguma autoridade supra-nacional. Baseados nestas idéias seguiremos a principal corrente de pesquisa na aplicação da TJ ao problema das mudanças climáticas, modelando uma COP como um jogo não-cooperativo. Ressaltamos, entretanto que é possível modelar essas negociações introduzindo mecanismos de compensações, ou de punições e ameaças e estudar o seu papel na sequência das negociações usando a Teoria dos Jogos Repetidos (BASAR; OLSDER, 1995). Isso pode se feito, por exemplo, introduzindo transferências laterais para compensações ou introduzindo custos por perda de reputação, quando do não cumprimento, nas funções utilidade dos agentes (GERMAIN, 2002)

6.4.3 Estratégias Não-Cooperativas para Abater Emissões

Se cada governo comporta-se não-cooperativamente, ele buscará maximizar a sua Função Bem Estar Social com respeito ao abatimento de suas próprias emissões e considerará somente os danos em seu próprio país, mas não aqueles nos outros países.

Alternativamente, ele buscará minimizar em cada PDC suas Perdas Sociais, PS_i , que é a soma de seus custos de abatimento e danos climáticos (Ver Seção 3.6, Capítulo 3), tomando como dadas as emissões dos outros países.

Para entendermos com clareza qual é o problema que os governos enfrentam para decidir o quanto abater de suas emissões, levando em conta as emissões dos outros países, consideremos um exemplo no qual existem somente dois países, ou dois grandes blocos de países, tais como os países que estão listados no Anexo I da Convenção do Clima e os que não estão naquele Anexo. Designemos estes dois blocos por A e B, respectivamente (Figura 6.2).

Figura 6.2: Dois Blocos de países A e B, imersos no sistema do clima global. Os agentes negociam metas de abatimento para evitar impactos negativos em suas economias.

Suponhamos, além disso, que os dois blocos estão no momento de decisão k reunidos em uma COP(k) e que cada um tem somente duas opções de reduções de emissões, isto é, $\{\mu_{A1}(k), \mu_{A2}(k)\}$, tais que $\mu_{A1}(k) < \mu_{A2}(k)$ para o Bloco A e $\{\mu_{B1}(k), \mu_{B2}(k)\}$, tais que $\mu_{B1}(k) < \mu_{B2}(k)$ para o Bloco B. Para maior clareza, fixemos os horizontes de tempo tais que, $hp(k) = HP(k) = 10$ anos, isto é, aos agentes analisarão

suas opções somente para o próximo PDC. As ações ou opções de cada jogador recebem em TJ o nome de estratégias. Se cada bloco conhece as suas estratégias e as estratégias do outro bloco, então, cada um pode analisar cada opção de redução global de emissões, segundo a Equação 6.1, $\mu_T(k) = v_A \cdot \mu_{A_{j_1}}(k) + v_B \cdot \mu_{B_{j_2}}(k)$, $j_1, j_2 = 1, 2$, tendo em vista tanto as suas opções quanto as do outro bloco. No exemplo, cada bloco deve considerar cada uma das quatro possíveis combinações de opções, $\{\mu_{A_{j_1}}(k); \mu_{B_{j_2}}(k)\}$, $j_1, j_2 = 1, 2$, para avaliar quais seriam suas perdas em cada uma das possibilidades. Esta situação pode ser representada em uma matriz na qual colocamos nas linhas as opções de abatimento do Bloco A, e nas colunas as opções do Bloco B. Em cada célula da matriz colocamos as consequências de cada opção de A e B em termos das Perdas Sociais (Figura 6.3).

		Opções do Bloco B	
		$\mu_{B1}(k)$	$\mu_{B2}(k)$
Opções do Bloco A	$\mu_{A1}(k)$	$(PS_A(\mu_{A1}, \mu_{B1}); PS_B(\mu_{A1}, \mu_{B1}))$	$(PS_A(\mu_{A1}, \mu_{B2}); PS_B(\mu_{A1}, \mu_{B2}))$
	$\mu_{A2}(k)$	$(PS_A(\mu_{A2}, \mu_{B1}); PS_B(\mu_{A2}, \mu_{B1}))$	$(PS_A(\mu_{A2}, \mu_{B2}); PS_B(\mu_{A2}, \mu_{B2}))$

Figura 6.3: Matriz das Perdas Sociais devido à mudanças climáticas para dois blocos de países A e B. Para cada par de opções de abatimento $\{\mu_{A_{j_1}}(k); \mu_{B_{j_2}}(k)\}$, cada país tem uma Perda Social. Em cada célula indicamos duas Perdas Sociais, uma para cada país, correspondentes ao par de opções de abatimento indicado.

O Bloco A considera que se reduzir suas emissões de $\mu_{A_{j_1}}(k)$ terá um custo esperado $C_{A_{j_1}}(t)$, para cada $j_1 = 1, 2$. Por outro lado ele deve calcular quais seriam seus

danos climáticos esperados se o Bloco B reduzisse suas emissões de $\mu_{Bj_2}(k)$, $j_2 = 1, 2$, para cada uma de suas duas opções de abatimento. Isto é, ele deve calcular quatro valores para suas Perdas Sociais esperadas $PS_A(\mu_{Aj_1}; \mu_{Bj_2})$, com $j_1, j_2 = 1, 2$. O bloco B faz o mesmo tipo de avaliação, e obtém quatro valores possíveis para as suas Perdas Sociais, $PS_B(\mu_{Aj_1}; \mu_{Bj_2})$, com $j_1, j_2 = 1, 2$. As oito perdas sociais estão indicadas na matriz da Figura 6.3.

Nos Capítulos 2, 3 e 4 vimos que os governos fazem suas análises seguindo uma metodologia $\Phi_i(k)$ que contém um modelo de análise integrada $MAI_i(k)$ e um critério de decisão $\Psi_i(k)$ e usa diagramas de influência para calcular os efeitos de cada opção e calcular os valores esperados dos custos, danos e Perdas Sociais totais, a partir das distribuições de probabilidades de cada variável aleatória (Figura 6.5). No caso de um tomador de decisões solitário, ele deve analisar cada opção individual de abatimento. No caso presente, cada governo deve analisar todos os pares de opções de abatimento. A árvore de opções de cada governo inclui a árvore de opções individual do outro governo (Figura 6.4).

Figura 6.4: As árvores de opções de abatimento de cada agente deve incluir as árvores de opções de abatimento dos outros agentes. Notemos que a situação é aparentemente simétrica, pois as Perdas Sociais de cada ramo de cada árvore não são necessariamente iguais.

No caso do decisor global ele escolhia a opção que minimizasse a sua Perda Social Esperada (Figura 3.10 do Capítulo 3). No caso de dois blocos de países como seriam feitas as escolhas? Uma vez que ambos tenham feito as análises acima, estão prontos para decidirem que opção de abatimento escolher. Supondo que ambos tomem suas decisões simultaneamente, até esse momento ambos conhecem somente todas as opções de abatimento, mas não conhecem ainda a escolha efetiva do outro. Essas decisões serão reveladas a ambos somente quando cada um tomar efetivamente a sua decisão. Essa situação social denomina-se, em TJ, jogo simultâneo ou de informação imperfeita, pois cada jogador não conhece a decisão do outro até o momento de ambos manifestarem suas decisões simultaneamente. A matriz na Figura 6.3 denomina-se representação em forma normal de um jogo. Para ilustrar o método de tomada de decisão em um jogo como o da matriz da Figura 6.3, consideremos um exemplo numérico daquela matriz (Figura 6.6). Para

		Bloco B	
		μ_{B1}	μ_{B2}
Bloco A	μ_{A1}	(10, 12)	(7, 9)
	μ_{A2}	(8, 10)	(5, 7)

Figura 6.6: Exemplo numérico do jogo da Figura 3. A matriz indica as possíveis estratégias de abatimento de emissões e as conseqüências, em termos de perdas sociais, de cada par de escolhas. Cada jogador conhece todas essas possibilidades, mas somente conhecerá a ação escolhida pelo outro no momento em que o jogo é efetivamente jogado.

fixar idéias suponhamos que os custos de abatimento são constantes e iguais em ambos os blocos. As perdas sociais serão diferenciadas somente pelos danos climáticos em cada país. Quanto maior for a redução total menores serão os danos e, portanto as perdas

Figura 6.5: Diagrama de influência para um nó de decisão que é uma negociação sobre cotas de abatimento de emissões. O diagrama é uma generalização daquele do Capítulo 4, de decisão individual. Notemos os nós de acaso comuns aos dois agentes, relativos ao sistema do clima e os nós de acaso específicos de cada país.

totais de cada bloco. Como $\mu_{A1}(k) < \mu_{A2}(k)$ e $\mu_{B1}(k) < \mu_{B2}(k)$, as perdas apresentariam um padrão como o da Figura 6.6. Como cada Bloco deveria escolher a sua estratégia? O Bloco A considera que se o Bloco B escolher a estratégia $\mu_{B1}(k)$ a sua melhor resposta seria escolher $\mu_{A2}(k)$, pois nesse caso a sua perda (8) seria menor do que se escolhesse $\mu_{A1}(k)$ com perda (10). Por outro lado, se B escolhesse $\mu_{B2}(k)$ a melhor resposta de A seria escolher $\mu_{A2}(k)$, pois com esta escolha A teria uma perda menor (7). Assim, independentemente da escolha de B a melhor resposta de A será a estratégia $\mu_{A2}(k)$. De outra parte, o Bloco B raciocina de forma semelhante: se A escolher $\mu_{A1}(k)$ então para B a melhor escolha seria $\mu_{B2}(k)$, que lhe daria uma perda (9) menor do que se escolhesse $\mu_{B1}(k)$ com perda (12). E se A escolhesse $\mu_{A2}(k)$ a melhor resposta de B seria a estratégia $\mu_{B2}(k)$. Assim, independentemente da escolha de A, a melhor resposta para B é a estratégia $\mu_{B2}(k)$. Portanto, ambos escolherão o par $\{\mu_{A2}^*(k); \mu_{B2}^*(k)\}$ no qual cada um dá a melhor resposta à escolha do outro, com perdas (5, 7). Essa solução é um equilíbrio estável, pois nenhum jogador tem incentivo para deixar a sua posição no jogo, ao preço de ficar em uma situação pior, com uma perda social maior.

Esse exemplo é muito simples, mas na situação mais geral na qual os números de estratégias de cada Bloco diferem entre si, e os custos de abatimento não são constantes podendo também ser diferentes para cada Bloco, a matriz deixa de ser trivial. Por exemplo, a matriz da Figura 6.7 tem um equilíbrio de Nash, no qual o jogador A não obteve a menor perda possível do jogo, mas está em uma posição que é a sua melhor resposta a qualquer estratégia de B. Os princípios que norteiam as escolhas, porém, continuam iguais. Cada jogador procurará dar a melhor resposta às escolhas do outro.

Quando os agentes decidem qual opção escolher eles devem levar em consideração não somente seu objetivo de minimizar suas próprias perdas, mas também que o outro bloco tem um objetivo semelhante para as suas perdas. Se o Bloco A fosse levar em conta somente sua minimização ele poderia escolher uma opção que não seria vantajosa para o Bloco B, por não ser a melhor opção para este país. Inversamente se o Bloco B escolher

		Bloco B		
		μ_{B1}	μ_{B2}	μ_{B3}
Bloco A	μ_{A1}	(10,12)	(9,13)	(8,15)
	μ_{A2}	(10,11)	(9,12)	(9, 13)
	μ_{A3}	(9,10)	(9,11)	(10,12)

Figura 6.7: Exemplo numérico de um jogo com três estratégias para cada jogador. As funções custos e danos de cada jogador são tais que se os danos diminuem devido a abatimentos maiores, os custos podem em algumas situações compensar essas quedas, de forma que as perdas totais permanecem constantes ou variam pouco ou até aumentam. No exemplo o Equilíbrio de Nash indicado na célula hachurada, par (9, 10), não é a menor perda para A, mas é o melhor conjunto de respostas de A e B a todas as estratégias possíveis de cada um.

uma opção levando em conta a minimização somente de suas perdas, poderia escolher uma opção que não fosse vantajosa para o Bloco A. Se uma dessas situações ocorresse, um dos jogadores ainda não estaria satisfeito e buscaria uma solução que retiraria a vantagem que o primeiro jogador havia conquistado dada a interdependência das ações. Assim, ambos devem escolher um par de opções, dentre o conjunto dos pares possíveis, que satisfaça a ambos simultaneamente. A esse par, se ele existir, denomina-se em TJ, a Solução do Jogo, e no contexto do presente trabalho representa o acordo firmado entre os dois Blocos na COP(k). No caso geral a solução do jogo não corresponderá a uma minimização de ambas

as perdas. Existem vários tipos de solução de um jogo não-cooperativo, mas a solução básica é conhecida como Equilíbrio de Nash.

6.4.4 Equilíbrio de Nash e a Definição de um Acordo Multilateral

Para cada $COP(k)$ definimos um acordo de abatimento de emissões como sendo o Equilíbrio de Nash do jogo não-cooperativo simultâneo que ocorre no momento k . Em termos mais gerais, se temos N agentes jogando um jogo não-cooperativo para abater emissões, então cada jogador deve resolver, no momento k , o seguinte problema:

$$\min_{\mu_{ij}(k)} \sum_{t=k}^{k+HP(k)} \left(C_i(t, \mu_{ij}(k)) + D_i(\sum_n E_n(t)) \right) \delta^{t-k} \quad (6.3)$$

onde $k \leq t \leq HP(k)$, e $HP(k)$ é o horizonte de antecipação, e δ^{t-k} é a taxa de desconto que assumimos ser $\delta^{t-k} = 1$ (Ver Capítulo 1), e $i, j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$, com $m_i(k) \geq 2$ e $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Isto é, cada agente calcula para cada opção de abatimento uniforme $\mu_{ij}(k)$ disponível a ele em k , e para cada opção de abatimento disponível a todos os outros $(N-1)$ agentes, implícitas no cálculo das emissões $E_n(t)$, a somatória projetada desde k até $k+HP(k)$ das Perdas Sociais, que é a soma dos custos de abatimento $C_i(t, \mu_{ij}(k))$ e dos danos climáticos $D_i(\sum_n E_n(t))$. Após calcularem todas as possíveis $m_1(k) \times m_2(k) \times m_3(k) \times \dots \times m_N(k)$ trajetórias de suas Perdas domésticas, cada agente escolherá uma estratégia $\mu_i^*(k)$ que seja a melhor resposta às possíveis estratégias de todos

os outros agentes. Mais exatamente, o conjunto $\{\mu_1^*(k), \mu_2^*(k), \dots, \mu_N^*(k)\}$ deve ser um Equilíbrio de Nash do jogo. Nesta situação nenhum agente terá interesse em se desviar unilateralmente para outra estratégia, pois cada perda social está atrelada à opção de todos os jogadores simultaneamente. O Equilíbrio de Nash é o conjunto das melhores respostas mutuamente benéficas. Um acordo multilateral é definido então pelo Equilíbrio de Nash do jogo com N jogadores.

De acordo com o Princípio de Belmann de caminho ótimo, a solução deste problema pode ser alcançada pelas técnicas da programação dinâmica. A definição acima é um caso particular da definição mais geral, onde as taxas de abatimento podem ser para cada ano diferentes umas das outras. Nessa situação o Equilíbrio de Nash seria um conjunto de seqüências, uma seqüência para cada jogador, de reduções de emissões para cada ano t . É possível provar que se as funções Danos Climáticos e Custos de Abatimento forem convexas, que é o caso das funções do Capítulo 3, então o Equilíbrio de Nash sempre existe e é único (GERMAIN, 2003). Em cada momento k , a solução do problema (2) determina uma família de trajetórias de emissões, uma para cada país P_i , juntamente com a concentração de GEE acumulada na atmosfera até aquele momento. A seqüência de jogos com esta estrutura constitui uma seqüência de Equilíbrios de Nash, e cada um denomina-se Equilíbrio de Nash não-cooperativo com retro-alimentação (feedback) (BASAR; OLSDER, 1995). Em cada jogo, posterior ao primeiro, o estoque de GEE na atmosfera resultante das emissões geradas nos jogos anteriores influencia resultado desse jogo. Este equilíbrio tem a interessante propriedade chamada Perfeição de Markov, na qual continua havendo um Equilíbrio de Nash se avançarmos ou retardarmos o jogo a qualquer ano ou valor das concentrações atmosféricas de GEE (GERMAIN, 2003).

Em geral os estudos sobre o problema expresso na Equação 6.3 assumem implicitamente que o horizonte de planejamento dos custos de abatimento, $hp(k)$, é igual ao horizonte de antecipação $HP(k)$. Aqui estamos supondo que em geral isso não acontece, e por isso, para cada $hp(k) \leq t \leq HP(k)$ os custos na Equação 6.3, serão nulos. Em um novo ciclo de avaliação, em $k+1$, o agente novamente considera os custos para os próximos $hp(k+1)$ anos e assim por diante, sujeito aos vínculos ambientais descritos pelas equações do modelo climático. Além disso, para o presente trabalho, como explicado no Capítulo 4, Seção 4.9, e na Seção simplificaremos a somatória (2) assumindo que $\mu_{ij}(t) = \mu_{ij}(k)$ para todo $k < t \leq k + hp(k)$, e $\mu_{ij}(t) = 0$ para $hp(k) < t \leq HP(k)$, com $i, j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$. Isto é, somente consideraremos um abatimento uniforme desde k até $k+hp(k)$.

6.5 Modelo de uma Seqüência de Negociações sobre Mudança de Clima

6.5.1 O Superjogo do Clima

Quando um acordo internacional é assinado, a possibilidade de que alguns países possam quebrá-lo e se retirarem das negociações ou de não cumpri-lo permanece uma clara possibilidade. Assim, as nações poderiam ser figuradas como tendo repetidas oportunidades de tomar decisões sobre se cooperarão ou não para abater emissões para controlar as mudanças climáticas¹. No contexto do modelo adotado aqui, em cada $COP(k)$ qualquer país P_i têm em princípio, a oportunidade em cada momento k de:

¹ Podemos dizer que os países jogarão uma seqüência de jogos chamados Dilema do Prisioneiro, que expressam a estrutura de decisão entre cooperar e não cooperar com conflitos de interesses (Para detalhes ver (TSEBELIS, 1998).

a) não cooperar, isto é, fazer $\mu_{ij}(k) = 0$ para quaisquer $i, j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$. E para qualquer $k > 1$:

b) retroceder seu nível de cooperação diminuindo a quantidade de abatimento de máxima, ou diminuindo os valores de todas as opções, comparados aos do momento anterior, isto é, $\mu_{ij}(k) < \mu_{ij}(k-1)$ para qualquer $j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$; ou

c) manter o mesmo nível de abatimento, $\mu_{ij}(k) = \mu_{ij}(k-1)$, ou

d) aumentar o nível mínimo, ou todos os valores das opções de abatimento relativamente ao PDC anterior, $\mu_{ij}(k) > \mu_{ij}(k-1)$, para qualquer $j = 1, 2, 3, \dots, m_i(k)$.

O conjunto de opções de abatimento depende, como modelado no Capítulo 5, do nível de risco de um impacto climático perigoso, e do nível máximo suportável pelo país dado seu plano de desenvolvimento. Dessa forma, não é imediato qual será a atitude de um país, em cada momento k , já que o sistema é complexo, com vários elos e relações cruzadas.

Seqüências de jogos simultâneos que se repetem são estudados pela Teoria dos Jogos Repetidos (TJR), com o seu número podendo ser infinito ou indefinido, e uma seqüência é denominada Superjogo. Essa abordagem é um ponto de partida adequado para estudar as negociações das mudanças climáticas. Na literatura de TJR aplicada às mudanças climáticas a seqüência de jogos é denominada de Superjogo do Clima. A seguir desenvolvemos um quadro conceitual inspirado da TJR, com algumas alterações em terminologia e estrutura para adequar os conceitos e formalismo ao propósito de modelar a seqüência de COP no RClima. Indicamos também as principais diferenças entre as duas abordagens.

A idéia básica da TJR é que os jogadores escolhem suas estratégias de forma a minimizar a soma de suas perdas ao longo do tempo tendo em vista as estratégias dos outros países ao longo da seqüência. Uma estratégia em um Superjogo consiste em um plano de como jogar os jogos futuros, dado o padrão de resultados dos jogos passados. A ação coletiva cooperativa chave nos Superjogos é a possibilidade de um jogador fazer a escolha de cooperação condicionada à cooperação passada dos outros jogadores. Se os outros não cooperaram no passado, isto pode disparar uma retaliação na forma de recusa em continuar a cooperar no futuro. Estratégias cooperativas deste tipo incorporam ameaças. Se a penalidade é grande o suficiente, ela pode forçar os outros a cooperarem. É importante que as ameaças sejam críveis, o que coloca restrições sobre as estratégias plausíveis e sobre os equilíbrios. Apesar de sua simplicidade o modelo do superjogo fornece algumas idéias úteis ao problema das mudanças climáticas. Uma das principais conclusões do modelo do superjogo aplicado às mudanças climáticas é a identificação do fator de desconto e das incertezas sobre benefícios futuros como as causas prováveis de um baixo nível de cooperação. A seguir desenvolveremos um modelo de seqüência de negociações como um Superjogo cujo tema é distribuir cotas de reduções de emissões, mas que será modificado com relação ao cálculo da seqüência de estratégias, e não conterà ameaças, por não tratarmos aqui de jogos cooperativos. A questão da interação das incertezas com mecanismos de retaliação e custos de não conformidade merece um tratamento à parte dada sua complexidade.

6.5.2 O Superjogo Não-Cooperativo do Clima Simplificado

Consideremos N países, P_i , $i = 2, 3, \dots, N$, que fazem parte do RClima. Então eles se encontram regularmente para negociar metas de reduções de emissões de GEE. Representamos a sequência de COP(k), por uma sequência de jogos não-cooperativos e os acordos finais de cada COP(k) como o Equilíbrio de Nash do jogo em k . Seguindo a nomenclatura da TJR, cada um desses jogos é denominado Jogo Estágio, e ao jogo COP(k), denominaremos jogo estágio em k (BASAR; OLSDER, 1995).

Cada jogador tem em cada momento k um conjunto $\mu_i(k) = \{\mu_{ij}(k)\}$, $j = 2, 3, \dots, m_i(k)$, com $m_i(k) \geq 2$, de opções estratégicas de abatimento de emissões para o PDC(k) subsequente ao jogo COP(k). Chamaremos ao conjunto $\mu_i(k)$, Perfil de Estratégias do governo P_i . Como vimos nos Capítulos 3 e 4 esse conjunto pode ser representado graficamente por uma árvore de decisões para cada agente. Como discutido no Capítulo 4, Seção 4.9, somente estamos considerando o primeiro estágio das árvores de decisões. Denominamos ao conjunto dos perfis de estratégias, para um momento k , Perfil de Estratégias da COP(k), o qual denotamos por $\mu(k)$, tal que $\mu(k) = \{\{\mu_{1j_1}(k)\}, \{\mu_{2j_2}(k)\}, \dots, \{\mu_{Nj_N}(k)\}\}$, onde cada índice $j_1, j_2, j_3, \dots, j_N = 2, 3, \dots, m_i(k)$ percorre o respectivo perfil de estratégias de cada país, no momento k . O perfil de estratégias no exemplo acima dos Blocos de países A e B, é o conjunto $\{\{\mu_{A1}(k), \mu_{A2}(k)\}, \{\mu_{B1}(k), \mu_{B2}(k)\}\}$. Para uma sequência finita de COP podemos definir o Perfil de toda a Sequência de COP como o conjunto de perfis de estratégias de cada COP(k) e denotarmos por μ , tal que $\mu = \{\mu(k_0), \mu(k_0 + \Delta\tau), \mu(k_0 + 2.\Delta\tau), \dots, \mu(k_0 + p.\Delta\tau)\}$, $p \geq 1$.

Em geral na TJR assume-se que cada jogo estágio é idêntico a todos os outros da sequência.. Isto é, assume-se que o perfil de ações $\mu(k)$ não muda ao longo do tempo, e as perdas sociais associadas a cada estratégia permanecem as mesmas ao longo de toda a sequência. Isto significa que são jogadas várias vezes cópias idênticas de um mesmo jogo com o mesmo perfil de estratégias e perdas. Essa sequência estacionária de jogos repetidos não é uma representação adequada de uma possível sequência de negociações em mudança climática, pois ela exclui o elemento aprendizagem da sequência, além da própria mudança do clima, que são de fundamental importância nas negociações reais e que podem alterar continuamente o perfil de estratégias e as Perdas Sociais associadas. Existem abordagens na TJR com superjogos que envolvem aprendizagem, mas não as abordaremos aqui (BASAR; OLSDER, 1995).

No presente modelo admitimos a mudança dos perfis de estratégias de cada país, em cada momento de decisão k , como explicado no Capítulo 2, Seção 2.8.2. Além disso, como vimos naquela Seção, os valores mínimo e máximo do conjunto de estratégias pode mudar ao longo do tempo, e em consequência os seus valores intermediários (Ver também Figura 2.10). No contexto presente isso significa que não temos, rigorosamente falando, o mesmo jogo estágio em cada momento k , pois o perfil de estratégias de cada jogo estágio pode ser diferente. A cada momento k , uma nova $COP(k)$, diferente de todas as anteriores, pode ocorrer e a sua peculiaridade pode vir das seguintes fontes: a) do estado da natureza determinado pelas mudanças climáticas pela vulnerabilidade de cada região e pela estrutura de custos de mitigação de cada economia; b) do estado do conhecimento científico, isto é, seu grau de incerteza, sobre o clima, sobre a distribuição de vulnerabilidades e sobre custos de abatimento.

Na TJR cada jogador conhece desde o primeiro jogo estágio o Perfil da Sequência de jogos e pode calcular todas as possíveis seqüências de ações e ganhos para cada caso e já nesse primeiro jogo é capaz de escolher a seqüência de ações para toda a seqüência de jogos que produz um Equilíbrio de Nash. No modelo integrado desenvolvido aqui as evoluções do conhecimento científico e das mudanças climáticas são reveladas paulatinamente aos agentes, e, portanto não faz sentido um conhecimento prévio do perfil de toda seqüência de COP e cada governo somente conhece o Perfil de Estratégias de uma COP(k) no momento k. No modelo da seqüência de COP, cada jogador, em cada momento k, trás para o ambiente de negociações um novo conjunto de informações e expectativas sobre as mudanças climáticas e seus impactos, e por isso as suas opções de abatimento e as perdas associadas serão diferentes em cada COP. A cada agente é dada a flexibilidade de rever suas crenças e projetar um futuro diverso do que havia suposto na COP anterior. Cada momento de negociação é uma nova situação social, no qual o agente deve refazer todas as suas análises usando sua metodologia e escolhendo sua estratégia de abatimento em função de um novo Perfil de Estratégias de todos os outros países.

6.5.3 Histórias e Estratégias das Negociações

As posições de um governo em uma negociação e seu desempenho no cumprimento de um acordo, em geral, influenciam as posições de outros países nas negociações seguintes. A reputação, por exemplo, é um dos elementos chave em um processo internacional. A TJR aborda este aspecto com o conceito de história de uma seqüência de jogos. Consideremos esse conceito aplicado à seqüência de COP. Mais precisamente, definimos uma história no momento k, por:

$$h(k) = (\mu^*(1), \mu^*(2), \dots, \mu^*(k)) \quad (3)$$

isto é, uma história desde o início da seqüência na COP(1) até a COP(k) é a seqüência de conjuntos de ações $\mu^*(k) = \{\mu_i^*(k)\}$ de abatimento escolhidas, como Equilíbrios de Nash, em cada jogo anterior à COP(k) e nessa COP. Notemos que a especificação de uma historia $h(k)$ inclui todas as histórias prévias, $h(1)$, $h(2)$, ... $h(k-1)$ por simples concatenação. Por exemplo, em uma seqüência que começou no ano 2000 a história $h(2040)$ será a concatenação da história até 2030 com as ações acordadas naquele ano, $\mu(2030)$, isto é, $h(2040) = (\mu(2030); h(2030))$. Se a seqüência terminar em 2100, a história de toda a seqüência de jogos será $h(10) = (h(1), h(2), \dots, h(9))$. Pelas definições prévias do RClima, uma história é a história dos Protocolos desde o Protocolo de Quioto até o Protocolo(k).

O condicionamento das estratégias dos jogadores aos eventos passados significa fazê-las funções da história das negociações. Podemos então escrever cada estratégia em uma COP(k), de um jogador P_i , como uma função s_{ij}^k tal que $\mu_{ij}(k) = s_{ij}^k(h(k))$. Cada uma destas estratégias seria uma opção disponível ao agente na COP(k) se os jogos prévios seguiram a história $h(k)$. Notemos que a historia é comum a todos os jogadores.

Os agentes que desenvolvemos nos capítulos anteriores já estão dotados parcialmente de memória. No Capítulo 2, por exemplo, permitimos a cada agente registrar e formar uma série temporal de algumas variáveis de seus modelos (Ver Figura 2.6). Além disso, as Regras expostas naquele capítulo, para mudança de horizonte de planejamento e antecipação, bem como as Regras para a mudança de opções de mitigação, que definem os valores máximo e mínimo de abatimento para um PDC, também implicam em dotar os

agentes de uma memória, já que sempre fazem referência a horizontes e opções do período anterior. A vinculação das opções estratégicas à história dos jogos anteriores, complementar as vinculações previamente feitas, de caráter epistêmico, pois poderia introduzir aspectos políticos. Para o presente trabalho, entretanto, não aprofundaremos esta questão, embora ela seja de extrema relevância para a exploração de possíveis desdobramentos da sequência de negociações baseados nos acordos anteriores bem como nas questões relativas à reputação de países que não cooperaram ou não cumpriram seus compromissos de um ou mais países dentro do RClima.

6.5.4 Na Mesa de Negociações: Jogos Climáticos com Incertezas

Quando os países vão à mesa de negociações para definir cotas de reduções de emissões de GEE, pressupõe-se que já realizaram suas análises e projeções em maior ou menor grau de detalhe e precisão, tendo um conjunto de cenários de aquecimento global e avaliações dos impactos climáticos em seus países, com graus variados de incerteza e ignorância. As incertezas sobre o clima global são fornecidas pelo corpo científico internacional, que através do IPCC, tem o caráter de informação compartilhada por todos os países. Existe um fundo de conhecimento comum, mas também de incertezas comuns sobre o clima global, sob as quais as negociações se travam. Por outro lado, cada nação terá incertezas em seu conhecimento sobre a vulnerabilidade e os custos dos outros países, bem como sobre a aversão ao risco de cada um deles às ameaças das mudanças climáticas. Isso acarreta incertezas sobre a posição que os outros países terão na negociação.

De acordo com o modelo adotado aqui cada país antecipa as posições dos outros sobre o quanto cada um estaria disposto a abater de suas emissões e procura dar a melhor

resposta de abatimento, tendo em vista aquelas opções. Nesse modelo os agentes não têm incertezas sobre as opções dos outros países e de qual seria a sua escolha final. Estratégias sem incertezas são denominadas em TJ estratégias puras. Se todos os países agem da mesma maneira e as crenças de cada um sobre as escolhas dos outros são corretas, então o jogo tem um Equilíbrio de Nash. A realidade das interações entre os países mostra, ao contrário, que esse não é o caso. Cada país, além das incertezas acima, tem incertezas, em maior ou menor grau, com relação aos outros países, e não sabe com clareza quais são as suas opções estratégicas. Em geral, muitos países escondem essas opções, e as negociações movem-se em uma rede complexa de manobras (TSEBELIS, 1998). Existem estudos tais como (HELM, 1998), que investigam o uso estratégico das incertezas sobre o clima e seus impactos por parte dos países. A idéia básica é a de que um país pode tentar esconder dos outros, informações sobre seus custos, usando aquelas incertezas como véu para encobrir suas verdadeiras possibilidades de reduções de emissões, e dessa forma postergar um envolvimento maior no acordo. O objetivo básico do país seria adiar esse custo, baseado, por exemplo, em seu receio de perder competitividade para outros países também engajados no processo. Embora relevante, não entremos nos detalhes deste tipo de análise.

A situação de uma negociação real é extremamente complexa, envolvendo todos os tipos de incertezas, (espistêmicas, aleatórias e reflexivas; ver Capítulo 1), e um projeto de modelagem que buscasse representar alguns de seus elementos foge do escopo deste trabalho. Entretanto podemos apontar um caminho inicial de modelagem dessa situação através do conceito da TJ de estratégias mistas. A idéia básica é que cada jogador pode estar inseguro sobre qual será a escolha que um outro jogador fará, dentre as suas estratégias puras, mas pode ter graus de crença ou probabilidades subjetivas associadas à escolha de cada uma daquelas estratégias. Por exemplo, no jogo da Figura 6.3, o Bloco A

pode estar inseguro quanto a qual estratégia o Bloco B escolherá, atribuindo graus de crença a cada escolha, digamos, p para a opção $\mu_{B1}(k)$ e $(1-p)$ à opção $\mu_{B2}(k)$. Analogamente, o Bloco B atribui a probabilidade q para a opção $\mu_{A1}(k)$ e $(1-q)$ para a opção $\mu_{A2}(k)$. Em TJ denomina-se estratégia mista a cada uma das combinações $[p \cdot \mu_{B1}(k) + (1-p) \cdot \mu_{B2}(k)]$ e $[q \cdot \mu_{A1}(k) + (1-q) \cdot \mu_{A2}(k)]$. Apesar do jogador de cada Bloco estar inseguro quanto à estratégia que o outro jogador escolherá, pode estar certo sobre a sua estratégia mista. Quando cada jogador atribui as probabilidades corretas às escolhas dos outros jogadores temos um Equilíbrio de Nash para estratégias mistas, que generaliza a definição anterior para estratégias puras.

Em um ambiente de cascatas de incertezas, como aquele modelado neste trabalho, podemos completar a representação das negociações em mudanças climáticas incluindo estratégias mistas no interior dos jogos. Estas incertezas “interiores” podem ser vinculadas às incertezas “exteriores”, através de regras que exibissem conexões hipotéticas ou empíricas, integrando o modelo, e representando dessa forma, ainda que de maneira caricatural, a cascata de incertezas presente em mudanças climáticas globais. Esse empreendimento, entretanto, foge do propósito do presente trabalho, e é apontado como um projeto que pode ser realizado futuramente.

6.6 Conclusão: Síntese do Modelo

Sinteticamente, cada governo, P_i , resolve o problema da Equação 6.3, em cada momento de negociação k , considerando todas as combinações de estratégias de abatimento

de todos os países envolvidos na negociação. Ele faz isso usando sua metodologia Φ_i e, usando o tratamento das incertezas com diagramas de influência (Figura 6.5), calcula os valores esperados de seus custos de abatimento e de seus danos esperados, baseado nas distribuições de probabilidades que lhe são informadas em k . Ele obtém a Perda Social Esperada, com uma variância $\sigma^2(k)$, para cada conjunto de combinações dos N países.

Em cada COP(k) todos os governos conhecem todas as opções de abatimento de cada país e o valor de cada Perda Esperada para cada combinação de opções. Todos buscam a melhor resposta às opções dos outros países, e todos acreditam que cada um age da mesma maneira. Se essas crenças são corretas o jogo tem um Equilíbrio de Nash, que define o acordo de reduções de emissões na COP(k). Este equilíbrio é estável, no sentido de que nenhum país tem interesses de mudar unilateralmente de posição. Nesses sentido, o modelo representa a cooperação possível em mudanças climáticas dado o auto-interesse de cada país.

Capítulo 7

Primeiros Experimentos de Simulações e Análises de Sensibilidade para Investigar o Papel das Incertezas nas Negociações.

7.1 – Introdução

Neste capítulo descrevemos algumas simulações preliminares de cenários de evolução das incertezas de mudanças climáticas para investigarmos a sua influência sobre a capacidade das negociações evitarem impactos climáticos perigosos. Para isto, primeiramente, exibimos a estrutura de um protótipo que desenvolvemos para implementar uma versão simplificada do modelo construído nos capítulos anteriores. O protótipo está ainda em testes, mas foi desenhado para simular seqüências de negociações de dois agentes, que podem representar dois países, ou dois blocos de países, tais como os países do Anexo I da Convenção do Clima e os países em desenvolvimento. Por brevidade os denominaremos a seguir estes dois agentes por Bloco Norte (N) e Bloco Sul (S). Cada agente está equipado com os recursos de observação, análise e decisão, desenvolvidos nos capítulos anteriores. Depois, descrevemos a estratégia de simulação adotada, e o roteiro para realizar cada simulação. Em seguida descrevemos e analisamos os resultados de cada grupo de simulações. E finalmente, a partir dessas análises damos uma resposta provisória à nossa principal pergunta formulada na Introdução. A provisoriedade da resposta é inevitável dada a complexidade que se revelará existir mesmo em situações simples analisadas a seguir e as limitações do modelo e do protótipo até aqui desenvolvido. Entretanto pretendemos mostrar o potencial que a abordagem aqui adotada tem de oferecer respostas mais robustas.

7.2 Descrição Resumida do Protótipo

7.2.1 A Simplificação do Modelo a sua Implementação no Proclin

Apesar do modelo construído nos capítulos anteriores ser relativamente simples, existe uma quantidade de variáveis e relações que mesmo em uma análise do comportamento de poucos países, por exemplo, cinco ou dez, seria muito fácil se perder no conjunto de relações e retro-alimentações. A dificuldade maior não está na programação, mas na análise dos resultados das simulações, pois seria necessário analisar e comparar os comportamentos de muitos países e em uma primeira abordagem não seria uma tarefa frutífera. É importante ter clareza sobre o que ocorre em casos simples para depois abordar os mais complicados. Essa estratégia também ajuda no aperfeiçoamento da comunicação dos resultados de simulações que sejam úteis aos tomadores de decisões. Uma outra dificuldade em programar o caso geral desde o início refere-se ao algoritmo para buscar Equilíbrios de Nash em um jogo com mais do que dois países. Esse algoritmo não é simples e embora existam muitos programas disponíveis para fazer esta busca, teríamos que codificá-lo no interior do protótipo para integrá-lo aos demais módulos (DICKHAUT; KAPLAN, 1991). Esse trabalho adicional não nos ajudaria muito em uma primeira fase já que é importante tratar primeiro os casos simples. Por isso, preferimos implementar inicialmente uma versão simplificada do modelo considerando somente dois agentes.

O protótipo desenvolvido, embora simples, é muito útil para esclarecer alguns aspectos do problema da interação entre incertezas e as negociações e para nos guiar em uma programação futura com um número bem maior de países. Denominamos esse programa Protótipo para Simular Cenários de Incertezas nas Negociações Climáticas e o apelidamos de Proclin. A seguir descrevemos resumidamente a estrutura do Proclin e seus

recursos para alcançar nosso objetivo. Anexado ao presente texto existe um CD-Room com uma cópia do Proclin para ser eventualmente explorado e analisado pelo leitor. Visando dar acesso ao conteúdo do protótipo para um conjunto amplo de pessoas interessadas no tema deste trabalho desenvolvemos o Proclin na plataforma Microsoft Excel® por ser uma ferramenta muito difundida e por isso de fácil uso. Além disso, o Protótipo tem uma arquitetura aberta que pode ser acessada para uso, análises, críticas e aprimoramentos a uma ampla comunidade de pessoas interessadas.

O Proclin é uma ferramenta que pode ser muito útil também para comunicar conceitos e problemas sobre o tema das mudanças climáticas a especialistas de diferentes áreas e a não especialistas. A riqueza de gráficos dinâmicos permite usar o Proclin no ensino sobre o tema das mudanças climáticas, em aulas ou seminários, podendo fazer várias simulações simultâneas às discussões com uma platéia, tornando a exposição dinâmica. Apesar de todas as suas limitações, ele traz uma contribuição também na busca de integração das disciplinas que estudam o problema das mudanças climáticas, pois fornece uma visão integrada dos aspectos climáticos, econômicos e políticos do problema. E finalmente, seu uso faz surgirem muitas sugestões interessantes para pesquisa e modelagens integradas futuras, que poderão aprimorar nossa compreensão sobre o tema das mudanças climáticas, pois evidencia lacunas em nosso conhecimento sobre vários aspectos importantes do tema aqui estudado.

7.2.2 O Objetivo do Protótipo

O Proclin é um programa de computador desenvolvido para fazer simulações exploratórias visando responder à seguinte pergunta chave:

Que cenários de evolução de incertezas em quatro parâmetros

- Sensibilidade climática (SC)
- Difusividade térmica oceânica (DO)
- Índice de vulnerabilidade (ALFA)
- Índice de custos de abatimento (BETA)

produzem seqüências de negociações entre dois Blocos de Países, sobre redução de emissões, que evitam danos climáticos perigosos neste século, nos dois ou em pelo menos um desses Blocos?

Essa pergunta chave é a versão de nossa pergunta principal exposta na Introdução do trabalho, adaptada aos recursos do Proclin desenhados para fazermos simulações de cenários de incertezas. Se respondermos a essa pergunta teremos respondido, ainda que parcialmente, à pergunta principal deste trabalho de pesquisa. Uma programação e simulação do caso geral com muito países poderá seguir a mesma linha de abordagem levando-nos à resposta final.

7.2.3 Os Recursos do Proclin

Para a construção do Proclin implementamos todos os conceitos e equações expostos nos capítulos anteriores restringidas à situação de dois agentes. Para o tratamento das incertezas, consideramos três casos possíveis de Sensibilidade Climática e três de

Difusividade Térmica do Oceano, usando as categorias Baixa, Média e Alta. Para a vulnerabilidade climática, visando fazer análises de sensibilidade, adotamos cinco categorias, Baixa, Média Baixa, Média, Média Alta e Alta. E para os custos de abatimento escolhemos três categorias, Baixos, Médios e Altos. O resultado final do trabalho de desenvolvimento do Proclin nos levou a um programa que nos permite fazer vários tipos de sondagens sobre as relações funcionais das grandezas constituintes do modelo integrado exposto nos capítulos anteriores, que vão além da resposta à pergunta acima. Com o Proclin podemos:

a) Fazer projeções de todas as grandezas que variam no tempo: PIB, intensidade de carbono, emissões, concentrações atmosféricas, forçamento radiativo, elevações de temperaturas globais de equilíbrio e realizada, danos climáticos, danos evitados, custos de abatimento, benefícios líquidos presentes e perdas sociais totais. Essas são projeções da metodologia dos agentes e podem ser feitas para horizontes de tempo que variam de 10 a 100 anos e levam em consideração cada par de opções de abatimento, uma para cada agente, incluindo o caso Linha de Base (BAU). Todas as trajetórias projetadas foram feitas conforme o arcabouço exposto no Capítulo 5 sobre Diagramas de Influência.

b) Configurar distribuições de probabilidades para representações contínuas e discretas das incertezas, com as quais se podem simular cenários de evolução de incertezas dos parâmetros incertos e fazer análises de sensibilidade.

d) Calcular os valores médios (esperados) e das variâncias de cada grandeza incerta e visualizar em tabelas dinâmicas a sua evolução no tempo. São feitas projeções futuras para os valores esperados considerando-se três opções de abatimento para cada bloco, com um total de nove trajetórias por jogo e com horizontes de tempo variáveis.

b) Cálculos seqüenciais que simulam as regras de mudança de horizontes de antecipação e planejamento variáveis, bem como das opções de abatimento mínimas, máximas, e intermediárias. Cada jogo da seqüência tem como entrada novas estratégias de abatimento geradas pelas regras expostas nos Capítulos 2 e 5.

e) Um buscador simples de Equilíbrios de Nash de um jogo com dois jogadores, e um simulador de seqüências de jogos.

f) Um sistema de detecção simples das aproximações sucessivas de um limiar de danos perigosos como definidos no Capítulo 5.

g) Cálculos seqüenciais de evolução de todas as variáveis temporais do Meio Ambiente de Base, (clima e economias) na medida em que as negociações evoluem, formando simultaneamente a resposta desse meio e o registro histórico das observações de cada país.

A idéia básica do Proclin é permitir, mediante toques sucessivos de uma tecla (F9) observar a evolução de qualquer variável temporal do modelo através de gráficos e tabelas dinâmicas. Cada toque da tecla F9 marca um momento de negociação (ou decisão). Em um único momento (toque) o Proclin executa todas as projeções de cada agente, e computa as histórias até aquele momento, fornecendo o resultado da negociação que ocorre naquele momento. A entrada principal de cada simulação é um cenário de evolução das incertezas

Figura 7.1: As entradas do Proclin são seqüências de distribuições de probabilidades representando cenários de evolução das incertezas (ver, por exemplo, planilha ProbDiscreta_Clima). A saída principal é uma seqüência de pares de acordos de abatimento de emissões ao longo do Séclo XXI (ver a planilha Acordos Globais). Essa seqüência pode ser obtida passo a passo, mediante toques sucessivos da tecla F9. Existem várias informações adicionais que acompanham esta seqüência. Detalhes no texto.

dos parâmetros acima, construído pelo usuário, e a saída principal é uma seqüência de pares de metas negociadas de reduções de emissões, uma para cada Bloco de países, desde a primeira negociação no ano 2000 até a última em 2100 (Figura 7.1). Acompanhando essa saída o Proclin produz várias projeções e registros que podem ser colhidos e analisados, ou simplesmente acompanhados visualmente mediante gráficos. Uma vez realizada uma configuração de evolução de incertezas pode-se simular repetidas vezes a mesma seqüência pela simples repetição de toques da tecla F9. No Proclin ver a Planilha TESE, onde pode ser vista a relação entre o texto do presente trabalho e as planilhas do protótipo.

7.3 O Meio Ambiente de Base e as Categorias dos Estados de Incerteza

O primeiro passo para fazermos as simulações no Proclin é definirmos as categorias os parâmetros utilizados para descrever os estados do Meio Ambiente de Base. Essas informações estão nas Tabelas 7.1 e Tabela 7.2.

Parâmetros Climáticos e Categorias¹						
Parâmetro	Categoria	Intervalo	Parâmetro	Categoria	Valor (anos)	COD
SC	BAIXA	1,5°C – 2,5 °C	(1/DO)	BAIXA	120	BB
				MÉDIA	80	BM
				ALTA	40	BA
SC	MÉDIA	2,51 °C -3,5°C	(1/DO)	BAIXA	120	MB
				MÉDIA	80	MM
				ALTA	40	MA
SC	ALTA	3,51°C - 5,5°C	(1/DO)	BAIXA	120	AB
				MÉDIA	80	AM
				ALTA	40	AA

Custos e Vulnerabilidade – Parâmetros e Categorias					
Custos de Abatimento - BETA²			Vulnerabilidade - ALFA³		
Categoria	Índice (%)	COD	Categoria	Índice (%/oC)	COD
BAIXO	0,0884	CB	BAIXA	0,0041	VB
MÉDIO	0,2550	CM	MÉDIA-BAIXA	0,0111	VMB
ALTO	0,4216	CA	MÉDIA	0,0180	VM
			MÉDIA-ALTA	0,0249	VMA
			ALTA	0,0319	VA

Tabela 7.1: Dicionários das categorias utilizadas para os Modelos do Clima, Custos e Vulnerabilidades.

¹ Ver Planilhas SC_ProbDiscreta e DO_ProbDiscreta no Proclin.

² Ver planilhas CustosA_ProbDiscreta e CustosB_ProbDiscreta no Proclin.

³ Ver planilhas DanosA_ProbDiscreta e DanosB_ProbDiscreta no Proclin.

Sistema Econômico e Emissões⁴		
Calibração	Valores	Unidades
PIB Inicial (2000)	5-40	Trilhões de US\$ ⁵
Taxa Cresc. do PIB	3 - 5	% / ano
Intensidade Carbono	0,6	tC / US\$ / ano
Tx. Mudança Natural Intensidade Carbono	0,3	% / ano

Tabela 7.2: Valores dos parâmetros usados para as simulações. Foram escolhidos alguns valores de PIB e de Taxa de crescimento dentro dos intervalos indicados para fazer análise de sensibilidade. Detalhes na Seção 7.4.2.

Adotamos a seguinte nomenclatura para representar as categorias no meio ambiente de base e no meio ambiente das incertezas. Por exemplo, se o meio ambiente de base for tal que a SC é Baixa e a DO for Alta, representamos por BA. Se a vulnerabilidade de um país for tal que ALFA é Alto, indicamos por VA. Se os custos de abatimento nesse país forem tais que BETA é Médio, indicamos por CM. Os outros casos podem ser vistos na Tabela 7.1. Assim, por exemplo, uma configuração possível para um mundo de dois países poderia ser: BBVMCB, para SC Baixa, DO Baixa, ALFA Médio e BETA Baixo, para um dos países e para o outro país BBVACB para SC Baixa, DO Baixa, ALFA Alto e BETA Baixo. Notemos que as configurações do clima global devem ser iguais, pois o Sistema do Clima é único. Cada categoria do meio ambiente de base está associada a um valor único e certo que caracteriza o meio ambiente de base, que é o valor extremo superior dos intervalos na Tabela 7.1. Assim, por exemplo, SC Alta representa exatamente o valor $SC = 5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Um agente em cada momento de decisão tem uma representação da configuração do seu ambiente de base, que será expressa pela mesma notação. Assim, por exemplo, um governo, baseado nas informações de seu ambiente informacional, pode ter como melhor

⁴ Ver planilhas “Economias e Perdas” e “FEmissões” no Proclin.

⁵ Para os cálculos dos PIB usamos US\$ de 2006.

estimativa para o ambiente de base a configuração AAVMCA, isto é que SC é Alta, DO é Alta, a vulnerabilidade de seu país é Média e seus custos de abatimento são Altos. Estas categorias estão baseadas nos valores esperados calculados a partir das distribuições de probabilidades de cada parâmetro e na divisão em subintervalos conforme descrita no Capítulo 5.

Por um estado de incerteza de um agente em um certo momento de decisão nós entenderemos um par de configurações onde um deles refere-se à configuração do meio ambiente de base, e a outra à crença do agente sobre a configuração do meio ambiente de base. Usando os exemplos dados acima, teríamos para um dos países BBVMCB para o seu meio ambiente de base e poderíamos ter, por exemplo, AAVMCA para a crença desse país sobre esse meio ambiente. O par BBVMCB e AAVMCA caracteriza o estado de incerteza desse agente nesse momento. O outro país teria um meio ambiente descrito por BBVACB e uma representação desse meio poderia ser, por exemplo, AAVBCB. Esse par de configurações caracterizaria o estado de incerteza desse último agente. Notemos que os agentes têm um mesmo modelo climático e por isso existe igualdade nas crenças sobre a configuração do clima (AA). A diferença entre as configurações do meio de base de cada país e as respectivas crenças representa a discrepância entre o melhor conhecimento disponível ao agente na época, sobre o seu meio ambiente de base, e a configuração que é “de fato” a que caracteriza aquele ambiente. A configuração do meio ambiente de base não muda em uma simulação. Entretanto as configurações dos agentes sobre o meio podem mudar devido à evolução das incertezas. Em geral as distribuições de probabilidade

evoluirão em direção à configuração do meio ambiente de base, representando a diminuição das incertezas.⁶

7.4 Estratégia de Simulações

7.4.1 O “Espaço” das Simulações e as Velocidades de Evolução das Incertezas

Uma dimensão qualitativa importante que deve determinar o comportamento dos agentes é a velocidade de variação das incertezas. Dividimos os cenários de evolução de incertezas de cada um dos quatro parâmetros, (SC, DO, ALFA, BETA), em duas categorias: evolução rápida (R), e evolução lenta (L). Como estas incertezas são por hipótese epistêmicas, (Ver Capítulo 1, Seção 1.7.2), elas podem ser reduzidas e a questão importante se reduz a sabermos qual é a velocidade dessa redução. A taxa temporal média de variação da variância associada a uma distribuição de probabilidades representa bem essa velocidade.

Como estamos supondo que os quatro parâmetros são independentes, suas variâncias podem mudar independentemente umas das outras e teríamos quatro dimensões e suas combinações a explorar no que se refere à influência da evolução das incertezas sobre as decisões de cada agente. A fim de podermos realizar simulações que sejam informativas é importante analisar alguns casos simples e por isso decidimos considerar que as variâncias da SC e da DO diminuem com a mesma velocidade. Essa hipótese significa que a ciência que estuda a interação do Oceano com a Atmosfera evolui de forma integrada. É

⁶ É possível que um aumento de pesquisa sobre uma área problema leve a um aumento de incertezas. Não consideraremos esta possibilidade aqui, mas é perfeitamente possível simular tais situações com o Proclin.

razoável supor que vários tipos de estudos sobre o clima, e em especial os modelos acoplados Oceano-Atmosfera (MCGOA), possam progredir mais ou menos ao mesmo tempo dada a grande rede de cientistas nessa área que cooperam intensamente com trocas de informações. Dessa forma, reduzimos as duas dimensões das velocidades de mudanças das incertezas da SC e da DO a uma somente, e a denotaremos por $\mathcal{V}(SC, DO)$.

Os estudos das vulnerabilidades regionais não seguem em geral o mesmo ritmo dos estudos do clima global. As investigações sobre os impactos regionais são mais incertas e cheios de lacunas do que os estudos globais, já que existe uma quantidade enorme de regiões a investigar e, por descerem a detalhes na redução de escalas de espaço e tempo, são mais complexos. É provável que estas estudos sigam rotas e ritmos tão heterogêneos quanto são heterogêneas as regiões do Globo a serem estudadas. Para nosso propósito assumiremos uma situação estilizada, supondo que a velocidade de redução das incertezas sobre os índices de vulnerabilidades podem ser iguais ou menores que aquelas dos estudos globais. Denotaremos essa velocidade, para cada bloco, por $\mathcal{V}_i(ALFA)$, $i = N, S$, para Norte e Sul respectivamente. Assim se $\mathcal{V}(SC, DO)$ é lenta, $\mathcal{V}_i(ALFA)$ é lenta. Se $\mathcal{V}(SC, DO)$ é rápida, $\mathcal{V}_i(ALFA)$ pode ser lenta ou rápida.

A velocidade de diminuição das incertezas nos custos de abatimento depende de fatores econômicos e tecnológicos. Mais precisamente, ela depende da expectativa dos agentes econômicos em face da inovação tecnológica e das medidas governamentais para a adoção de novas tecnologias mais limpas. A expectativa média dos agentes econômicos carregadas de incertezas pode influenciar a visão do governo sobre os custos de abatimento através, por exemplo de grupos de interesse. Existe sem dúvida uma retro-alimentação entre estes elementos e os resultados das negociações, mas por simplicidade suporemos que a

velocidade desta incerteza é independente dessas negociações. Denotaremos essa velocidade por $\mathcal{V}_i(\text{BETA})$, $i = N, S$. Denotaremos as velocidades de evolução de incertezas por uma seqüência de símbolos “L” e/ou “R”, para velocidades Lenta e Rápida, respectivamente. Convencionaremos a ordem $\mathcal{V}(\text{SC}, \text{DO})$, $\mathcal{V}_i(\text{ALFA})$ e $\mathcal{V}_i(\text{BETA})$ para representar aquelas velocidades. Assim por exemplo, LLR significa que as velocidades $\mathcal{V}(\text{SC}, \text{DO})$ e $\mathcal{V}_i(\text{ALFA})$ são Lentas e $\mathcal{V}_i(\text{BETA})$ é Rápida.

Para cada Bloco de países temos, então, três velocidades a considerar e qualquer trinca dessas velocidades, $[\mathcal{V}(\text{SC}, \text{DO}), \mathcal{V}_i(\text{ALFA}), \mathcal{V}_i(\text{BETA})]$, define um cenário de evolução do conhecimento sobre o meio ambiente de base de cada Bloco P_i , $i = N, S$. Por outro lado, a posição dos governos nas negociações depende também dos planos de desenvolvimento para seus respectivos Blocos. Cada governo, por diferentes motivos, fixa e projeta para seu Bloco, em cada momento de decisão k , um desenvolvimento econômico, cujo indicador é a taxa de crescimento anual de seu PIB, $\delta y_i(k)$. Estamos supondo, como explicado no Capítulo 5, que cada governo fixa um limite mínimo suportável de crescimento abaixo desse alvo de desenvolvimento, que denotaremos por $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$ que restringe o valor máximo disponível para abatimento de emissões (Ver Capítulo 5). Nas simulações, fixaremos um mesmo valor mínimo de $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$ para todos os momentos de decisão k .

Existem então quatro dimensões que norteiam as decisões de cada Bloco, que são as três velocidades $\mathcal{V}(\text{SC}, \text{DO})$, $\mathcal{V}_i(\text{ALFA})$, $\mathcal{V}_i(\text{BETA})$ de evolução de incertezas e o limiar de crescimento mínimo $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$. A busca de uma resposta à pergunta chave acima se traduz no Proclin em fazer simulações de cenários baseados na manipulação dessas quatro

dimensões. Para simplificar as descrições e análise expostas abaixo, consideraremos de início os casos em que as velocidades $\mathcal{G}_1(\text{ALFA})$ e $\mathcal{G}_1(\text{BETA})$ são iguais, isto é, ambas sendo Rápidas ou Lentas, e denotaremos este valor comum por $\mathcal{G}(\text{ecoTech})$. Depois consideraremos as implicações do caso mais geral. Assim, descreveremos abaixo um conjunto de simulações baseadas em somente três dimensões: $\mathcal{G}(\text{SC}, \text{DO})$, $\mathcal{G}(\text{ecoTech})$ e $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$, embora mantendo ainda os quatro parâmetros e suas incertezas (Figura 7.2). Nesse sentido uma simulação pode ser figurada para cada Bloco como um ponto no “espaço” gerado por estas três dimensões.

Figura 7.2: Um espaço qualitativo das dimensões a analisar em cada simulação da evolução das ações de cada Bloco de países. As velocidades das variâncias representam as evoluções dos conhecimentos, e o limiar mínimo de crescimento representa os projetos de crescimento econômico dos países.

A título de exemplo, consideremos o caso em que existe um único governo mundial. E suponhamos que no momento inicial da sequência de decisões, $k_0 = 2000$, o governo tenha a seguinte representação para o clima, sua vulnerabilidade e seus custos: AAVACB, isto é, ele supõe em k_0 que a SC e a DO são Altas, a sua vulnerabilidade climática é Alta e seus custos de abatimento são Baixos. Se o meio ambiente de base tem as características

BBVBCB então fica definida uma situação inicial de incertezas. Para completar a configuração inicial suponhamos que este governo tenha planejado uma taxa de crescimento econômico de 3% por ano, com um limiar de 2,98 % por ano. Isso significa que existe uma janela de no máximo 0,02 % para deslocar recursos de sua economia para o abatimento de emissões. Dadas estas condições qual será a sua seqüência de decisões se a velocidade do progresso científico sobre o clima global for, por exemplo, Rápida, e sobre os impactos regionais e custos forem lentas, (RLL)? E se forem todas rápidas, (RRR)? Um cenário de velocidades do progresso científico acerca do clima global, dos impactos regionais e da mudança de expectativas sobre inovação tecnológica, juntamente com o alvo de desenvolvimento do mundo, definirão as decisões desse governo mundial ao longo do século.

Se fixarmos um par de velocidades $\mathcal{A}(SC, DO)$ e $\mathcal{A}(\text{ecoTech})$ podemos investigar as seqüências de decisões do governo para cada limiar de crescimento em um intervalo pré-fixado. Inversamente, para um limiar de crescimento fixo, podemos investigar as suas decisões para diferentes combinações dessas velocidades (Figura 7.3).

Figura 7.3: (A) Cada simulação seleciona duas velocidades e um limiar de crescimento mínimo dentro de um intervalo pré-fixado. Na ilustração são feitos cinco grupos de simulações, uma para cada valor de $\delta y_{i \text{ Min}}$, com um par fixo de velocidades. (B) Cada simulação fixa um limiar de crescimento mínimo e são feitos quatro grupos de simulações, um para cada par de velocidades.

Essa estrutura de cenários para simulações pode ser estendida para os dois Blocos de países A e B, onde não mais analisamos as decisões unilaterais, mas as decisões bilaterais, na sequência de negociações sobre cotas de reduções de emissões. Nesse caso teremos a mesma velocidade $\mathcal{G}(SC, DO)$ para as incertezas sobre os parâmetros do Sistema do Clima, mas velocidades $\mathcal{G}_i(\text{ecoTech})$ eventualmente diferentes, pois referem-se a incertezas sobre aspectos regionais. (No Apêndice F existe um resumo da sequência de passos para realizar uma simulação no Proclin).

7.4.2 Mapeando o Meio Ambiente de Base para Descobrir Limiares

O segundo passo para simularmos cenários no Proclin visando responder à pergunta formulada na Seção 7.2.2 é fazermos uma análise de sensibilidade para conhecermos o comportamento do meio ambiente de base sem considerarmos as negociações ou decisões de abatimento de emissões. Como existem muitos parâmetros, o trabalho envolvido na análise de sensibilidade que procurasse esgotar as combinações de parâmetros fixos e variáveis seria grande. Uma análise de sensibilidade mais simples e útil seria aquela em que pudéssemos explorar o comportamento do modelo mediante a variação somente dos parâmetros relevantes nas simulações para nos ajudar a obter a resposta de nossa pergunta chave. Por isso fizemos um mapeamento do meio ambiente de base procurando descobrir os limiares de danos climáticos aceitáveis para a economia de cada Bloco. (Figura 7.4).

Figura 7.4: À esquerda um colapso da economia do Bloco S. Seu PIB em 2085 atinge um máximo e depois cai rapidamente, devido ao aumento de temperatura global. À direita: o Bloco N é bem menos vulnerável e no mesmo período de tempo não apresenta colapso. O mapeamento busca descobrir em que condições ocorrem colapsos dentro deste século.

O objetivo do mapeamento é descobrir quais as condições que produzem colapso dos sistemas econômicos de base, caso não se controlem as emissões de GEE. Isto é, o mapeamento procura as repostas do meio ambiente de base nas condições BAU, procurando inventariar as situações em que ocorrem impactos perigosos como definido neste trabalho, mais precisamente, como a queda sistemática do PIB devido aos danos climáticos (Ver Capítulo 5, Seção 5.5) (Figura 7.4). Como o horizonte de tempo de nossa investigação é de cem anos, desde ao ano 2000 até o ano 2100, procuramos as situações de colapso somente dentro deste período. A resposta a nossa pergunta ficará por isso restrita a esse período. Uma análise exaustiva futura deveria ir além e buscar colapsos além do Século XXI.

A análise das repostas do meio ambiente de base foram feitas baseadas no estudo dos efeitos do crescimento do PIB sobre os impactos climáticos, através da cadeia causal das mudanças climáticas. Fizemos dois tipos de exploração: i) fixamos uma taxa de crescimento econômico global e realizamos simulações para vários valores do PIB global inicial; ii) fixamos um valor de PIB inicial em 2000 e variamos a taxa de crescimento. Em

ambos os casos fizemos simulações para cada combinação de categorias dos parâmetros do clima e de vulnerabilidade (SC, DO, ALFA), já que o custo é nulo, pois não há mitigação.

No primeiro caso, aumentamos gradualmente o valor do PIB inicial até produzirmos um colapso no ano 2100 ou próximo a ele. Quando alcançávamos um colapso naquele ano, marcávamos o valor do PIB. A Tabela 7.3 mostra o resultado para uma taxa de crescimento fixa de 3% por ano, para cada combinação de configurações de clima global e vulnerabilidade. Nas colunas da extrema esquerda marcamos as categorias de SC e DO. Na linha do topo marcamos as categorias de vulnerabilidade climática. Para cada categoria de vulnerabilidade existem três entradas, da esquerda para a direita: valor do PIB máximo que produz colapso em 2100 (ou próximo a esta data), data exata do colapso e elevação da temperatura na qual ocorre o colapso em 2100.

	VB			VMB			VM			VMA			VA		
	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C
BB	30	2100	2,0	15	2097	1,40	10	2099	1,17	8	2100	1,04	8	2096	0,97
BM	17	2100	1,95	9	2100	1,38	7	2100	1,18	6	2100	1,06	6	2098	1,00
BA	10	2097	1,925	6	2098	1,40	5	2097	1,197	4	2100	1,06	3	2097	0,98
MB	6	2098	1,932	3,5	2097	1,38	2,5	2102	1,17	2	2103	1,03	2	2098	0,98
MM	4	2099	1,923	2,5	2099	1,39	2	2100	1,18	1,8	2098	1,05	1,6	2100	0,97
MA	2,5	2103	1,890	2	2100	1,40	1,9	2099	1,19	1,75	2100	1,04	2,3	2032	0,965
AB	3,8	2100	1,943	2,3	2098	1,39	1,6	2103	1,16	1,4	2099	1,05	1,2	2097	0,97
AM	2,5	2103	1,88	1,6	2103	1,37	1,4	2097	1,176	1,2	2097	1,06	1,7	2040	0,965
AA	1,7	2097	1,92	1,8	2032	1,39	2	2030	1,16	1,0	2020	1,04	1	2014	0,97

Tabela 7.3: Mapeamento do Meio Ambiente de Base para descobrir as condições BAU de colapso da economia global. Nesta sondagem fixamos a taxa de crescimento da economia mundial em 3% e variamos o PIB global mundial desde 1 até 30 trilhões de US\$. Como a análise é para o caso BAU não existem custos de abatimento. Para cada configuração do Meio Ambiente de Base, por exemplo, MMVM, existem três entradas na tabela: o valor máximo do PIB inicial que não gera colapso, que no exemplo é 2 trilhões de US\$, o ano limite a partir do qual existe colapso, no exemplo é 2100, e o valor da elevação de temperatura neste ano, no exemplo 1,18 °C.

Se atentarmos para a Tabela 7.3, verificamos alguns padrões que nos ajudarão a escolher mais adiante as situações iniciais para simulação. A primeira constatação é que, fixada uma configuração do Sistema do Clima, que está marcada na primeira coluna da esquerda, e aumentarmos a vulnerabilidade climática do sistema, indo da extrema esquerda, que é a área da tabela de menor vulnerabilidade, para a extrema direita, onde estão as maiores vulnerabilidades, o PIB inicial máximo que não produz colapso neste século diminui rapidamente. Por exemplo, na célula BBVB, o PIB máximo inicial poder ser de até 30⁷ enquanto que na célula BBVM este PIB já cai para 10. Além disso, se nos deslocarmos da esquerda para a direita na Tabela, a elevação mínima de temperatura que produz colapso também decresce. No exemplo, esta elevação, na primeira célula, é de 2,0 °C, enquanto que na última célula é de 0,97 °C. Por outro lado, se fixarmos um valor de vulnerabilidade e variarmos a configuração do Sistema do Clima, nos deslocando de cima para baixo na Tabela 7.3, verificamos um padrão semelhante. O valor máximo do PIB inicial decresce rapidamente. A elevação da temperatura, entretanto permanece aproximadamente a mesma, deferindo por eventuais flutuações devidas a imprecisões e arredondamentos nos cálculos. Para uma vulnerabilidade fixa o colapso em 2100 ocorre para uma mesma elevação de temperatura naquela data, independentemente da configuração do clima. O PIB inicial, entretanto é cada vez menor.

Ocorrem algumas anomalias nesse padrão no que se refere à data na qual se observa um colapso, quando se aumenta gradativamente o valor do PIB inicial. Esses casos estão indicados na Tabela 7.3 em cor vermelha. Como fixamos o horizonte de 100 anos para a análise, é natural que obtivéssemos datas iguais ou próximas a 2100, devido a pequenas

⁷ Para simplificar a exposição omitiremos as unidades do PIB, mas está implícito que os números se referem a US\$ trilhões.

flutuações nos valores calculados. Mas nos casos das células indicadas em vermelho, verifica-se que o colapso ocorre muito antes do final do século. Como exemplo extremo consideremos a célula AAVA que indica que o colapso ocorre no ano 2014 e com um PIB inicial muito baixo, de 1. Um outro aspecto interessante destes casos anômalos é que neles, e somente neles, ocorrem oscilações do PIB. Isto é, eles iniciam uma queda nas datas indicadas na Tabela, mas em seguida crescem novamente se estabilizando próximo ao valor inicial ou crescendo para além do século atual, quando em algum momento voltarão a cair. Essas flutuações ocorrem, pois o aquecimento inicialmente diminui a taxa de crescimento do PIB, e por isso as emissões diminuem, dando tempo ao sistema de esfriar, permitindo o restabelecimento do crescimento do PIB.

A conclusão importante que esta análise nos permite fazer é que fixado um PIB global inicial e uma taxa de crescimento anual desse PIB, já ficam pré-determinadas as configurações do Meio Ambiente de Base em que ocorrerão colapsos da economia global, e em quais não ocorrerão, dentro deste século, em uma situação BAU. Por exemplo, se fixarmos um PIB global inicial igual a 10 e uma taxa de 3%/ano, então, poucas são as células da Tabela 7.3 que representam configurações do Meio Ambiente de Base nas quais não ocorrem colapsos. Uma inspeção na Tabela mostra que são as células BBVM, BMVB e BBVM.

Uma outra maneira de analisar o Meio Ambiente de Base na situação BAU seria fixar um PIB inicial e variar a taxa de crescimento anual para descobrir qual é a taxa máxima que não produz colapso neste século. Esse tipo de análise está mostrada na Tabela 7.4 para o caso de um PIB global inicial de 10 e diferentes taxas de crescimento variáveis. Nessa situação a primeira entrada em cada configuração é a taxa de crescimento máxima até à qual não ocorre colapso no presente século. Neste caso mostramos os resultados

somente para algumas células, já que para todos os outros não indicados, os resultados repetem o padrão. A conclusão geral desta análise é que para a quase totalidade dos casos, com taxas de apenas 1% / ano o sistema econômico de base entra em colapso. O resultado notável neste caso é que as datas nas quais ocorrem este colapso são muito próximas do início deste século. Algumas destas situações de colapsos, segundo este modelo, já teriam ocorrido. Notemos o caso extremo de uma ocorrência de colapso em 1995, na célula AAVA. Esse fato nos indica possíveis limitações e ausência de validade que o presente modelo apresenta, nos alertando para olharmos com reservas os resultados das simulações descritos a seguir.

10	VB			VM			VA		
	Tax(%)	Ano	$\Delta T^{\circ}C$	Tax(%)	Ano	$\Delta T^{\circ}C$	Tax(%)	Ano	$\Delta T^{\circ}C$
BB	6	2100	2,42	3	2100	1,18	1	2080	0,90
MM	1	2062	1,35	1	2021	0,83	1	2007	0,68
AB	1	2015	1,33	1	1999	0,60	1	1999	0,60
AM	1	2032	1,34	1	2006	0,82	1	1999	0,60
AA	1	2015	1,36	1	2000	0,89	1	1995	0,55

Tabela 7.4: Uma análise onde fixamos o PIB global inicial, fazendo-o igual a 10, e variamos as taxas de crescimento desse PIB para sondar as respostas do Meio Ambiente de Base.

Nas Tabelas 7.5 A, B e C, vemos um mapeamento feito para um mesmo PIB inicial no ano 2000, próximo ao valor real, isto é de 40 trilhões de US\$ (BANCO MUNDIAL, 2005), onde exploramos a sensibilidade do meio ambiente de base para três taxas, que parecem circunscrever o valor médio de crescimento da economia mundial para as próximas décadas. São eles 3% por ano na Tabela 7.5 A; 5% por ano na Tabela 7.5 B; e 7% por ano, na Tabela 7.5 C. O mesmo padrão acima citado emerge destas tabelas, e que indicamos por três cores distintas. Em cor verde estão indicados os casos em que não ocorre

colapso dentro do intervalo 2000-2100. Em azul ocorre colapso na segunda metade do século, e em vermelho ocorre colapso na primeira metade do século. Em especial, as datas mais próximas de colapso são 2010, 2015 e 2018, para as taxas de crescimento 3% por ano, 5% por ano e 7% por ano respectivamente.

Uma análise atenta destas três tabelas nos indicam que: i) com exceção das células em cor verde, que são os casos onde o clima e a vulnerabilidade têm categorias BBVB, ou muito próxima a esta situação, sempre ocorre colapso. As diferenças residem na data de ocorrência e na elevação de temperatura característica; ii) quanto maior a taxa de crescimento do PIB mais à frente no futuro ocorre o colapso. Isso acontece, pois a taxa de crescimento dos danos, que é uma função da elevação da temperatura, inicialmente é menor

40/3	VB			VMB			VM			VMA			VA		
0,5	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C
BB	40	>2120	>1,89	40	2103	1,63	40	2087	1,28	40	2077	1,09	40	2069	0,96
BM	40	>2120	>2,83	40	2088	1,63	40	2074	1,28	40	2066	1,10	40	2058	0,96
BA	40	2099	2,69	40	2069	1,63	40	2057	1,28	40	2049	1,09	40	2043	0,96
MB	40	2084	2,67	40	2059	1,63	40	2048	1,28	40	2040	1,08	40	2035	0,96
MM	40	2069	2,67	40	2048	1,65	40	2038	1,28	40	2032	1,09	40	2027	0,96
MA	40	2052	2,69	40	2034	1,65	40	2026	1,29	40	2021	1,09	40	2017	0,95
AB	40	2062	2,67	40	2043	1,65	40	2034	1,29	40	2028	1,09	40	2024	0,98
AM	40	2051	2,68	40	2034	1,65	40	2026	1,28	40	2021	1,08	40	2018	0,98
AA	40	2037	2,74	40	2022	1,63	40	2017	1,32	40	2013	1,10	40	2010	0,97

Tabela 7.5 A: Taxa crescimento global de 3% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.

40/5	VB			VMB			VM			VMA			VA		
0,5	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C
BB	40	>2100	>2,84	40	2095	2,09	40	2083	1,63	40	2076	1,32	40	2070	1,22
BM	40	2108	3,45	40	2082	2,08	40	2072	1,64	40	2065	1,38	40	2060	1,22
BA	40	2087	3,40	40	2066	2,09	40	2057	1,64	40	2051	1,38	40	2047	1,23
MB	40	2080	3,45	40	2061	2,11	40	2052	1,64	40	2046	1,40	40	2042	1,23
MM	40	2068	3,41	40	2051	2,09	40	2043	1,63	40	2038	1,39	40	2034	1,23
MA	40	2053	3,41	40	2038	2,08	40	2032	1,67	40	2027	1,40	40	2024	1,25
AB	40	2063	3,43	40	2047	2,11	40	2039	1,63	40	2034	1,38	40	2031	1,25
AM	40	2053	3,41	40	2039	2,13	40	2032	1,66	40	2027	1,38	40	2024	1,24
AA	40	2051	3,57	40	2028	2,17	40	2022	1,68	40	2018	1,41	40	2015	1,23

Tabela 7.5 B: Taxa crescimento de 5% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.

40/7	VB			VMB			VM			VMA			VA		
	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C	PIB	ANO	°C
BB	40	2115	>3,71	40	2090	2,45	40	2080	1,93	40	2073	1,62	40	2069	1,44
BM	40	2100	3,995	40	2078	2,44	40	2069	1,91	40	2065	1,65	40	2060	1,45
BA	40	2082	4,058	40	2063	2,45	40	2056	1,95	40	2051	1,65	40	2048	1,47
MB	40	2077	4,086	40	2060	2,48	40	2052	1,91	40	2048	1,66	40	2044	1,44
MM	40	2066	4,04	40	2051	2,46	40	2044	1,90	40	2040	1,61	40	2037	1,48
MA	40	2054	4,05	40	2040	2,47	40	2035	2,04	40	2030	1,65	40	2027	1,47
AB	40	2062	4,08	40	2048	2,50	40	2041	1,95	40	2037	1,65	40	2033	1,43
AM	40	2054	4,21	40	2039	2,43	40	2034	1,93	40	2030	1,65	40	2027	1,45
AA	40	2042	4,07	40	2029	2,43	40	2024	1,91	40	2021	1,65	40	2018	1,44

Tabela 7.5 C: Taxa crescimento de 7% / ano. Intensidade de carbono mundial de 0,5.

do que a taxa de crescimento do PIB, o que permite que este cresça tanto mais rapidamente quanto maior for a sua taxa de crescimento e sem muitas perdas, demorando mais tempo para os danos climáticos alcançarem o valor do PIB quando o aquecimento global é tal que a taxa de crescimento dos danos começa a superar a do PIB e este começa a cair vertiginosamente. iii) experimentos feitos para taxas menores que 3%/ ano mostram que crescimento baixo não evita colapso, pois a taxa de aquecimento supera a de crescimento do PIB mais rapidamente. Este fato já pode ser percebido para a taxa de 3%/ano, pois na Tabela 7.5 A, vemos um número maior de regiões em vermelho. Quanto mais recuamos o valor da taxa de crescimento do PIB mais regiões vermelhas aparecem na Tabela. Para ver isto basta considerar a tabela 7.4, no canto inferior direito.

A conclusão geral das análises resumidas nas Tabelas 7.3 e 7.4 e 7.5 é que, salvo raras exceções, o Meio Ambiente de Base é muito sensível às mudanças climáticas e se não houver controle das emissões, em quantidades suficientes para evitar os danos perigosos, certamente eles ocorrerão no Século XXI do modelo, diferenciando-se unicamente pela

data de ocorrência, pelo nível de aquecimento e pela rapidez com que ocorre a fase de descida na curva do PIB.

A questão chave pode agora ser reformulada com bastante objetividade: dados os planos de desenvolvimento de dois Blocos de países, que velocidades de evolução do conhecimento dos quatro parâmetros incertos escolhidos (SC, DO, ALFA, BETA), poderiam produzir seqüências de negociações que “empurrem” os danos perigosos para além deste século? Às seqüências de negociações que satisfizerem esta condição denominaremos Seqüências Eficazes e àquelas que não conseguirem tal efeito denominaremos Seqüências Ineficazes. A pergunta colocada desta maneira indica claramente o que devemos fazer para buscar uma resposta: basta geramos várias seqüências de distribuições de probabilidades, representando a evolução no conhecimento científico e verificar para cada uma se a negociação correspondente evita o colapso originalmente previsto para uma certa data e elevação de temperatura, conforme o mapeamento mostrou, empurrando o mesmo para a frente.

7.5 Simulações de Cenários

O Proclin nos permite fazer uma grande variedade de simulações, bastando alterar as configurações de acordo com situações ou cenários de interesse. Não é possível esgotar aqui todo este potencial e por isso descreveremos somente alguns experimentos que podem nos fornecer algumas respostas parciais à pergunta chave. Convidamos o leitor para explorar algumas possibilidades não citadas abaixo, usando o Proclin.

As simulações do efeito de abatimento resultante das negociações entre os dois Blocos de países S e N, não necessitam percorrer todas as situações possíveis de PIB inicial

e taxas de crescimento, como exemplificadas nas Tabelas 7.3 e 7.4 e 7.5. Ao contrário, será suficiente considerarmos algumas situações típicas e fortemente contrastantes para avaliarmos de forma qualitativa e abrangente o papel da evolução das incertezas sobre a capacidade de evitar os danos climáticos perigosos. As situações escolhidas para isso são as indicadas nas células na Tabela 7.6. Estamos tomando somente 9 (nove) das células da Tabela 7.5 B, mais exatamente, as quatro células dos cantos e as cinco centrais como indicado. Em simulações mais exaustivas podemos explorar detalhes de configurações das Tabelas acima.

	VB					VM					VA		
	PIB	ANO	°C			PIB	ANO	°C			PIB	ANO	°C
BB	40	>2100	>2,84			40	2083	1,63			40	2070	1,22
MM	40	2068	3,41			40	2043	1,63			40	2037	1,48
AA	40	2051	3,57			40	2022	1,68			40	2015	1,23

Tabela 7.6: As células da Tabela 7.5 B tomadas para simular cenários de negociações com incertezas variáveis.

Cada simulação será denominada Experimento. Numeramos os experimentos por ordem de realização de 1 a 9. Cada experimento parte de uma situação inicial de incerteza, como definida anteriormente. Suporemos de início que as incertezas diminuem rapidamente e analisaremos os resultados. Se houver necessidade faremos simulações com velocidades menores. A idéia por trás desse procedimento é que se as negociações não produzirem seqüências de negociações eficazes com uma velocidade de evolução Rápida, então não o farão com velocidade Lenta. Além disso, todas as situações de incerteza partirão de distribuições com valores esperados no centro dos intervalos de confiança de cada

parâmetro. Não consideraremos, em geral, situações que se desloquem de uma extremidade, por exemplo, Baixa, para outra extremidade, por exemplo, Alta, pois se uma evolução Rápida do centro da distribuição para uma extremidade não produzir seqüências eficazes, muito menos o fará uma situação de evolução Rápida de extremidade a extremidade. Além disso, para fixarmos algumas referências para experimentos futuros, suporemos que os custos finais sempre serão Baixos. Isto significa que os valores esperados dos custos migrarão de Médios para Baixos. A Tabela 7.7 fornece um exemplo de entradas para a realização de um experimento.

EXPERIMENTOS – DOIS BLOCOS SIMÈTRICOS									
N Exp.	Bloco	Estado de Incerteza Inicial		Meio Ambiente de Base		Velocidade	Data do Limiar BAU	Colapso Evitado?	Nova Posição do Limiar
n	N	MM	VMCM	BB	VBCB	R = 0,2	2045	Sim	>2100
	S		VMCM		VBCB	R = 0,2	2059	Não	2090

Tabela 7.7: Um exemplo de um experimento típico. A velocidade Rápida adotada é 20% de redução na variância por década para qualquer um dos quatro parâmetros. O sistema parte da Estado de Incerteza Inicial, e caminha nesta velocidade para a configuração do Meio Ambiente de Base.

A seguir descreveremos dois grupos de simulações. A primeira com nove experimentos onde suporemos que os dois Blocos de países são simétricos, isto é seus PIB iniciais, suas taxas de crescimento projetadas, seus limiares de crescimento, vulnerabilidades e custos de abatimento serão iguais, além de terem intensidades de carbono iguais e iguais graus de aversão ao risco. O segundo grupo de experimentos, em número de três, será para o caso de dois Blocos assimétricos, com um deles, o Bloco Norte tendo PIB e taxa de crescimento maiores que os valores correspondentes no Sul. Este terá uma vulnerabilidade maior às mudanças climáticas que o Bloco Norte. Eles terão mesma

intensidade de carbono e mesma aversão ao risco. Para todos os casos fixaremos uma janela de limiar de crescimento do PIB igual a 0,5%.

7.5.1 Caso de Dois Blocos Simétricos

A Tabela 7.8 abaixo resume os resultados dos experimentos do caso de dois Blocos simétricos e com velocidade Rápida de diminuição das incertezas. Vemos nessa Tabela que dos nove casos considerados, quatro deles tiveram danos perigosos evitados. Mais precisamente, o Experimento 01, é o caso extremo da Tabela 7.5-B, isto é BBVB, em que não havia ocorrido colapso para o caso BAU e assim podemos desconsiderá-lo para o cômputo da eficácia das negociações. Temos então três casos de sucesso e cinco de fracasso. Os três casos de sucesso eram situações BAU em que o colapso ocorria na segunda metade do século e tiveram sua data de ocorrência lançada para fora e além deste século. É interessante notar que a ocorrência mais próxima seria no ano 2068, e por isso as negociações adiaram o problema por pelo menos 33 anos. Se esse foi o mínimo adiamento, então as outras duas datas passaram a ser no mínimo 2116 (Experimento 02) e 2103 (Experimento 03).

Os quatro casos de fracasso são notáveis. O primeiro deles, Experimento 05, teve a data do colapso adiada por uma década. Na Tabela 7.8 está indicada a nova elevação de temperatura na qual o colapso ocorre, dez anos depois. Os três últimos tiveram o resultado notável de não deslocar um ano sequer na data dos colapsos originais BAU, mesmo tendo uma difusividade térmica oceânica alta, o que favoreceria uma resposta rápida do clima às reduções de emissões. Estes casos foram aqueles que originalmente ocorriam mais próximos ao início do século. Resumidamente, das oito situações em que originalmente

ocorriam colapso neste século, tomando diminuições Rápidas de incertezas, três seqüências de negociações adiaram o colapso para além do final do século e cinco não o fizeram. Certamente o número de sucessos seria menor se as velocidades fossem Lentas. Uma análise pormenorizada deveria incluir estes casos também.

Um outro grupo de simulações com velocidades mais lentas do que a adotada pode ajudar a avaliarmos qual é a velocidade mínima que mantém a mesma situação, e qual é a velocidade máxima necessária para que os limiares sejam evitados em todas as situações. Podemos, por exemplo, fazer uma análise variando de maneira abrupta a velocidade da pior situação, que corresponde ao Experimento 9. Para este caso, se em uma década houver uma redução de 85% das incertezas o que acontecerá com a posição do limiar? Fazendo essa simulação, não verificamos nenhum deslocamento da posição desse limiar, permanecendo imóvel, mesmo com uma mudança tão rápida como esta. Se repetirmos essa simulação para os Experimento 07 e 08 obtemos o mesmo tipo de resultado, isto é, não há nenhum deslocamento da posição do limiar com 85% de redução das incertezas em uma década. Em um dos testes reduzimos em uma década quase 100% das incertezas. Estes resultados nos permitem concluir, ainda que provisoriamente, que para certas configurações do meio ambiente de base, a velocidade de diminuição das incertezas é irrelevante, mesmo para diminuições drásticas dessas incertezas, as negociações não evitam os danos perigosos. Se essa conclusão se confirmar em simulações mais abrangentes e detalhadas, teremos encontrado uma parte importante da resposta a nossa pergunta e de forma notável: talvez as características estruturais do clima, dos ecossistemas, das economias, das instituições políticas e dos agentes decisores sejam tais que a partir de uma certa época, o aprimoramento do conhecimento científico, embora leve a mudanças do comportamento dos tomadores de decisão, não acarreta nenhuma alteração do comportamento do sistema

do clima. Uma possível causa deste comportamento é que talvez tenhamos dado aos agentes características que, mesmo com um avanço do conhecimento sendo muito rápido não podem mudar. Uma destas características é o limiar de crescimento mínimo que na presente fase do modelo é uma restrição rígida e independente das incertezas. Essa é uma área de investigação que deve ser aprofundada começando por uma análise de sensibilidade dos experimentos acima variando $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$ (Ver Figura 7.3-A).

Vamos agora analisar o que aconteceu nas seqüências de negociações. A cada experimento está associada uma seqüência que está representada na lâmina da Figura 7.5. Da esquerda para a direita e de cima para baixo vemos todas as seqüências na mesma ordem dos nove experimentos da Tabela 7.8. O primeiro fato notável é que embora os dois Blocos sejam simétricos as suas escolhas nas negociações não são iguais. O que também chama a atenção é o fato de ambos os Blocos começarem com a mesma meta de redução de emissões e em 2020, ou na maioria dos casos, em 2030, haver uma bifurcação de metas de abatimento de emissões. Outro fato interessante é que em cada seqüência enquanto o Bloco Norte, (linha roxa), aumenta suas taxas de abatimento e estabiliza em um valor elevado, o Bloco Sul, (linha azul), a partir de um certo momento reduz drasticamente suas taxas de abatimento e estabiliza nesse nível. As trajetórias de reduções de emissões de ambos se distanciam em todas as seqüências. Lembremos que os resultados de cada seqüência são os Equilíbrios de Nash de cada jogo, onde cada jogador busca o máximo nível de consumo, ou o mínimo nível de perdas sociais como a melhor resposta à escolha do outro jogador. Como ambos são idênticos em todos os aspectos deveríamos encontrar um Equilíbrio de Nash que implicasse em metas de redução idênticas em cada jogo.

Uma análise de sensibilidade variando o limiar $\delta y_{i \text{ Min}}(k)$ mostra que quanto mais próximo este valor estiver da meta projetada de crescimento econômico, igual para ambos os Blocos, mais próximas serão as metas de redução no equilíbrio de Nash de cada jogo. Esse comportamento também é injustificado dada a simetria dos agentes.

Vários testes mostram que o comportamento do Bloco Sul em todos os casos analisados acima é inconsistente com a evolução das incertezas, enquanto que o Bloco Norte (linha roxa) tem um comportamento sistematicamente consistente com aquela evolução. Notemos que o Bloco Norte busca uma redução máxima, tão maior quanto maior a SC e DO e a sua vulnerabilidade, enquanto que o Bloco Sul (linha azul) busca a redução mínima nas mesmas situações. Se o Bloco Sul também escolhesse a meta máxima, a redução total seria maior e os resultados acima sobre a proporção de casos em que as negociações evitaram o colapso neste século talvez fossem diferentes.

Simulações de outras situações aparentemente não apontam inconsistências de comportamento e por isso é importante aprofundarmos a análise e descobrirmos onde reside o problema. De qualquer maneira o grupo de simulações acima descrito é suficiente para demonstrar o potencial do Proclin para buscarmos uma resposta à nossa questão chave. Esse protótipo fornece em paralelo às informações discutidas acima informações sobre a evolução das emissões de cada país, das concentrações, do forçamento radiativo, das elevações de temperatura, dos impactos, dos danos, dos custos de abatimento, das perdas totais e danos evitados para cada jogo e para todas as seqüências de negociações permitindo que façamos análises bem completas. Além disso, podemos observar a cada passo de tempo os cenários projetados por cada Bloco e observar sua evolução.

EXPERIMENTOS – DOIS BLOCOS SIMÈTRICOS									
N Exp.	Bloco	Estado de Inceteza Inicial		Meio Ambiente		Velocidade	Data do Limiar BAU	Colapso Evitado?	Nova Posição do Limiar
01	N	MM	VMCM	BB	VBCB	R = 0,2	>2100	Sim	>2100
	S		VMCM		VBCB	R = 0,2	>2100	Sim	>2100
02	N	MM	VMCM	BB	VMCB	R = 0,2	2083	Sim	>2100
	S		VMCM		VMCB	R = 0,2	2083	Sim	>2100
03	N	MM	VMCM	BB	VACB	R = 0,2	2070	Sim	>2100
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2070	Sim	>2100
04	N	MM	VMCM	MM	VBCB	R = 0,2	2068	Sim	>2100
	S		VMCM		VBCB	R = 0,2	2068	Sim	>2100
05	N	MM	VMCM	MM	VMCB	R = 0,2	2043 (1,63 °C)	Não	2055 (1,81 °C)
	S		VMCM		VMCB	R = 0,2	2043 1,63 °C)	Não	2055 1,81 °C)
06	N	MM	VMCM	MM	VACB	R = 0,2	2037	Não	2037
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2037	Não	2037
07	N	MM	VMCM	AA	VBCB	R = 0,2	2051	Não	2050
	S		VMCM		VBCB	R = 0,2	2051	Não	2050
08	N	MM	VMCM	AA	VMCB	R = 0,2	2022	Não	2022
	S		VMCM		VMCB	R = 0,2	2022	Não	2022
09	N	MM	VMCM	AA	VACB	R = 0,2	2015	Não	2015
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2015	Não	2015

Tabela 7.8: Resultados da simulação do caso de dois Blocos Simétricos e com velocidade Rápida.

Figura 7.5: Legenda: Linha azul, Bloco S, linha roxa, Bloco Norte. Da Esquerda para a direita e de cima para baixo, as lâminas seguem a ordem dos experimentos de 01 a 09. A sequência de Negociações entre os Blocos N e S correspondentes aos Experimentos da Tabela 7.8, considerando os dois Blocos simétricos e velocidades rápidas de diminuição das incertezas (20% por década).

7.5.2 Caso de Dois Blocos Assimétricos

As assimetrias dos dois Blocos são mostradas na Tabela 7.9. Neste caso as vulnerabilidades são diferentes e podemos restringir as simulações a três casos, que são, mostrados na Tabela 7.10.

	PIB	Taxa Projetada	ALFA	BETA
NORTE	30	5 % / ano	Baixa	Baixo
SUL	10	7 % / ano	Alta	Baixo

Tabela 7.9: As características de cada Bloco para simulação do caso assimétrico

EXPERIMENTOS – DOIS BLOCOS ASSIMÉTRICOS									
N Exp.	Bloco	Estado de Inceteza Inicial		Meio Ambiente		Velocidade	Data do Limiar BAU	Colapso Evitado?	Nova Posição do Limiar
01	N	MM	VMCM	BB	VBCB	R = 0,2	>2100	Sim	>2100
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2062 (1,44°C)	Sim	>2100
04	N	MM	VMCM	MM	VBCB	R = 0,2	>2100	Sim	>2100
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2031 (1,41°C)	Não	2032 (1,44°C)
07	N	MM	VMCM	AA	VBCB	R = 0,2	2030 (3,31°C)	Não	2030 (3,40°C)
	S		VMCM		VACB	R = 0,2	2008 (1,44°C)	Não	2008 (1,50°C)

Tabela 7.10: Caso em que os dois Blocos são assimétricos. Detalhes no texto.

Neste caso vemos que das três possibilidades, uma é bem sucedida em evitar o colapso neste século. Notemos que o bloco menos vulnerável, Bloco N, consegue se manter fora de perigo em duas situações, mas quando a sensibilidade climática e a difusividade térmica oceânica são altas, implicando em alto e rápido aquecimento ele não escapa. Uma análise das seqüências de negociações mostra, entretanto que as seqüências não diferem muito daquelas do caso anterior. Somente uma análise mais acurada poderá revelar porque.

7.6 Conclusão

Mostramos o potencial do Proclin em nos ajudar a responder a nossa questão chave. Até onde foram feitas as simulações, podemos responder que para os casos estudados acima, velocidades da ordem de 20% por década de redução de incertezas podem evitar colapsos neste século em uma proporção de 3/8 no primeiro caso e 1/3 no segundo caso. Entretanto uma análise mais robusta de ainda ser feita, procurando-se analisar uma gama muito maior de cenários. O esquema das simulações, entretanto, é o apresentado neste capítulo.

Conclusão Geral

A motivação central que levou grande parte dos países do mundo a construírem um Regime Internacional para proteção às mudanças climáticas foi a possibilidade de ocorrerem impactos catastróficos em larga escala podendo interromper a produção e distribuição de alimentos nas quantidades demandadas por uma população crescente, sobretudo nos países em desenvolvimento. Os impactos sobre os ecossistemas e espécies ameaçadas também foi, desde o princípio, uma das principais preocupações que levaram os países a assinarem a Convenção Quadro sobre Mudança de Clima. A possibilidade, nada irrealista, de que um aquecimento contínuo do planeta possa inviabilizar o desenvolvimento de vastas áreas, é sem dúvida uma das principais razões para nos preocuparmos com as mudanças climáticas potenciais.

Quando se faz uma análise mais refinada do problema das mudanças climáticas passamos a entrar em contato com uma dimensão que é ubíqua por todas as áreas de nosso conhecimento desse problema: as incertezas. Estas se evidenciam como um dos grandes desafios para a geração de cientistas deste início de século e das próximas décadas.

Um ambiente de vastas e profundas incertezas aliado ao fato de que os benefícios das medidas de mitigação somente poderão ser recebidos pelas gerações futuras transforma a motivação original da Convenção Quadro, em um mundo com tantas demandas, instabilidades e crises de natureza política, social e religiosa, em um objetivo vago, difuso e de difícil implementação. Os interesses nacionais mais urgentes em face de grandes incertezas e de benefícios que não colaboram para resolver os problemas atuais tornam o processo das negociações internacionais sobre mudança de clima mais uma arena para barganhas sobre aspectos não diretamente relacionados ao problema das mudanças climáticas. Por exemplo, a Rússia ratificou o Protocolo de Quioto por causa de seu interesse

em participar da Organização Mundial de Comércio. A questão é então a seguinte: se as evidências climáticas observacionais e os modelos dos cientistas estivessem produzindo resultados bem mais confiáveis que os atuais, apontando para impactos climático perigosos, a Rússia agiria com as mesmas motivações?

Recentemente, começaram a se travar conversações sobre a próxima etapa, após o final do regime de Quioto. Quando os Estados Unidos da América é chamado nessas conversações a se posicionar assumindo compromissos de reduzir suas emissões, responde que ainda é prematuro discutir estas questões, já que o Protocolo de Quioto nem começou ainda seu período de comprometimento. A questão aqui é: se as evidências científicas fossem mais fortes do que as atuais em favor da tese de que o aquecimento global traria muitos impactos perigosos para os Estados Unidos, a sua postura nas negociações continuaria a mesma? De protetador ele não acabaria se transformando em promotor das medidas de mitigação?

A tese central deste trabalho é a de que uma das componentes das atitudes dos governos dos Estados Nacionais nas negociações sobre mudança de clima global são as muitas incertezas que temos sobre o clima, sua evolução e as respostas dos sistemas a ela. Procuramos através de um modelo estilizado construir uma ferramenta conceitual e de análise que nos permita imitar alguns dos principais elementos do processo de decisões coletivas para abater emissões. Nosso modelo pode ser implementado em computador e pode se tornar uma ferramenta muito útil para investigar esta questão e comunicar os resultados a especialistas e não especialistas

Através de um protótipo, Proclin, implementamos as idéias chave e as equações do modelo para aprendermos mais sobre como alcançar nosso objetivo. Embora ainda em fase de testes, esse protótipo já deu algumas indicações importantes de que tem condições de

nos ajudar a responder a questão sobre o papel das incertezas nas negociações. Embora com um modelo muito questionável em alguns aspectos importantes, chegamos às vias de fato, em termos de uma primeira versão de um modelo integrado contendo os principais ingredientes da estrutura de decisões em mudanças climáticas e acreditamos que daqui para frente somente o aprimoramento do modelo e do protótipo serão nossos desafios. A cada dia nos tornaremos mais capazes de analisar e compreender aspectos antes insuspeitados sobre o problema aqui analisado.

Propomos que se investigue mais profundamente o desenvolvimento de uma nova classe de modelos de análise integrada para gerar cenários de emissões e mudanças climáticas a partir de cenários de evolução de nosso conhecimento sobre estas mudanças. Estes cenários têm o potencial de nos ajudar a priorizar temas de pesquisa, além de nos informar os possíveis rumos do aquecimento global. Além disso, eles podem ressaltar o importante papel do Princípio da Precaução, haja vista a possibilidade revelada, e ainda a ser confirmada, por algumas simulações, de que para certas circunstâncias o grau de certeza não faz diferença.

Modelos como o apresentado aqui tem a virtude de nos colocar em contato com a complexidade do problema e de sugerir abordagens integradoras que alcancem uma larga audiência. Esperamos que o leitor tenha compreendido um pouco mais a problemática aqui tratada. Convidamos os interessados a acessar o Proclin⁸ e testá-lo em sua capacidade de representar algumas das dimensões do tema das incertezas e das negociações sobre mudanças de clima. Seremos gratos por observações e críticas para que possamos ter uma ferramenta útil aos cientistas e políticos.

A arte da modelagem é iterativa, e qualquer modelo é provisório.

⁸ O Proclin deve ser aberto somente no Excel para não perder várias de suas macros.

REFERÊNCIAS

AAHEIN, H. A., BRETTEVILLE, C. **Decision-making frameworks for climate policy under uncertainty**. Center for Interanational Climate and Environmental Research. Oslo:. Cicero Working paper 2001: 2,

ALCAMO, J. (ed). **IMAGE 2.0: Integrated Modeling of Global Climate Change**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. In: CIESIN, 1995: Consortium for International Earth Science Information Network. <http://sedac.ciesin.org/mva/image-2.0/image-2.0-toc.html>, 2002.

ALLEN, M. Doít-ypurself climate predicttion. **Nature**, 401, 1999, 642-642.

AMANO, A. Macroeconomic Costs and others side-effects of reducing CO2 emissions. In Kaya, Y., Yokobori, K. **Environment, Energy, anda Economy**. Tokyo: The United Nations University, 1997.

BARRETT, S. Self Enforcing International Environmental Agreements, **Oxford Economic Papers**, vol. 46, 1994, pp. 878-894,

BARTOS, O . **Process and Outcomes of Negotiations**. Columbia University Press. USA, 1974.

BASAR, T. , G.-J. OLSDER. **Dynamic Non-cooperative Game Theory**. London: Academic Press, 1995,

BRETTEVILLE, C. **Decisions Criteria under uncertainty and the climate problem**. Center for Interanational Climate and Environmental Research. Oslo:. Cicero. Working paper 1999: 10, 1999.

CAPARRÓS, A., PEREAU, J. P. , TAZDAÏT T. **North-South Climate Change Negotiations: a Sequential Game with Asymmetric Information**. Fondazione Enrico Mattei. Nota di Lavoro, 9.2003.

CARRARO, C. AND D. SINISCALCO. Strategies for the International Protection of the Environment. **Journal of Public Economics**, vol. 2, 1993, 309-328.

CARTER, T. R., PARRY, M. L., HARASAWA, H., NISHIOKA. **IPCC Technical Guidelines fro Assissing Climate Change Impacts and Adaptations**. Working Group II.London, 1995.

CAYATTE, JEAN-LOUIS. **Introduction à l'economie de l'incertitude**. Belgique: De Boeck, 2004.

CHANDER P., TULKENS, H. The Core of an Economy With Multilateral Environmental Externalities. **International Journal of Game Theory**, vol. 26, 1997, pp. 379-401.

CHOUWDHURY, A., KIRKPATRICK, C. **Development Policy and Planning. An introduction to models and techniques**. London: Routledge, 1994.

CISCAR, J. C., FORGO, F. FÖLCH, W., COURTOIS, P. **Dynamic Games and Integrated Assassments of Global Climate Policy: A literature Review**. Siadecero Project. Potsdam Institute. Potsdam, Germany, 1997

CLEMEN, R. **Making Hard Decisions**. Belmont, California: Duxbury Press, 1991.

CLEMEN, R. T., WINKLER, R. L. Combining probability distributions from experts in risk analysis. **Risk Analysis**, 19, 187-203, 1999.

CQMC. **A Convenção Quadro Sobre Mudança do Clima**. Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia com o apoio do Ministério das relações Exteriores da república Federativa do Brasil, www.mct.gov.br/clima, 1992.

DE VRIES, B. JANSSEN, M.. The battle of perspectives: a multi-agent model with adaptative responses to climate change. **Ecological Economics**, 26, 1998., 43-65, 45: 387-401

DESSAI, S. HULME, MIKE. **Does climate policy need probabilities?** Tyndall Centre for Climate Change Research. Working Paper 34. UK, 2003.

DICKHAUT J., KAPLAN, T. A program for Finding a Nash Equilibrium. **The Mathematica Journal** 87-93, 1991.

DOWLATABADI, H. Integrated Assessment models of climate change. An incomplete review. **Energy Policy**, vol. 4/5, 1995, p. 289.

DUPONT, C. **La négociation: conduite, théorie, applications**. Paris Dalloz, 1994.

DUTSCHKE, M. O Brasil como Ator no Processo da política Climática. **Série Ciências Ambientais** São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, 2000.

EGTEREN, H. TANG, J. Maximum Victim Benefit: A Fair Division Process in Transboundary Pollution Problems. **Environmental and Resources Economics**, vol. 10, pp. 363-386, 1997.

FUNAKI, Y. YAMATO T. The Core of an Economy with a Common Pool Resource: A Partition Function Approach. **International Journal of Game Theory**, vol. 28, pp. 157-171, 1999.

GERMAIN, M., TOINT, P., TULKENS, H., DE ZEEUW. A. Transfers to sustain dynamic core-theoretic cooperation in international stock pollutant control. **Journal of Economic Dynamics and Control**, 2003.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

GRUBB, M., EDMONDS, J., ten BRINK, P., MORRISON, M. The Costs of Limiting Fossil-Fuel Co₂ Emissions. **Review of Energy and Environment**, 1993, pp. 397-478.

GRUBLER, A., NAKICENOVIC, N. Identifying dangers in a uncertain climate. **Nature**, 412, 2001, 15..

GUPTA, J., BERK, M., VAN ASSELT, H. Defining Dangerous, in **Report of Annex I Workshop on Article 2 of Climate Convention**. Institute for Environmental Studies, Report n. 03/35, Amsterdam, Netherlands, 2003. Cópia disponível em www.un.nl/ivm.

HASSELMAN, K., VOSS, R., HOOS, G., Maeir-Reimer, E., Joos, F. A non linear impulse response model of coupled carbon cycle-climate system (NICCS). W-03-05, **Climate Dynamics**, 18, 2001, 189-202

HELM, C. On the existence of a cooperative solution for a coalitional game with externalities, **International Journal of Game Theory**, vol. 30 (1), 2001., pp. 141-146.

HELM, C. International Cooperation Behind the Veil of Uncertainty. The Case of Transboundary Acidification. **Environmental and Resource Economics**. **12**, 1998, 185–201.

HIRSHLEIFER, J. RILEY, J. G. **The analytics on uncertainty and information**. New York: Cambridge University Press, 1992.

HOEL, M. Global Environmental Problems: The Effects os Unilkateral Action Taken by One Country. **Journal of Environmental Economics and Management**. Vol. 20, 1991, 55-70.

HOFFERT, M. I., CALLEGARI, A. J., HSIEH, A-T. The role of deep sea heat storage in the secular response to climatic forcing. **J. Geophy. Res.**, 85, (C11), 1980, 6667-6679.

HOUGHTON, J. T., JENKINS, G..J., EPHRAUMS, J..J., Eds., **Climate Change**. The IPCC Scientific Assessment. New York: Cambridge University Press, 1992.

HOUGHTON, J. T., MEIRA FILHO, L. G., BRUCE, J., LEE, H., CALLANDER, B. A, HAITES, E., N. HARRIS, N., MASKELL, K., Eds., **Climate Change – 1994. Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios**. Cambridge: Cambrige University Press, 1995.

HOUGHTON, J. T., MEIRA FILHO, L. G.,, CALLANDER, B. A, HAITES, E., N. HARRIS, N., KATTEMBERG, A , MASKELL, K., Eds., **Climate Change – 1995. The Science Of Climate Chamge**. Cambridge: Cambridge University Press, 1996 .

HOUGHTON, J.. **Global Warming. The Complete Briefing**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997

JACOBY, H. D., PRINN, R. G., **Uncertainty in climate change policy analysis**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report n. 1, 1994.

JENNINGS, N. R., SYCARA, K., WOOLDRIDGE, M. A Roadmap of research Agent and Development. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, 1, 1998., 275-306.

JEPMA, C. J., MUNASINGHE, M., **Climate Change Policy. Facts, Issues and Analyses.** Cambridge: Cambridge University Press, 1998.

KEOHANE R. O., **After Hegemony: Cooperation and Discord in the World Political Economy.** Princeton: Princeton University Press, 1984.

KRAUSE, P., CLARK, D. **Representing Uncertain Knowledge. A Artificial Intelligence Approach.** Oxford: Intellect Ltd, 1993.

KYOTO. **The Kyoto Protocol to the Convention on Climate Change.** Ministério de Ciência e Tecnologia. República federativa do Brasil, 1997.

LAURANTS, Y. **La modélisation économique de la coopération internationale pour le cas de l'effet de serre: de l'adaptation d'un modèle traditionnel à l'articulation de points de vue.** Thèse de Doctorat. Université de Paris I Panthéon- Sorbonne., 1997.

LEMPERT, R. I., SCHLESINGER M. E. **Adaptive Strategies for Climate Change. Innovative Energy Strategies for CO2 Stabilization.** Cambridge University Press, 1997.

LIVINGSTON M. Transboundary Environmental Degradation: Market failure, Power and Instrumental Justice. **Journal of Economic Issues**, Vol. 23, 1989, 79-91.

LORENZ, E. N. **The essence of the chaos.** Seattle: University of Washington Press, 1993.

McCARTHY, J.J., CANZIANI, O.F., LEARY, N.A., DOKKEN, D.J., AND WHITE, K.S., eds.: **Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

MADDISON, D.. A cost-benefit analysis of slowing climate change. **Energy Policy**, vol. 4/5, 1995.p. 337.

MÄLER, K.G. International Environmental Problems. **Oxford Review of Economic Policy**, n. 6, 1990, .80-108

MANNING, M., PETIT, M., EASTERLING, D., MURPHY, J., PATWARDHAN, A., ROGNER, HH., SWART, YOUHE, G.. **Describing Scientific Uncertainties in Climate Change to Support Analysis of Risk and of Options**. IPCC Workshop Report. Co Kildare, Ireland, 2004.

METZ, B., DAVIDSON, O., SWART, R., AND PAN, J., eds.: **Climate Change 2001: Mitigation**, Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. , Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

MITCHELL, T. D., JOHNS, EAGLES, M., INGRAM, W. J., DAVIS, R. A. Towards the construction of climate change scenarios. **Climate Change**, 41, 5, 1999, 47-581.

MORGAN, M. G., HENRION, M. **Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis** . Cambridge: Cambridge University Press. 1990.

MORRISETTE, P.M.. Integrated Assessment Models. In: CIESIN: Consortium for International Earth Science Information Network. Thematic Guide to Integrated Assessment Modeling of Climate Change. (on Line).<http://sedac.ciesin.org/mva/MVAUG/urgwhy.html> , 2002.

MOSS, S., PAHL-WOHLSTL, C., DOWNING, T. Agent-Based Integrated Assessment Modelling: the example of climate change. **Integrated Assessment**, 2 , 2001., 17-30

NORDHAUS, W. D. Expert opinion no climate change. **American Scientist**, 82, 1994, 45-51.

NORDHAUS, W. D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. **Science**, 258, , 1992., pp1315-1319.

NORDHAUS W. D., BOYER J. **Roll the DICE Again: Economic Models of Global Warming**. Yale, Yale University, 1999

NAKICENOVIC. N., SWART (eds). **Special Report on emissions scenarios**. Cmbridge: Cmabridge University Press. 2000.

PÉREAU, J.-C. AND T. TAZDAÏT. Cooperation and Unilateral Commitment in the Presence of Global Environmental Problems. **Environmental and Resource Economics**, vol. 20, 2001, 225-239.

PETIT, M.L. **Control Theory and Dynamic Games in Economic Policy Analysis**, Cambridge : Cambridge University Press, 1990

PEW CENTER. Proceedings of a Workshop on the Timing of Climate Change Policies, Washington, DC, 11 to 12 October, Pew Center on Global Climate Change, Arlington, Virginia. Disponível em www.pewclimate.org.

PINTO, L. C. , HARRISON, G. W. **Multilateral negotiations over climate change policies. Núcleo de Investigação em Microeconomia aplicada**. Universidade do Minho. Portugal. Working Paper Series, n. 1, 2000.

POPPER, K. **A Miséria do Historicismo**. São Paulo: Editora Cultrix e Ed. da Universidade de São Paulo, 1980.

RAPER, S. C. B., GREGORY, J. M., OSBORN, T. J. Use of an upwelling-diffusion energy balance climate model to simulate and diagnose A/OGCM results. **Climate Dynamics**, 17, 2001, 601-613

RIVERO, S. L. M. **Um Framework para Simulação Econômico Baseado em um Modelo de Agente Adaptativo Antecipatório com Racionalidade Limitada**. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. 1999.

ROBALINO D A., LEMPERT R. J. **Carrots and Sticks for New Technology: Crafting Greenhouse Gas Reduction Policies for a Heterogeneous and Uncertain World**. Rand Corporation, www.evolvinglogic.com, 1998.

ROUGHGARDEN, T, SCHNEIDER, S. H. Climate change policy: quantifying uncertainties for damages and optimal carbon taxes. **Energy Policy**, 27, 1999, 415-429.

ROTMANS, J., DOWLATABADI, H. Integrated assessment modeling. In: Malone, E. L. (ed). **Human choice and climate change**. V. 3. The tool for policy analysis. Ohio: Battelle Press, 1998.

RUSSELL S., NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A modern approach**. New Jersey : Prentice Hall, 1995.

SAREWITZ, D. PIEKLE Jr, R. A.. Prediction in Science and policy. **Technology in Society**, 21, 1999, 121-133.,

SARMIENTO, J. L. Oceanic uptake of anthropogenic CO₂: The major Uncertainties. *Global Biogeochemical Cycles*, Vol. 5, n. 4, pp. 309-313, 1991.

SAVIOTTI, P. P. **Technological Evolution, Variety and The Economy**. Cheltenham: Edward Elgar.UK, 1996.

SCHNEIDER, S. H. Can we estimate the likelihood of climate change at 2100? **Climate Change**, 52, 2002, 441-451.

SCHNEIDER, S. H., TURNER II, B. L., GARRIGA, H. M. Imaginable surprise in global change science. **Journal of Risk Research**, I, 1998, 165-185.

SIMON, H. A. , **Models of Man**. New York: John Wiley & Sons, 1966.

SJÖSTEDT, G. **International Environmental Negotiations**. Paris: Sage , 1994.

SLAUGHTER, R. A. Why we should care for future generations now. **Futures**, 26, 1994., 1080,

SNIDAL D. **The Game Theory of Politics, Explaining Cooperation Under Anarchy: Hypotheses and Strategies**, Oye (ed), Princeton University Press, Princeton, 1986.

SOLOW R. A contribution to the theory of economic growth , **Quarterly Journal of Economics**, 1956.

SOROOS, M. E. Global Change, Environmental Security and the Prisoner' Dilemma. **Journal of Peace Research**, Vol. 31, 1994, 317-332.

SPRINZ, D., VAAHATORANTA. The Interested - Based Explanation of International **Environmental Policy**. **International Organization**, Vol. 48, 1994, N. 1.

SPRINZ, D. F. LUTERBACHER, U. (Eds) **International Relations and Global Climate Change**. Potsdam Institute for Climate Impact Research. Potsdam, Germany. 2002.

SOKOLOV, A . P., STONE, P. H. **Global warming projections: sensitivity in deep ocean mixing**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Report n. 11, ., 2001.

SRES. **Special Report- Emissions Scenarios**. Summary for Policymakers, 2001.

STIRLING A. Risk at turning point? **Journal of Risk Research**, 1, 97-109, 1998.

STREETS, D. G., GLANTZ, M. H.. Exploring the concept of climate surprise. **Global Environmental Change – Human and Policy Dimensions**, 10, 2000., 97-107.

TAYLOR, M., WARD, H. Chickens, Whales, and Lumpy Public Goods: Altrenative Models of Public-Goods Provision. **Political Studies**, Vol. 30, 1982, 350-370.

TIETENBERG, T. **Environmental and natural resource economics**. New york: Harper Collins College Publishers, 1996.

TSEBELIS, G. **Jogos Ocultos**. Escolha racional no campo da política comparada. (Tradução do Original em Inglês: Nested Games: Rational Choise in Comparative Politics). São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

TULKENS, H. Cooperative vs. Free Riding in International Environmental Affairs: Two Approaches, in N. Hanley and H. Folmer (eds.) **Game Theory and the Environment**, London: Edward Elgar.26,1998.

VALVERDE A. J, JR., JACOBY H. D., KAUFMAN G. M. **Sequential Climate Decisions Under Uncertainty: An Integrated Framework**. Massachusetts Institute of

Technology. *Joint Program on the Science and Policy of Global Change*. Report #38.. <http://mit.edu/globalchange/www/rpt38.html>, 1998.

WALKER, W. E., HARREMOÉS, P., ROTMANS, J., VAN DER SLUIJS, J. P., VAN ASSELT, M. B. A., JANSSEM, P. H. M., VON KRAUSS, K. Defining Uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. **Integrated Assessment**, 23, 2003, 234-256.

WARD, H. Game Theory and the Politics of the Global Commons. **Journal of Conflict Resolution**, Vol. 37, 1993., 203-235.

WATSON, ROBERT T. (ed.) **Climate Change 2001** : Synthesis Report. Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, Cambridge University Press, 2001.

WEBSTER, M. D. Uncertainty in Future Carbon Emissions: A Preliminary Exploration. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, Report No. 30, 1997.

YOUNG ORAN R. (ed) **The Effectiveness of International Environmental Regimes: The Causal Connections and Behavioral Mechanisms**. Cambridge, MA: MIT Press, 2002.

APÊNDICE A – Taxa Social de Desconto e Equidade

A taxa de desconto é um fator extremamente importante na caracterização da preferência temporal dos agentes econômicos. Sua escolha reflete uma postura ética e tem fortes repercussões sobre os aspectos ligados à equidade intergeracional e por isso se relacionam de perto com o objetivo do desenvolvimento sustentável. Em mudanças climáticas lidamos com um problema de muito longo prazo e a escolha de uma taxa de desconto afetará sensivelmente os resultados das decisões. Essa é uma questão complexa que não será abordada aqui. Ao escolhermos uma taxa de desconto igual a zero, ou de forma equivalente, uma taxa de preferência temporal igual à unidade, $\delta^j = 1$, como nas Equações 3.23 e 3.32, estamos supondo que todos os agentes dão o mesmo valor monetário aos danos presentes ou futuros, mesmo no futuro distante. Essa é uma hipótese muito forte que não corresponde à realidade, mas a formulamos para fixar um valor da taxa de desconto e podermos avançar em nosso objetivo de modelagem e simulação exploratórias. Posteriormente podemos explorar esta questão para verificarmos o efeito sobre a sequência das negociações de países diferentes adotarem diferentes taxas de desconto. A seguir descrevemos os vários tipos de equidade e sua relação com a taxa de desconto. A partir destes conceitos podemos em trabalhos futuros introduzir a dimensão ética no modelo dos agentes.

A.1 Equidade e Taxa de Desconto

A Equidade no contexto de uma decisão social significa que o resultado é bom e justo. Ela é um elemento importante do quadro de tomada de decisão coletiva necessário para responder à mudança climática global.

As exigências da Convenção Quadro indicam que os princípios da equidade devem ser aplicados a 1) questões de procedimento, isto é, a questões sobre *como* as decisões serão tomadas; 2) questões de conseqüências, isto é, como os resultados daquelas decisões estarão *distribuídos* na sociedade.

Ambos os aspectos são importantes porque procedimentos equânimes não necessariamente levam a resultados equânimes, e vice versa, resultados equânimes podem bem ocorrer provenientes de processos de tomada decisão não equânimes.

O apoio à Convenção e aceitação de suas diretrizes de ação dependerão grandemente da participação geral da comunidade global e sobre quão equânimes elas são percebidas serem, por todos os participantes.

A.1.1 Equidade nos Procedimentos

Ela tem duas componentes. Primeiro, pertencente à participação, a equidade implica que aqueles que são afetados pelas decisões deveriam ter algo a dizer na tomada destas decisões, ou através de participação direta ou através de representação. Segundo, pertencente ao processo, a equidade deve assegurar iguais tratamentos diante da lei: casos similares devem ser tratados de uma maneira similar e as exceções devem ser estar baseadas em princípios.

A.1.2 Equidade nas Consequências

Também tem dois elementos relativos à distribuição dos custos e benefícios. a) os efeitos da adaptação à mudança climática; b) medidas de mitigação (incluindo alocação de direitos de emissões futuras).

Ambos os elementos têm implicações para a distribuição e cargas entre e dentro dos países (equidade intrageracional ou distribuição espacial) e entre as gerações presentes e futuras (intergeracional ou distribuição temporal).

A resposta humana à mudança do clima requer a aplicação da equidade em um nível bem mais elevado (global) onde existe bem menos experiência prática. Normas sociais e culturais e visões sobre ética, meio ambiente e desenvolvimento complicam os esforços de se alcançar um consenso sobre questões de equidade nos procedimentos e nas consequências. Mesmo a urgência da resposta à mudança climática está sujeita à disputa

Qualquer resposta global à mudança de clima será no final um compromisso entre diferentes visões de mundo, cada uma das quais é também influenciada pelo auto interesse e tentativas de deslocar o compromisso ao seu próprio favor. (JEPMA; MUNASINGHE, 1998; DUTSCHKE, M, 2000).

A.1.3 Equidade Intra Geracional (espacial)

Embora a equidade não seja sinônimo de igualdade, a diferença entre os países afetam questões de equidade intra geracional. As respostas estratégicas internacionais serão finalmente traduzidas em ações adotadas ao nível nacional e portanto deveriam refletir as preocupações com a equidade dentro dos países também.

A.1.4 Equidade Inter Geracional (Temporal)

As gerações futuras podem ser mais ricas ou mais pobres do que a geração presente e aqueles que viveram no passado e aqueles que vivem no presente indubitavelmente contribuíram e contribuirão para os efeitos das mudanças climáticas futuras.

Embora as gerações futuras terão que lidar com as conseqüências das emissões de gases estufa do passado elas também se beneficiarão dos sacrifícios e investimentos feitos pelos seus ancestrais. Ao mesmo tempo ainda não é claro se nossos descendentes serão mais ou menos vulneráveis às conseqüências da mudança do clima.

Duas questões fundamentais requerem atenção especial para a equidade inter geracional. Primeiro, todas as decisões relativas à mudança de clima são feitas pela geração vivendo na época em que as decisões são tomadas. Na medida em que as gerações futuras não participam das decisões, cuidados adicionais devem ser tomados para assegurar que seus direitos estejam protegidos.

Segundo, uma vez que uma cadeia de eventos se desdobre, será difícil compensar futuras gerações pelos erros e equívocos das gerações passadas. Novamente, prudência extra é requerida para evitar impor cargas futuras que sejam ambas irreversíveis e impossíveis de compensar. Entretanto as gerações se superpõe na prática (por exemplo, pais e filhos) e isto provavelmente resultará na incorporação automática de alguma preocupação inter geracional na taxa de desconto e na tomada de decisão em geral (ver abaixo).(Jepma, 1998).

A.2 Taxa Social de Desconto

Existem vários critérios de decisão relacionados a questões de equidade, que podem ser usados para assegurar uma medida temporal de equidade. A partir de um ponto de vista

econômico, um dos principais instrumentos disponíveis para influenciar a alocação de recursos ao longo do tempo é a *taxa social de desconto*. (Jepma, 1998; Tietenberg, 1996).

Conceitualmente, a taxa de juros onde o capital presente cresce no futuro é o inverso da taxa de desconto, onde gastos futuros são descontados ao seu valor presente.

As conclusões derivadas de qualquer análise política de longo prazo sobre mudança de clima global dependerão de forma crucial do valor numérico da taxa de desconto que for escolhida. É importante ter em mente que nós estamos discutindo uma taxa de desconto real sem a inflação. Desde que a taxa de desconto é um método para comparar custos e benefícios econômicos que ocorrem em diferentes épocas, ela terá um efeito direto sobre a equidade intergeracional, (JEPMA; MUNASINGHE 1998, TIETEMBERG, 1996).

No caso da mudança climática, os efeitos do desconto serão especialmente pronunciados, por duas razões: a) os horizontes de tempo relevantes são extremamente longos; b) muitos dos custos de mitigação ocorrem relativamente cedo, embora os benefícios estão em um futuro distante.

Sinteticamente falando, relativamente às decisões presentes, quanto maior for a taxa de desconto, menos importantes serão os benefícios futuros de impactos evitados, em comparação aos custos de curto prazo de medidas mitigadoras.

APÊNDICE B - Critérios Adicionais de Escolha

Existem outros critérios de decisão, todos baseados na Análise Custo Benefício. A seguir descrevemos alguns deles que podem ser usados pelos agentes para avaliar suas decisões.

B.1 A Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é também usada como um critério de decisão. Ela pode ser definida como

$$\sum_{t=0}^H \frac{(B(t) - C(t))}{(1 + TIR)^t} = 0$$

isto é, a TIR é a taxa de desconto que reduz o VLP a zero. A decisão é aceitável se $TIR > r$, o que em muitos casos implica que $VLP > 0$. Problemas de interpretação ocorrem se projetos alternativos têm tempos de vida bem diferentes, tal que a taxa de desconto desempenha um papel crucial.

B.2 Razão Custo-Benefício

Um outro critério freqüentemente usado é a razão custo-benefício (RCB):

$$RCB = \frac{\sum_{t=0}^H \left(\frac{B(t)}{(1+r)^t} \right)}{\sum_{t=0}^H \left(\frac{C(t)}{(1+r)^t} \right)}$$

Se $RCB > 1$ então $VLP > 0$ e o projeto é aceitável. Cada um destes critérios têm forças e fraquezas, mas VLP é provavelmente o mais útil.

B.3 Regra do Menor Custo

O teste do VPL pode ser usado para derivar a regra do menor custo. Esta abordagem é aplicável em casos onde os benefícios de duas decisões alternativas são iguais, isto é, servem ao mesmo propósito. A comparação das alternativas é simplificada como segue:

$$VLP(I) - VLP(II) = \sum_{t=0}^H \frac{(C_{II}(t) - C_I(t))}{(1+r)^t}$$

pois os benefícios se cancelam. Portanto se

$$\sum_{t=0}^H \frac{C_{II}(t)}{(1+r)^t} > \sum_{t=0}^H \frac{C_I(t)}{(1+r)^t}$$

isto implica que $VPL(I) > VPL(II)$. Em outras palavras, a decisão que tem o menor valor presente dos custos é a preferida. Esta é a chamada a alternativa de menor custo, quando os benefícios são iguais. Entretanto mesmo depois de selecionada a alternativa de menor custo, deve-se garantir que ela tem um $VPL > 0$ (JEPMA; MUNASINGHE 1998).

APÊNDICE C - A Teoria Baseada no Auto-Interesse dos Países

Segundo (SPRINZ; VAAHTORANTA, 1994, 2001) pode-se compreender as atitudes dos governos em negociações internacionais ambientais a partir da hipótese básica de que eles agem, nestas negociações, movidos unicamente pelos interesses nacionais e daqueles a quem representam. Eles denominam esta abordagem de Teoria Baseada no Auto-Interesse dos países.

A partir do estudo do processo de formação do Protocolo de Montreal para controlar as emissões de gases que deterioram a camada de ozônio, do Protocolo de Quioto para a redução de emissões de GEE e da Convenção de Helsinque que controla emissões de gases que produzem chuva ácida nos países Europeus, estes autores formularam algumas hipóteses que nos permitem explicar, em uma primeira aproximação, o comportamento de vários países em cada um desses Regimes Internacionais Ambientais.

Dentre as suas hipóteses, as que nos interessam aqui são aquelas baseadas em custos de abatimento e danos ambientais esperados, e são as seguintes:

H1: Quanto mais ecologicamente vulnerável for um país, tanto mais provavelmente ele demandará reduções de emissões intensas.

H2: Quanto mais altos forem os custos de abatimento em um país, menos provavelmente ele demandará fortes reduções de emissões.

A partir das hipóteses H1 e H2, (SPRINZ & VAAHTORANTA, 1994) elaboraram uma classificação das atitudes dos países em negociações ambientais internacionais, usando

quatro categorias básicas: Proteladores ou “Arrastadores”, Promotores, Intermediários e Expectadores (Tabela C.1).

		Vulnerabilidade Ecológica ESPERADA	
		BAIXA	ALTA
Custos de Abatimento ESPERADOS	BAIXOS	(1) Bystanders (Expectadores)	(2) Pushers (Promotores)
	ALTOS	(3) Draggers (Proteladores)	(3) Intermediates (Intermediários)

Tabela C.1: Classificação geral dos papéis desempenhados pelos países nas negociações internacionais ambientais, segundo. (SPRINZ & VAAHTORANTA, 1994).

Um Protelador típico, caso (Custos, Danos) = (Altos, Baixos), tentará evitar qualquer compromisso com reduções de emissões intensas para não incorrer em altos custos. Sua atitude básica é protelar qualquer acordo a esse respeito.

Um Promotor, que é o caso (Custos, Danos) = (Baixos, Altos), por estar muito preocupado com os danos potenciais em seu país, se empenhará em incentivar ou pressionar os outros países a que façam reduções intensas. Sua atitude básica é a de promover e facilitar acordos deste tipo.

O tipo Expectador, caso (Custos, Danos) = (Baixo, Baixo) é aquele país que por não ter nenhuma motivação para participar do acordo, não o dificulta nem o incentiva. Ele se coloca em uma posição de simples observador do processo de busca de um acordo ambiental internacional.

O tipo Intermediário, caso (Custos, Danos) = (Alto, Alto), abarca países que podem ter algumas vezes uma atitude de Promotor, outras vezes de Protelador, e outras vezes uma atitude ambígua. Mas nunca desempenham o papel de Expectadores.

Seu interesse é que por acordos que reduzam emissões intensamente para que seus danos sejam bastante diminuídos, mas evita ao máximo que tais acordos o forcem a reduzir muito suas próprias emissões.

Nas negociações que levaram ao Protocolo de Quioto, a explicação baseada no auto-interesse dos países foi testada e obteve-se um bom grau de acordo com os fatos observados para alguns dentre os principais países (Tabela C.2) (SPRINZ & VAAHTORANTA, 1994).

Esses autores reconhecem as limitações dessa teoria para explicar completamente as atitudes dos países nesse tipo de negociação, e desenvolveram uma análise mais refinada introduzindo sub-categorias, tais como protelador fraco e forte, que embora ainda limitada, consegue explicar alguns fatos adicionais observados. Nós não consideraremos aqui esta teoria mais refinada.

Hipótese	EUA	UE	Alemanha	Índia
H1	+	+	0	–
H2	++	++	+	+

Tabela C.2: Grau de concordância das hipóteses de (Sprinz & Vaahtoranta, 1994) aplicadas ao caso das negociações de Quioto. Legenda: (+) concorda. (++) concorda bastante. (0) nem concorda nem discorda. (–) discorda. (SPRINZ & VAAHTORANTA, 1994).

Apesar dessa teoria ser aproximadamente verdadeira, a adotamos para modelar os governos, no contexto das negociações, de forma estilizada, supondo-os constantemente e somente interessados na vulnerabilidade de seu território nacional e nos custos de abatimento praticados ou futuros em sua economia. Não nos fixamos na tipologia dos agentes, mas nos inspiramos nela para gerar uma Regra que amplia ou restringe o espectro de opções de cada governo antes de ir à mesa de negociações. Usamos para modelar cada negociação a Teoria dos Jogos como uma matriz conceitual a partir da qual, mediante modificações adequadas ao nosso objetivo, construímos um modelo de governo que negocia metas de reduções de emissões atentando para aqueles indicadores. Essa abordagem permite flexibilidade para aprimoramentos futuros, aproximando o modelo dos agentes da tipologia de (SPRINZ & VAAHTORANTA, 1994, 2001).

APÊNDICE D - Modelos de Análise Integrada

D.1 A Estrutura Geral de um MAI

Um Modelo de Análise Integrada, MAI, é uma ferramenta para conduzir análises integradas sobre as políticas e impactos em mudanças climáticas. Muitas análises integradas sobre mudança de clima que estão atualmente em curso estão desenvolvendo um modelo de análise integrada. Na Figura D.1 podemos ver um esquema da estrutura de um MAI típico.(CARTER, 1995; MORRISSETTE, 2002).

Figura D.1: A estrutura de um Modelo de Análise Integrada sobre Mudança de Clima Global típico, (CARTER, 1995).

Um Modelo de Análise Integrada sobre mudança de clima é um modelo matemático computadorizado baseado em hipóteses explícitas sobre como o sistema modelado

comporta-se. A força de um MAI é sua habilidade de calcular as conseqüências de diferentes hipóteses e inter-relacionar muitos fatores simultaneamente. Estes modelos tentam quantificar tanto quanto possível as relações de causa e efeito do problema da mudança de clima e os elos cruzados e interações entre diferentes questões.(MORRISSETE, 2002)

Os MAI de mudança de clima são compostos de sub-modelos, que cobrem o sistema do clima, a biosfera e a atividade econômica. Esses modelos devem se apoiar em sub-modelos por causa da complexidade dos sistemas do clima, da biosfera e dos sistemas sociais. Um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera, MCGA, por exemplo, já usa sua capacidade computacional até o limite da tecnologia dos supercomputadores atuais. Os sub-modelos de um MAI são mais simples, sendo versões reformuladas dos modelos maiores derivados a partir da literatura científica.

Os MAI podem abordar as questões de mudança de clima a partir de várias perspectivas. Por exemplo, podemos classificar os MAI a partir de três categorias baseadas no tipo de tomada de decisão incorporada nos modelos, isto é sobre como as políticas são escolhidas. As três categorias são: 1) políticas baseadas em custo-efetividade 2) políticas baseadas sobre um limite fixado para impactos físicos aceitáveis e 3) políticas baseadas sobre análise de custo-benefício. Os modelos de custo efetividade e de limites de impactos tendem a ser mais estreitamente focados do que a de custo-benefício, que requerem uma integração dos sistemas sociais e naturais a fim de analisar completamente os impactos e as respostas (MADISON, 1995; MORRISSETTE, 2002).

Entre os modelos do tipo custo-benefício existe considerável variação incluindo diferenças em escala (por exemplo, global x regional) e escopo (número de setores examinados) e nas pressuposições que subjazem aos modelos. Nenhum MAI individual pode capturar o espectro completo de questões, aspectos e complexidades que caracterizam o problema de mudança climática. Ao invés disso, diferentes MAI focam-se sobre diferentes questões e aspectos. Existem diferentes vantagens a esta abordagem. Por exemplo, ela fornece a tomadores de decisões diferentes perspectivas sobre o problema de mudança de clima global e facilita a identificação de lacunas no conhecimento e das incertezas.

Estes modelos estão sendo usados largamente para examinar três questões chave:

- Qual é a amplitude aceitável de variação para a evolução de longo prazo dos sistemas humanos e natural em interação?
- Quais são as implicações das diferentes respostas estratégicas e opções políticas sobre o sistema natural e sobre a própria sociedade?
- Como podem os esforços de pesquisa e obtenção de informação serem priorizados? (MORRISSETTE, 2002).

D.2 Usos de Modelos de Análise Integrada

Ao avaliar os usos e méritos de um MAI de mudança de clima é essencial entender que eles não são modelos prescritivos. Esses modelos não podem prever impactos, nem podem dizer aos políticos como responder à mudança de clima. Isto é devido aos limites em nosso conhecimento do problema de mudança do clima, aos limites nas abordagens das modelagens e da tecnologia atual de computadores. Se os MAI não podem fornecer respostas específicas a questões políticas, o que eles podem fazer?

Um uso mais direto de um MAI é o de ferramenta para organizar e avaliar o conhecimento sobre o problema de mudança de clima, e identificar incertezas e lacunas de conhecimento. Os MAI podem nos informar sobre o que nós não sabemos sobre o problema de mudança de clima. Esta é uma informação chave para estabelecer prioridades de pesquisa e para o entendimento das limitações das respostas estratégicas. Os MAI podem também ser uma ferramenta de aprendizagem valiosa para cientistas e políticos e uma interessante ferramenta pedagógica na Universidade. Esses modelos fornecem uma diferente perspectiva sobre o problema de mudança de clima comparadas às dos MCGA ou às abordagens disciplinares mais restritas. É nessa função heurística que reside sua maior força.

D.3 Os Potenciais e os Limites dos MAI

Os resultados produzidos pelos MAI têm levado a algumas conclusões tentativas (DOWLATABADI, 1995; MORRISSETTE, 2002):

1. Os resultados do modelo não são mais seguros que os dados científicos e sócio econômicos subjacentes usados como entradas. Entretanto, eles fornecem esclarecimentos úteis nos elos complexos envolvidos em análise de mudança de clima.
2. Resultados regionalmente desagregados estão começando a emergir, que são úteis para esclarecer questões que permanecem não resolvidas nas negociações em mudança climática.
3. A identificação de lacunas no nosso conhecimento científico e sócio econômico está se aperfeiçoando.
4. Certos parâmetros (tais como os tipos de função objetivo, taxa de desconto e ritmo dos esforços de mitigação) parecem afetar os resultados e custos mais criticamente do que outros, especialmente no curto e médio prazos.
5. Políticas que aumentam a flexibilidade de respostas parecem ser desejáveis. Os resultados também tendem a favorecer esforços de pesquisa e desenvolvimento que facilitem a adaptação à mudança de clima e aperfeiçoem a eficiência com a qual recursos naturais são usados.
6. O clima pode não necessariamente ser o determinante mais importante das mudanças futuras que afetem os seres humanos; práticas agrícolas e urbanização podem vir a ter no mínimo tanta importância quanto mudança de clima e seus impactos.

D.4 O Modelo IMAGE 2.2

A seguir descreveremos de forma sucinta um modelo, denominado IMAGE 2.2 que tem como um de seus principais objetivos preencher a lacuna que existe em pesquisa sobre mudança climática global, sob um ponto de vista interdisciplinar. O objetivo de descrevermos este modelo aqui é indicar de forma concreta como podemos alcançar um estudo integrado sobre este tema de forma a produzirmos avanços científicos e políticos nesta área.

O IMAGE 2.2 (Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect) foi desenvolvido pela Agência Nacional de Meio Ambiente e Saúde Pública dos Países Baixos, e é a versão aprimorada do IMAGE 1.0 e do ESCAPE, um outro MAI. O IMAGE 2.2 contém

elementos destes dois modelos juntamente com outros meta-modelos adicionados a sua estrutura. Na Figura D.2 pode ser visto um esquema do IMAGE 2.2 com seus meta-modelos descritos mais adiante.

Figura D.2: A estrutura do Modelo IMAGE 2.2 (RIVM, 2004)

Os objetivos científicos do IMAGE 2.2 são:

- Fornecer “insights” sobre a importância relativa dos diferentes elos no sistema sociedade – biosfera – clima.
- Investigar os pesos relativos de diferentes “feedbacks” neste sistema.
- Estimar as fontes mais importantes de incertezas em um sistema com tais conectividades.
- Ajudar a identificar lacunas em nosso conhecimento sobre o sistema a fim de ajudar a fixar uma agenda para pesquisa climática.

Os objetivos políticos do modelo são:

- Ligar importantes aspectos científicos e políticos da mudança de clima global de uma maneira geograficamente explícita a fim de dar suporte a tomada de decisão.
- Fornecer uma perspectiva dinâmica e de longo prazo (de 50 a 100 anos) sobre as consequências da mudança de clima. Fornecer “insights” sobre os elos cruzados do sistema e os efeitos colaterais de várias medidas políticas.
- Investigar a influência das tendências econômicas e do desenvolvimento tecnológico sobre a mudança de clima e sobre seus impactos.
- Fornecer uma base quantitativa para analisar os custos e benefícios de várias medidas, incluindo medidas preventivas e de adaptação.

Os Sub – Sistemas do Modelo

Estes objetivos influenciaram o desenho e desenvolvimento do modelo. Ele consiste de três sub sistemas de modelos completamente ligados uns aos outros (Figura D.2):

- O Sistema Energia – Indústria
- O Sistema Meio Ambiente Terrestre
- O Sistema Atmosfera – Oceano

Os modelos Energia – Indústria computam as emissões de gases estufa em 13 regiões do mundo como uma função do consumo de energia e da produção industrial. O consumo de energia de uso final é computado a partir de vários fatores econômicos

geradores do mesmo. Os seguintes meta modelos estão incluídos: Energia-Economia, Emissões a partir de Energia, Produção Industrial e Emissões Industriais.

Os Modelos do Meio Ambiente Terrestre simulam as mudanças na cobertura vegetal terrestre baseada nos fatores econômicos e climáticos. O papel da cobertura vegetal e de outros fatores são então tomados em conta para computar o fluxo de CO₂ e outros gases estufa a partir da Biosfera para a Atmosfera. Este subsistema inclui os seguintes meta modelos: Demanda Agrícola, Vegetação Terrestre, Cobertura Terrestre, Carbono Terrestre e Emissões por Uso da Terra.

Os modelos do sistema Atmosfera – Oceano computam a elevação dos gases estufa na atmosfera e os padrões resultantes da temperatura média e precipitação. Os seguintes meta modelos estão incluídos: Composição Atmosférica, Clima Atmosférico Zonal, Clima Oceânico e Química e Biosfera Oceânicas.

Uma das maiores contribuições científicas do IMAGE 2.2 é a sua representação de muitos dos elos e feedbacks entre os modelos nestes sub sistemas e entre os sub sistemas.

Escalas Espaciais e Temporais.

A fim de fornecer uma perspectiva de larga escala sobre as conseqüências da mudança climática, o horizonte de tempo do modelo se estende até o ano 2100. Os passos temporais dos diferentes meta modelos variam tipicamente de um dia a cinco anos, dependendo do subsistema considerado. O sistema usa uma grade com escala espacial de 0,5 ° de latitude por 0,5 ° de longitude.

O Desempenho e Potencial do IMAGE 2.2

A principal conquista deste modelo é sua apresentação de uma visão ampla geograficamente detalhada, global e dinâmica do sistema sociedade - biosfera – clima. O modelo representa em algum detalhe a relação entre as tendências demográficas e econômicas da sociedade e a geração de gases estufa. Contudo, sua representação da sociedade é muito primitiva comparada a vários modelos macro econômicos globais. O IIMAGE é uma primeira tentativa de simular com detalhe geográfico a transformação da cobertura vegetal conforme ela é afetada por fatores econômicos, demográficos e climáticos.

Ele liga explicitamente e geograficamente essas mudanças na cobertura vegetal com o fluxo de CO₂ e outros gases estufa entre a biosfera e atmosfera, e inversamente, toma em conta o efeito da mudança climática sobre a produtividade das biosferas oceânica e terrestre. Ao mesmo tempo ele acopla dinamicamente as emissões provenientes da sociedade e da biosfera com os processos físicos e químicos na atmosfera e oceano, e calcula a retroação das mudanças de clima sobre as biosferas terrestres e oceânicas.

Ligando todo o sistema, o modelo foi capaz de reproduzir as tendências do consumo de energia no período de 1970-1990, emissões relacionadas ao sistema indústria / energia, os fluxos terrestres de CO₂ e outros gases estufa para a atmosfera, elevação das concentrações dos gases estufa na atmosfera, e padrões climáticos atuais de longo prazo. O detalhe geográfico é disponível para muitos destes cálculos. Isto foi conseguido ajustando um número limitado de parâmetros como descrito no texto.

Por causa de seus componentes e da resolução espacial, o modelo é particularmente bem adequado para investigar os objetivos científicos e de orientação política citados acima. Em particular ele tem o potencial de fornecer novos “insights” nos elos e feedbacks do sistema sociedade – biosfera – clima (ALCAMO, 2002).

D.5 As Grandes Questões não Resolvidas sobre MAI

A Análise Integrada da mudança de clima em geral, abunda de questões não resolvidas. Desafios substantivos notáveis são, em geral, largamente reconhecidos. Por exemplo, com respeito a mudança de clima, os maiores desafios incluem os seguintes (MORRISSETTE, 2002):

- Aperfeiçoar o entendimento dos grandes fatores motrizes de longo prazo: mudança tecnológica e crescimento populacional;
- Construir melhores ferramentas para representar impactos e adaptação, e analisar políticas que facilitem a adaptação.
- Fornecer representação útil das incertezas, incluindo eventos extremos de baixa probabilidade, combinando as informações mais “soft” com as mais “hard”.

- Fornecer métodos para representar e analisar políticas já implementadas, ao invés de fazê-lo na forma idealizada.
- Promover ferramentas mais ricas para estudar tomadas de decisões coletivas e escolhas de outros agentes chave, movendo-se para além da posição ingênua de que a análise é dirigida a um tomador de decisões único com autoridade para tomar decisões políticas relevantes.
- Desenvolver ferramentas de análise sobre longos horizontes de tempo: colocando a mudança de clima no contexto de outras mudanças de 50 a 100 anos.

Além disso, existem várias questões não resolvidas que são mais gerais em caráter, interessadas com o escopo e audiência apropriados para as análises, as relações entre a análise e os políticos, e a extensão à qual as ferramentas de análise integrada podem ser generalizadas através das questões.

D.6 Questões Relativas aos Países em Desenvolvimento.

Além desses problemas, várias *fraquezas* dos MAI têm sido identificadas, especialmente em seu tratamento dos *países em desenvolvimento*. Esforços estão sendo feitos para atacar estes problemas, incluindo os seguintes (JEPMA; MUNASINGHE, 1998):

1. Todos os MAI até aqui têm sido construídos por pesquisadores de países desenvolvidos, sendo que boa parte das respostas políticas ocorrerá nos países em desenvolvimento, que podem não estar bem representados nos modelos.
2. Os MAI atuais têm tido grande necessidade de dados que podem estar mais prontamente disponíveis em países industrializados do que no mundo em desenvolvimento.
3. Projeções dos modelos tendem a assumir que países em desenvolvimento seguirão os mesmos padrões tecnológicos e de consumo do mundo industrializado.

4. A economia neoclássica, baseada em mercados e orientadas para a eficiência subjacente nos MAI podem não capturar estruturas sócio econômicas, ou respostas autônomas ou respostas comportamentais induzidas por políticas nos países em desenvolvimento.
5. O sistema de valores pode ser completamente diferente nos países em desenvolvimento, e os métodos de valoração baseados na “disposição em pagar” que têm sido usados nos países mais ricos poderia dar respostas distorcidas ou resultados desiguais quando aplicadas aos grupos mais pobres do Sul.
6. Às questões de equidade Norte – Sul precisam receber maior peso, desde que os MAI têm dado mais ênfase a objetivos de eficiência
7. A modelagem política deveria prestar mais atenção aos incentivos e desestímulos oferecidos aos países em desenvolvimento para participar de uma estratégia coletiva para atacar a mudança climática.
8. A maior parte das incertezas nos MAI atuais é de natureza científica, sendo que os países em desenvolvimento podem ser mais vulneráveis a questões surgindo de incertezas sócio econômicas (por exemplo, relacionadas à pobreza e à desigualdade).
9. Dado que as prioridades dos países em desenvolvimento estarão mais focalizadas sobre o crescimento e a erradicação da pobreza, mais atenção deve ser dada à integração das respostas climáticas com as políticas de desenvolvimento convencional dentro dos países. A efetividade dos instrumentos políticos e medidas usadas no mundo industrializado pode ser diferente nos países em desenvolvimento.

Apesar das dificuldades até aqui encontradas, os esforços contínuos devotados à modelagem integrada indicam que esta é uma abordagem potencialmente *promissora* para analisar questões e políticas de mudança de clima (JEPMA; MUNASINGHE, 1998).

APÊNDICE E - Teoria Global da Negociação

O modelo que desenvolvemos das negociações faz uso de conceitos da Teoria dos Jogos (TJ) e Teoria dos Jogos repetidos, mas não fica restrito a estas teorias. Procuramos de forma exploratória introduzir alguns componentes na tomada de decisão, através das regras de mudança de horizonte de tempo e regras para mudar opções estratégicas na seqüência de negociações que estão fora do escopo do tratamento usual formal feito na TJ. Nos apoiamos em uma abordagem mais geral, que faz uso de outras dimensões além da TJ. A seguir descrevemos sucintamente essa base conceitual.

E.1 A Negociação: Definições e Teorias

Para o desenvolvimento do modelo das negociações sobre reduções de emissões, estamos nos apoiando sobre conceitos e teorias da negociação, que nos permitem fazer uma abordagem mais ampla e flexível que aquela da Teoria dos Jogos, embora tomando esta Teoria como uma das dimensões básicas. A seguir expomos de forma resumida os conceitos que nos guiaram para isso.

Segundo (DUPONT, 1994), “a negociação é um sistema de decisão através do qual os atores buscam um acordo ao invés de agirem por via unilateral”. Esta definição pode ser decomposta em seis elementos fundamentais:

- Uma relação que supõe uma forma de comunicação, qualquer que ela seja, entre os atores envolvidos na negociação.
- A existência de divergências.
- A existência de interesses comuns.
- A busca de soluções aceitáveis para cada uma das partes.

- O caráter voluntário da atividade.
- A manutenção de uma relação entre os atores, como um instrumento do processo de negociação e como um resultado buscado.

O autor (BARTOS, 1974), por outro lado, propõe uma definição da negociação bastante próxima dos conceitos da economia do meio ambiente. Segundo este autor os ingredientes da negociação são os seguintes:

Na origem de uma negociação nós encontramos um conflito de interesses. Este conflito é condição necessária, mas não suficiente para a atividade da negociação. É necessário em seguida que o conflito de interesses seja “ativado” pelos atores. Na realidade o conflito de interesses pode estar “dormente”. Segundo este autor, ele existe em potência na maior parte das atividades humanas. Quando um dos atores tenta maximizar seus interesses individuais, por exemplo, com o crescimento de suas emissões de GEE, ele cria um problema para os outros, produzindo danos climáticos nos outros países. Ao assim fazer ele “ativa” o conflito de interesses e com isso tem-se um “conflito social”. O conflito social aparece com a percepção por parte dos agentes sobre os danos ou problemas causados pelas ações do outro agente. Quando o conflito de interesses é ativado em um conflito social, existe uma tendência a haver tensão e ao mesmo tempo uma motivação para se buscar uma solução aceitável pelas diferentes partes envolvidas no conflito. Estas são as condições da negociação e ela tem por objetivo fazer o conflito social retornar ao seu estado de conflito de interesse “dormente”. Essa transferência realizada pela negociação permite o desaparecimento do aspecto social do conflito de interesses, mas é muito raro que o conflito “dormente” desapareça por completo. Dito de outra maneira existe um certo número de relações entre os atores que são estruturais. Elas podem dar lugar a uma regulação social,

mas a interação entre as atividades e os agentes não fazem o conflito desaparecer por completo.

A história da Convenção do Clima e do Protocolo de Quioto segue esta seqüência, e nela podemos observar os inúmeros conflitos de interesses latentes, que cada rodada de negociações revela, e em uma dinâmica complexa, desdobram-se continuamente. A nossa questão principal é sobre o papel das incertezas nesse processo.

E.2 Os Eixos Epistemológicos e as Teorias da Negociação

Segundo (LAURANTS, 1997), nós podemos considerar que as teorias da negociação se organizam em torno de três eixos epistemológicos principais:

- O eixo dedutivo, que consiste em formular uma representação teórica que em seguida é confrontada com a realidade. A teoria precede a observação.
- O eixo indutivo, que consiste a partir da observação do real, retirar conceitos e lógicas universais. A observação precede a teoria.
- O eixo empírico, que consiste em se apoiar em experiências, de fatos constatados e mensurados para tirar conclusões, generalizá-las e tirar previsões e prognósticos. A observação não é orientada para a elaboração de uma teoria.

A cada um desses eixos está associada uma linha de pesquisa sobre a negociação. Cada uma estando exclusivamente ou quase situada sobre um dos três eixos, que esse autor denomina de abordagens unidimensionais. Além dessas abordagens existem outras, que Laurants denomina teorias globais da negociação, que combinam de formas diversas os três eixos epistemológicos e estão situadas no “espaço” de três dimensões que eles definem

(Figura 1). Vejamos em mais detalhe as diversas abordagens neste “espaço” epistemológico.

E.2.1 As Abordagens Unidimensionais

E.2.1.1 Abordagem dedutiva - A Teoria dos Jogos

Esta teoria aborda as estratégias que os atores devem fazer em uma situação complexa. Seu objetivo é a prescrição de uma estratégia ótima, que conduza a uma situação de equilíbrio estável (Equilíbrio de Nash).

Esta teoria permite a análise de “lógicas situacionais” isto é, a lógica da estrutura do jogo estratégico: qual é a parte correspondente à coordenação, qual é a parte do conflito, e a existência de um ou mais equilíbrios de estratégias.

Figura 1: Diagrama representando os três eixos epistemológicos que definem o espaço onde as teorias globais qualitativas da negociação se articulam. Modificado de (Laurants, 1997).

E.2.1.2 A Abordagem Indutiva

As negociações que ocorrem em diversos domínios da vida social e econômica são objeto de observações, descrições e análises. A partir destas observações os pesquisadores formulam uma representação do que observaram e propõem um modelo da negociação. A dificuldade da abordagem indutiva é chegar a um mínimo de universalidade, e organizar as várias pesquisas em um quadro coerente e unificado. Entretanto ela é indispensável para a elaboração de um modelo conceitual da negociação. É a partir das observações do real que a teoria pode propor novos desenvolvimentos formais.

E.2.1.3 A Abordagem Empírica

As abordagens empíricas observam os comportamentos dos atores colocados em ambientes artificiais de negociação. No curso destas experimentações os comportamentos são observados, medidos e representados sob a forma de “regularidades estatísticas”, concernentes às representações cognitivas, às reações e às soluções procuradas. Os limites desta abordagem referem-se a um reducionismo inevitável, mas considerável, das experimentações. Entretanto ela traz um resultado rigoroso capaz de ser formalizado e fundado na observação do real, concernente à racionalidade dos agentes nas negociações.

E.3 As Teorias Globais da Negociação

As Teorias Globais da Negociação combinam em graus diversos as três abordagens unidimensionais descritas acima. E por isso elas são constituídas de abordagens diferentes, mais ou menos dedutivas, indutivas ou empíricas, mas com alguma dominante. Estas teorias progridem basicamente em duas direções.

a) A ampliação a partir dos conceitos dedutivos

No coração dos modelos teóricos dedutivos da negociação se encontram os conceitos e paradigmas da teoria dos jogos. A teoria global da negociação procura ampliar estes modelos pela integração de novas variáveis, ou de disciplinas científicas e pelo enriquecimento do paradigma.

b) A estruturação de resultados indutivos e empíricos.

A teoria global procura estruturar as descrições, os relatórios factuais e as observações do real. Ao confrontá-las com os modelos teóricos e vice e versa, elas visam fornecer um quadro geral de análise. Elas neste contexto têm o objetivo de assemelhar-se às observações e de confrontá-las tirando delas um enriquecimento teórico, e sugestões para novas experimentações.

O presente trabalho insere-se nesta direção, pois usamos a Teoria dos Jogos Repetidos para modelar a seqüência de negociações de reduções de emissões, e uma negociação individual foi modelada como um jogo não cooperativo, e um acordo como um Equilíbrio de Nash do jogo. Entretanto, afrouxamos várias das hipóteses dessa Teoria, adaptando o modelo aos nossos interesses. O modelo contém elementos empíricos, tais como o auto-interesse dos governos nas negociações e contém conjecturas sobre a maneira como os governos ampliam ou restringem suas opções de abatimento de emissões.

E.4 O Quadro Conceitual sobre a Seqüência de Negociações

Para o modelo da seqüência de negociações adotamos um quadro conceitual simples formado a partir de quatro perguntas básicas: 1) Quem são os atores nas negociações sobre abatimento de emissões? 2) Qual é a estrutura contextual onde as negociações ocorrem? 3) Como os atores elaboram suas posições para as negociações? 4) Qual é o tipo de resultado de uma negociação?

- **Os Atores.**

Os atores são os Estados Nacionais. Introduzimos esta dimensão com um modelo estilizado de um governo genérico que toma as decisões de abatimento de emissões (Capítulo 2).

- **A Estrutura**

Este é o conjunto de vínculos nos quais as negociações tomam lugar. No modelo adotado no presente trabalho estabelecemos alguns vínculos muito simples. Construímos um Regime Institucional de Políticas de Mudanças Climáticas que é bem mais simples que a Convenção do Clima. Além disso, cada negociação segue os vínculos da definição de Equilíbrio de Nash (Capítulo 6). E por fim, ocorrem em um ambiente climático, econômico e de incertezas que estruturam o resultado final das negociações.

- **A Formação das Posições**

Introduzimos um modelo de uma Metodologia para a análise e decisão de opções de abatimento usada por cada governo. e uma Regra Adaptativa para um governo mudar o espectro de suas opções ao longo do tempo. Quando os governos vão à mesa de negociações, levam consigo uma posição sobre suas possíveis medidas de abatimento gerada pela Metodologia e por aquela Regra.

- **O Resultado de uma Negociação**

O resultado de uma negociação individual é um conjunto de metas de redução de emissões, uma para cada país que participa da negociação. O resultado da sequência das negociações é uma sequência desses conjuntos, que definem uma trajetória de emissões globais ao longo do período analisado.

APÊNDICE F - Roteiro de Uma Simulação com o Proclin

Este é um Roteiro resumido para fazer simulações no Proclin. É importante ler as Planilhas “LEIA-ME” e “PAINEL” no Proclin. Uma simulação de um cenário de evolução das incertezas no Proclin segue o seguinte roteiro:

1) Configuração do meio ambiente de base

- a) Configuração do Sistema do Clima de Base através da seleção das categorias dos parâmetros SC e DO. Por exemplo, uma configuração seria BA, isto é, uma SC Baixa e uma DO Alta.
- b) Configuração da Economia de Base através da definição das categorias dos valores dos parâmetros ALFA e BETA para cada Bloco. Por exemplo, uma configuração seria VACB, para o Bloco A, isto é, Vulnerabilidade Alta e Custos Baixos e VBCB para o Bloco B.

2) Configuração do estados Iniciais de incertezas

- c) Estipular quais são as crenças de cada governo no momento inicial da simulação expressas em termos das categorias de cada um dos parâmetros acima. Lembrando que o conhecimento do clima global é o mesmo para ambos os governos, uma configuração para o Bloco A poderia ser, por exemplo, BBVBCB, e para o Bloco B, BBVACB. Notemos que esta configuração estabelece a distância entre as “verdadeiras” categorias, do meio ambiente de base e aquelas do conhecimento sobre este ambiente.

3) Configuração do limiar mínimo de crescimento

- d) Fixar uma meta de crescimento para cada Bloco e escolher limiares mínimos de crescimento econômico, $\delta y_{i \text{ Min}}$, abaixo destas metas .

4) Configuração dos cenários de evolução das incertezas

- e) Escolha de uma velocidade de evolução para cada incerteza dentre as categorias Rápida (R) ou Lenta (L) e configurar seqüências de distribuições de probabilidades que partem da situação de incerteza inicial e se dirigem para a situação das categorias do meio ambiente de base com a velocidade escolhida. No exemplo acima, as distribuições de probabilidades para a SC e a DO devem partir de valores médios BB e se transformarem, rapidamente ou lentamente, para BA. As distribuições de ALFA e BETA devem partir de VBCB e se dirigir para VACB, com velocidades Rápida ou Lenta para o Bloco A. Para o Bloco B, partimos de VACB e segue-se para VBCB.

5) Mantendo as configurações 1) e 2) repetir as simulações para análise da interação entre as velocidades e os limiares.

- f) Repetir o processo para um intervalo discreto de valores de $\delta y_{i \text{ Min}}$ ou fixado um desses valores, repetir para quatro combinações de pares de velocidades (Figura 7.2).

6) Análise dos Resultados

- g) Verificar quais seqüências de negociações evitam o colapso dos sistemas econômicos

e analisar por que o fazem ou deixam de fazê-lo.

APÊNDICE G – Horizontes Variáveis: uma Conjectura

O objetivo a seguir é desenvolver uma argumentação preliminar que fundamente melhor a idéia de Horizonte de Tempo Efetivo que elaboramos na Seção 2.8.1. O horizonte de tempo variável é um mecanismo exploratório na modelagem dos agentes, e parece ser artificial em face da maneira como os agentes tomam suas decisões, mas talvez possamos fundamentar melhor essa idéia. Fazemos isso informalmente abaixo.

G.1 Variação dos Horizontes de Tempo

A idéia por trás do conceito de horizonte efetivo pode ser exposta de maneira informal da seguinte maneira. Podemos representar as preferências de cada agente que toma decisões apoiado em valores aleatórios, que podemos imaginar serem gerados por uma loteria, por uma função utilidade que contenha seu grau de aversão ao risco. Para o modelo presente é conveniente usar uma função exponencial dada por:

$$U(X) = 1 - \text{EXP}(-X/\varpi)$$

Onde ϖ é o grau de aversão ao risco do agente (CAYATTE, 2004; CLEMEN, 1991).

Define-se Valor Equivalente Certo de X, que denotaremos por X^* , à quantidade pela qual o agente estaria disposto a vender essa loteria. Ele é o valor que, dadas as incertezas, o agente receberia se quisesse se desfazer dessa situação de incerteza. No caso das mudanças climáticas seria o valor que o agente atribuiria aos danos incertos climáticos projetados usando uma distribuição de probabilidades em seu modelo sobre os danos. Pode-

se mostrar que, dada uma distribuição de probabilidades qualquer para a variável aleatória X , com variância σ e valor esperado $\bar{X}$, vale:

$$X^* \cong \bar{X} - \sigma.\varpi$$

Onde no caso de uma distribuição normal, a expressão passa a ser exata. Por esta expressão vemos que o valor equivalente certo será menor que o valor esperado e será tão menor quanto maior for a variância ou a aversão ao risco do agente. Se o agente projeta uma trajetória de valores esperados de seus danos, então existirá associada uma trajetória de valores equivalentes certos destes danos, que em geral, em um gráfico “X x tempo”, será uma curva abaixo da curva dos valores esperados. Se as incertezas são muito grandes e o agente é muito avesso ao risco, então o seu equivalente certo será bem menor que seu valor esperado.

A idéia é então que se encurtarmos o horizonte de antecipação ou planejamento, para o cálculo do valor esperado, é possível encontrar um alcance deste horizonte que produza o valor certo dos danos, (ou custos). Por horizonte efetivo estamos entendendo o horizonte encurtado que produz o valor certo de uma projeção de um valor esperado com incerteza σ e para um agente com aversão ao risco ϖ , dado um horizonte de referência HP. Por exemplo, se HP = 100 anos, então ao invés de fazer uma projeção de 100 anos de alcance, o agente deverá usar um alcance tão menor quanto maior for o segundo termo do segundo membro da equação acima. O horizonte efetivo é assim, a fração do horizonte de referência que o agente considera suas projeções como equivalentes certas.

As expressões na Seção 2.8.1 para a mudança de horizonte de tempo são exploratórias e deve-se buscar uma fundamentação mais rigorosa que a presente, mas dentro das linhas aqui apresentadas.