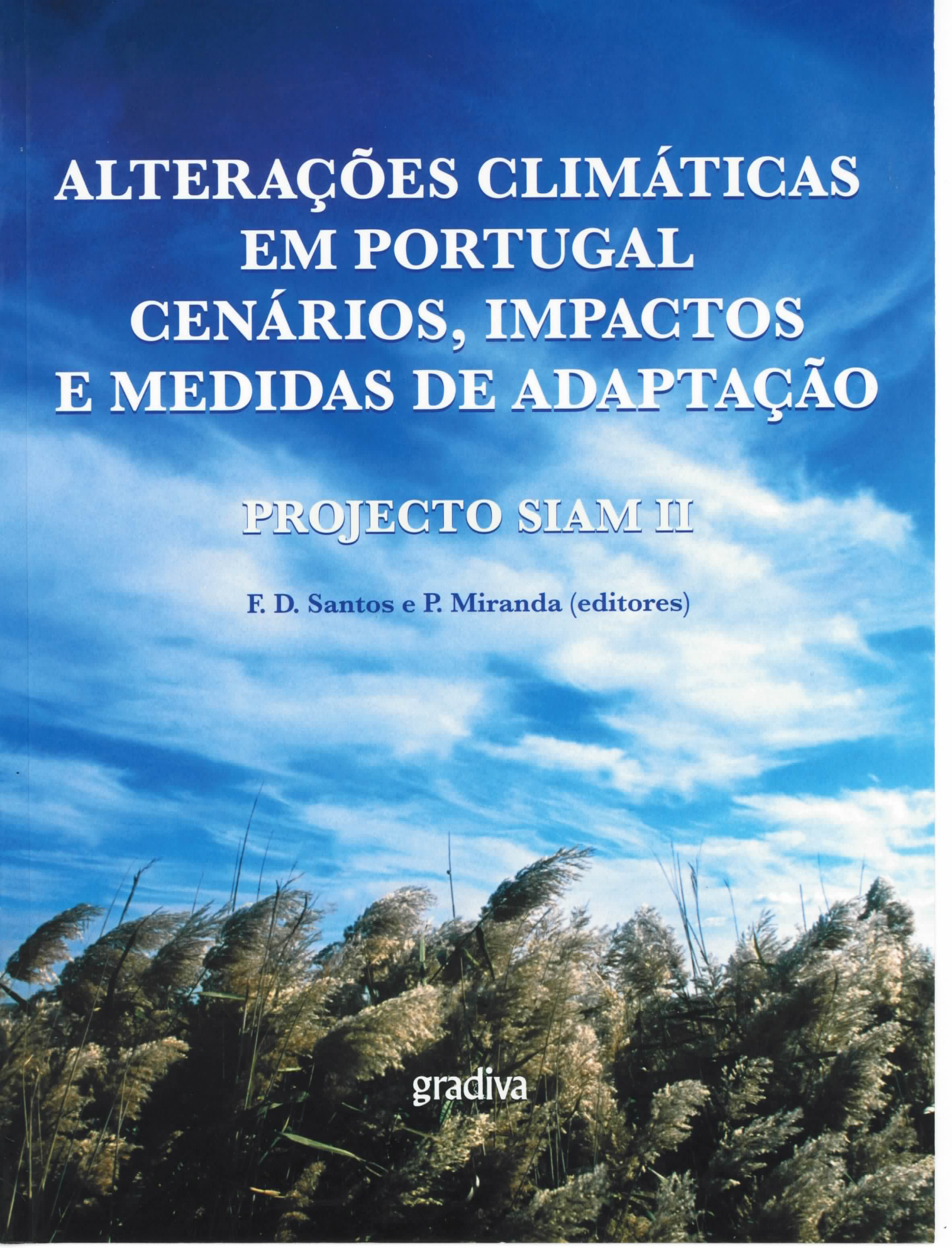
ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL CENÁRIOS, IMPACTOS E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

PROJECTO SIAM II

F. D. Santos e P. Miranda (editores)



gradiva

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL CENÁRIOS, IMPACTOS E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

PROJECTO SIAM II

ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL CENÁRIOS, IMPACTOS E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO

PROJECTO SIAM II

F. D. Santos e P. Miranda (editores)

© 2006, Gradiva – Publicações, L.da

Reservados todos os direitos. Não é permitida a reprodução do livro, partes do livro ou figuras sem prévia autorização dos editores

Publicação parcialmente financiada pela Fundação Calouste Gulbenkian e pela BP Portugal

Imagem da capa © Alexandre Vaz, *Phragmites australis*, no estuário do Tejo
Imagem da contracapa © Alexandre Vaz, Pôr do Sol no Parque Natural Sintra-Cascais

Citação recomendada deste livro:
F. D. Santos e P. Miranda (editores)
Alterações Climáticas em Portugal
Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação
Projecto SIAM II, Gradiva, Lisboa, 2006

Revisão: Luís Milheiro

Pré-impressão, impressão e acabamento:
Rolo & Filhos II, S. A.

Publicado por:
Gradiva – Publicações, L.da
R. Almeida e Sousa, 21, r/c, esq. – 1399-041 Lisboa
Telefs. 21 397 40 67/8 – 21 397 13 57 – 21 395 34 70
Fax 21 395 34 71 – Email: geral@gradiva.mail.pt
URL: http://www.gradiva.pt

Primeira edição: *Janeiro de 2006*

Depósito legal: 237231/06

Índice Geral

AUTORES 9

AGRADECIMENTOS 13

PREFÁCIOS 15

CAPÍTULOS

1 – PROBLEMÁTICA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO INÍCIO DO SÉCULO XXI 17

2 – O CLIMA DE PORTUGAL NOS SÉCULOS XX E XXI 45

3 – RECURSOS HÍDRICOS 115

4 – ZONAS COSTEIRAS 169

5 – AGRICULTURA 209

6 – SAÚDE HUMANA E IMPLICAÇÕES PARA O TURISMO 233

7 – ENERGIA 271

8 – FLORESTAS E BIODIVERSIDADE 301

9 – PESCAS 345

10 – ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO SADO 385

11 – CENÁRIOS SOCIOECONÓMICOS 481

12 – DISSEMINAÇÃO E INTERACÇÃO COM A SOCIEDADE – *OUTREACH* 493

Alterações Climáticas em Portugal
Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projecto SIAM II

Coordenador do Projecto SIAM
Filipe Duarte Santos
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

AUTORES

1 – PROBLEMÁTICA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO INÍCIO DO SÉCULO XXI

Filipe Duarte Santos
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

2 – O CLIMA DE PORTUGAL NOS SÉCULOS XX E XXI

Pedro M. A. Miranda (Coordenador)
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

M. Antónia Valente
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

António R. Tomé
Universidade da Beira Interior
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

Ricardo Trigo
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa
Universidade Lusófona

M. Fátima E. S. Coelho
Instituto de Meteorologia

Ana Aguiar
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

Eduardo B. Azevedo
Universidade dos Açores

3 – RECURSOS HÍDRICOS

Autores

Luís Veiga da Cunha (Coordenador)
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa

Luís Ribeiro
CVRM – Centro de Geossistemas
Instituto Superior Técnico

Rodrigo Proença de Oliveira
Chiron, Sistemas de Informação, SA

João Nascimento
SIAM
CVRM – Centro de Geossistemas
Instituto Superior Técnico

Contribuições

José Paulo Monteiro (Aquífero de Escusa)
CVRM – Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

Luís Nunes (Aquífero Superior da Península de Tróia)
CVRM – Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

Amélia Carvalho Dill (Aquífero Superior da Península de Tróia)
CVRM – Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

4 – ZONAS COSTEIRAS

César Andrade (Coordenador)
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geologia da Universidade de Lisboa

Henrique Oliveira Pires
Instituto de Meteorologia

Pedro Silva
SIAM
Instituto de Meteorologia

Rui Taborda
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Laboratório de Tectonofísica e Tecnónica Experimental

Maria da Conceição Freitas
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geologia da Universidade de Lisboa

5 – AGRICULTURA

Pedro Aguiar Pinto (Coordenador)
Instituto Superior de Agronomia

Ricardo Braga
Escola Superior Agrária de Elvas

Ana Paiva Brandão
Instituto Superior de Agronomia

6 – SAÚDE HUMANA E IMPLICAÇÕES PARA O TURISMO

Autores

José M. Calheiros (Coordenador)
Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior
Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Elsa Casimiro
SIAM

Contribuições

António Paulo Gouveia de Almeida
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Universidade Nova de Lisboa

Carlos Alves-Pires
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Universidade Nova de Lisboa

Margarida Collares Pereira
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Universidade Nova de Lisboa

Margarida Fonseca Cardoso
Instituto de Ciências Biomédicas de Abel Salazar, Universidade do Porto

Margarida Santos-Silva
Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge, Águas de Moura

Maria Odete Afonso
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Universidade Nova de Lisboa

Rita Sousa
Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge, Águas de Moura

7 – ENERGIA

Ricardo Aguiar (Coordenador)
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

Marta Oliveira
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

Hélder Gonçalves
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

8 – FLORESTAS E BIODIVERSIDADE

João Santos Pereira (Coordenador)
Instituto Superior de Agronomia

Alexandre Vaz Correia
SIAM
Instituto Superior de Agronomia

Alexandra Cristina Correia
SIAM
Instituto Superior de Agronomia

Maria Teresa Ferreira
Instituto Superior de Agronomia

Nuno Onofre
Estação Florestal Nacional
Instituto Nacional de Investigação Agrária e Pescas

Helena Freitas
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Francisco Godinho
Instituto Superior de Agronomia

9 – PESCAS

Carlos Sousa Reis (Coordenador)
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Ricardo Lemos
SIAM

Diogo Alagador
SIAM

10 – ESTUDO DE CASO DA REGIÃO DO SADO

Coordenação

Pedro M. A. Miranda
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

Ricardo Moita
SIAM
Ecoprogresso

AUTORES

Clima

M. Antónia Valente
Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa

Recursos Hídricos

Autores

Luís Veiga da Cunha
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Luís Ribeiro
CVRM – Centro de Geossistemas
Instituto Superior Técnico

Rodrigo Proença de Oliveira
Chiron, Sistemas de Informação, SA

João Nascimento
SIAM
CVRM – Centro de Geossistemas
Instituto Superior Técnico

Contribuições

José Paulo Monteiro (Aquífero de Escusa)
Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

Luís Nunes (Aquífero Superior da Península de Tróia)
Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

Amélia Carvalho Dill (Aquífero Superior da Península de Tróia)
CVRM – Centro de Geossistemas
Universidade do Algarve

Agricultura

Pedro Aguiar Pinto
Instituto Superior de Agronomia

Ana Paiva Brandão
Instituto Superior de Agronomia

Ricardo Braga
Escola Superior Agrária de Elvas – ESAE

Florestas e Biodiversidade

João Santos Pereira
Instituto Superior de Agronomia

Alexandre Vaz Correia
SIAM
Instituto Superior de Agronomia

Alexandra Cristina Correia
SIAM
Instituto Superior de Agronomia

Nuno Onofre
Estação Florestal Nacional

Helena Freitas
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Zonas Costeiras

César Andrade
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geologia da Universidade de Lisboa

Maria da Conceição Freitas
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Centro de Geologia da Universidade de Lisboa

Pedro Brito
Departamento de Geologia Marinha do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

Alexandra Amorim
SIAM

Andreia Barata
HIDROPROJECTO, SA

Geadas Cabaço
HIDROPROJECTO, SA

Pescas

Carlos Sousa Reis
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Ricardo Lemos
SIAM

Diogo Alagador
SIAM

Saúde Humana

Autores

José M. Calheiros
Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior
Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Elsa Casimiro
SIAM

Co-Autores

Carla Sousa
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Lisboa

Carlos Alves-Pires
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Lisboa

Margarida Collares Pereira
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Lisboa

Margarida Cardoso
Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Porto

Maria Odete Afonso
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Lisboa

Paulo de Almeida
Instituto de Higiene e Medicina Tropical, Lisboa

Paulo Nogueira
Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge, Lisboa

Rita Sousa
Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge, Águas de Moura

Energia e Cenários Socioeconómicos

Ricardo Aguiar
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

Marta Oliveira
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

Hélder Gonçalves
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial

11 – CENÁRIOS SOCIOECONÓMICOS

Ricardo Aguiar
Departamento de Energias Renováveis
do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

12 – DISSEMINAÇÃO E INTERACÇÃO COM A SOCIEDADE – *OUTREACH*

Autor

Keith Forbes (Coordenador)
SIAM

Contribuições

Ricardo Moita
SIAM
Ecoprogresso

Ângela Antunes
SIAM

Gonçalo Cavalheiro
Ecoprogresso
Euronatura

Agradecimentos

A equipa do SIAM agradece o co-financiamento recebido do Instituto do Ambiente do Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente e do FEDER, através de uma candidatura aprovada pelo Programa Ambiente (POA), para a realização da segunda fase do Projecto. Agradece-se à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa a cedência de infra-estruturas para a instalação e funcionamento do Projecto SIAM e à Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa por ter assegurado a sua gestão financeira.

A publicação sob a forma de livro dos resultados finais da segunda fase do Projecto SIAM só se tornou possível devido ao apoio financeiro concedido pela Fundação Calouste Gulbenkian e pela BP Portugal. As equipas do Projecto SIAM desejam manifestar o seu reconhecido agradecimento por estes apoios.

Desejamos também agradecer às seguintes instituições, centros e projectos os apoios de vária natureza que foram recebidos ao longo da realização do Projecto SIAM II:

- Administração dos Portos de Setúbal e Sesimbra
- Centro de Estudos de Vectores e Doenças Infecciosas
- Centro de Geossistemas do Instituto Superior Técnico
- CHIRON, Sistemas de Informação, Lda.
- CITAA, Centro de Investigação e Tecnologia do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade dos Açores
- CRU–Climatic Research Unit (University of East Anglia – GB)
- Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia
- Direcção-Geral de Energia
- Direcção-Geral de Saúde
- Direcção Regional do Ambiente de Lisboa e Vale do Tejo
- Estação Florestal Nacional
- EURONATURA, Centro para o Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentado
- Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade da Beira Interior
- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Hadley Centre for Climate Prediction and Research (GB)
- IMOAREIA
- Instituto da Água
- Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar da Universidade do Porto
- Instituto de Higiene e Medicina Tropical
- Instituto de Investigação das Pescas e do Mar
- Instituto de Meteorologia
- Instituto Geográfico Português
- Instituto Hidrográfico
- Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
- Instituto Nacional de Saúde Dr. Ricardo Jorge
- Instituto Superior de Agronomia
- Instituto Superior Técnico
- NCEP–National Center for Environmental Prediction (EUA)
- Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), Data Distribution Centre
- Projecto CLIMAAT (Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos), Programa Interreg III B (MAC 2.3/A3) financiado por fundos FEDER e pela Direcção Regional da Ciência e Tecnologia da Região Autónoma dos Açores através do Observatório do Ambiente dos Açores
- Universidade do Algarve

Agradecemos também a todos os participantes das sessões de *Outreach*, em especial às seguintes instituições pela cedência das salas em que as sessões decorreram:

- Instituto Politécnico de Bragança
- Universidade da Beira Interior
- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- EDIA, Empresa de Desenvolvimento e Infra-Estruturas do Alqueva
- Câmara Municipal de Ílhavo
- FORPESCAS
- IPIMAR, Centro Regional de Investigação das Pescas e do Mar do Sul

Estamos particularmente gratos ao Instituto de Meteorologia, pela cedência de dados de observações do clima em Portugal. O estudo de meteorologia que aqui se apresenta foi realizado em estreita colaboração com este Instituto.

Agradece-se igualmente ao Hadley Centre for Climate Prediction and Research por ter fornecido, através do Projecto LINK, dados mensais e diários dos modelos globais HadCM2 e HadCM3 e dos modelos regionais HadRM2 e HadRM3. Outros dados mensais de modelos globais foram disponibilizados pelo Data Distribution Centre do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Os dados de reanálise dos campos meteorológicos que o National Center for Environmental Prediction (NCEP) disponibiliza foram igualmente utilizados neste trabalho.

Estamos gratos a Vanda Pires do Instituto de Meteorologia por fornecer o índice PDSI apresentado neste trabalho e a Álvaro Silva e Sofia Moita, do mesmo Instituto, o apoio na elaboração dos mapas climatológicos de Portugal Continental e Ilhas.

Queremos agradecer a Sari Kovats da London School of Hygiene and Tropical Medicine e a Bettina Menne da Organização Mundial da Saúde o apoio e orientação técnica; a Andreas Matzarakis da University of Freiburg pela disponibilização do «RayMan model», a Pedro Silva do Instituto de Meteorologia, a Judite Catarino e Teresa Martins da Direcção-Geral de Saúde pela disponibilização de dados essenciais a este estudo; a Manuel Serra da ATLANTISADO e a Reinaldo Mendonça da SAPALSADO; a Sara Guerra (Projecto RIMAR e Instituto Geográfico Português), que digitalizou e validou os maregramas de Cascais e Lagos e a Raquel Silva do Instituto Hidrográfico, que contribuiu para a validação de parte significativa dos elementos maregráficos utilizados, e ainda pela dedicação e entusiasmo com que ambas participaram na troca de informações com a equipa do SIAM II. Agradecemos a Mário Simões Teles da HIDROPROJECTO, SA, pelas horas de computação e possibilidade de acesso ao Sistema de Modelos daquela empresa, cedidas a título gracioso, bem como pelas discussões e sugestões que beneficiaram a metodologia e resultados do estudo de caso do Sado; a Anabela Cruces, da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, agradecemos o auxílio nos trabalhos de campo. Agradecemos ainda a Ana Paula Cruz de Carvalho e Isabel Fernandes da Divisão de Sementes, da Direcção de Serviços de Sementes e Propágulos, da Direcção-Geral de Protecção de Culturas; a Benvindo Maçãs e José Coutinho da Estação Nacional de Melhoramento de Plantas, a Edgar Sousa da Secção da Ciência do Solo, do Departamento de Ciências do Ambiente, do Instituto Superior de Agronomia; a Maria da Conceição Gonçalves do Departamento da Ciência do Solo, da Estação Agronómica Nacional, do Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pescas, a Miguel Tristany e Miguel Neto da Secção de Agricultura, do Departamento de Produção Agrícola e Animal, do Instituto Superior de Agronomia.

Agradece-se a Paulo Diogo da Universidade Nova de Lisboa, pela contribuição dada para a reflexão sobre algumas questões relacionadas com os impactos das alterações climáticas sobre a qualidade da água. Agradece-se à IMOAREIA e ao IMAR pela disponibilização dos dados referentes ao estudo do Aquífero Superior da Península de Tróia.

Agradece-se a Sónia Amaro, Elisabete Oliveira e Domingos Leitão do CVRM – Centro de Geossistemas do Instituto Superior Técnico pela colaboração nas tarefas de compilação de dados e informação. Agradece-se a Eduard Plá, Carlos Gracia e Santi Sabaté da Universidade Autónoma de Barcelona – CREAF, pela ajuda na utilização do modelo GOTILWA+.

Agradece-se à EEA (European Environment Agency) a autorização para reproduzir a Figura 1.1 e ao IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) autorização para reproduzir as Figuras 1.2, 1.3, 1.4, 1.6, 1.7, 1.8 e 1.9. Agradece-se à WHO (World Health Organization) a autorização para utilizar a Figura 1.5.

Os autores agradecem ao Tiago Capela Lourenço a sua empenhada colaboração na fase final da edição deste livro.

Finalmente as equipas do Projecto SIAM desejam agradecer a Ângela Antunes o profissionalismo e o empenhamento com os quais prestou um excelente apoio na administração e organização do projecto e na edição deste livro.

Os autores assumem plena responsabilidade por todos os erros, imprecisões e gralhas eventualmente contidas no texto do livro.

Prefácios

A procura de ordem é crucial para o equilíbrio e a coesão das nossas sociedades. A sobrevivência colectiva depende da maneira como são interpretados os padrões relativos às transições observadas, aos desequilíbrios, às mudanças, às instabilidades sentidas. A luta pela preservação da identidade cultural é constante.

Nas nossas comunidades são as regras de organização, os valores colectivos e percepções, os códigos de processamento de informação, a visão do mundo que a rodeia, numa palavra, a sua cultura, que traduzem a sua capacidade para se manter coesa ao longo do tempo, sobrevivendo. Deste modo, pode-se interpretar a desordem que vai impregnando as nossas sociedades como um perigoso sintoma de um sistema que aparentemente só sabe produzir «mais do mesmo».

O alargamento da separação entre as nações do mundo desenvolvido e do terceiro mundo, o reaparecimento brutal dos fenómenos de exclusão social, bem como o campear do terror, das marginalidades e da criminalidade, são disso um indício claro.

Por outro lado, a existência de alterações climáticas deixou de ser uma hipótese teórica a considerar, para ter que estar presente em quaisquer processos de decisão que visem a operação sustentada de actividades económicas em larga escala. Quer isto dizer que as «margens de segurança» no que respeita à coesão interna das nossas comunidades, se estimadas apenas a partir da experiência histórica recente, poderão estar perto dos limites.

Se não aproveitarmos este tempo para gerar uma visão do mundo renovada, que emule como valores últimos não a especulação e a competitividade mas sim a experimentação e a solidariedade, o tempo se encarregará de produzir inexoravelmente mais e mais desordem, até ao colapso da ordem existente. Temos que aproveitar este tempo para introduzir mais e melhor ciência nos processos de decisão. Só assim criaremos reais perspectivas de viver num mundo melhor.

Este livro é um manifesto pela racionalidade do Portugal contemporâneo. Contribui para nos fornecer uma visão essencialmente construtiva da nossa realidade, que se encontra em contínua mudança. A publicação deste livro é também um acto de cidadania. Sabemos bem como só através da sua livre expressão se poderá combater a inacção, o obscurantismo e a arrogância.

João Caraça
Director do Serviço de Ciência da Fundação Calouste Gulbenkian

A questão das alterações climáticas como resultado da acção humana, é hoje (quase) universalmente aceite como um dos maiores desafios a enfrentar nas próximas décadas. Acreditamos que há uma base científica suficientemente robusta, que nos deve levar a tomar acções preventivas que permitam inverter as actuais tendências. Doutro modo o desenvolvimento económico, porque não feito de uma forma sustentável, apenas poderá trazer benefícios de curto prazo, hipotecando o futuro e deixando um legado às gerações vindouras de que não nos poderemos orgulhar. Isso exigiria tomadas de decisões drásticas que poderiam ter consequências inimagináveis para o planeta, para todas as formas de vida e, obviamente, para a raça humana.

Sabemos que a utilização da energia, baseada fundamentalmente na utilização de fontes fósseis, é um dos principais factores a ter em conta, face à libertação para a atmosfera de gases causadores do efeito de estufa. Sabemos também que não há no curto prazo alternativas que permitam manter o nível de crescimento económico desejado, nomeadamente nos países mais pobres. Temos, portanto, uma equação de difícil resolução. Nós, contudo, achamos que a solução existe e passa por múltiplos passos, desde a melhoria do rendimento dos equipamentos, à maior disciplina dos utilizadores e à evolução tecnológica que permitirão reduzir significativamente os aspectos negativos associados à utilização dos combustíveis fósseis, ao mesmo tempo que uma bem dirigida investigação permitirá alterar o balanço energético em favor de fontes renováveis e menos poluentes.

A BP mostrou essa evidência ao estabelecer metas internas que permitiram no espaço de alguns anos reduzir as emissões próprias, colocando-as 10% abaixo dos níveis de 1990. E isso foi conseguido não com grandes saltos tecnológicos, mas com milhares de pequenas e médias iniciativas do nosso pessoal em todas as instalações ao redor do mundo. Mas temos consciência que esse desafio só poderá ser ganho se houver uma união de esforços envolvendo as empresas, os governos, a sociedade civil e, muito particularmente a comunidade científica. É nesse contexto que temos todo o prazer em dar o nosso apoio a esta publicação, que vem trazer a público os resultados dum longo e rigoroso trabalho de investigação que nos pode ajudar a antecipar as consequências para Portugal e, consequentemente, trabalhar nas soluções que evitem a ocorrência dos cenários mais pessimistas. É óbvio que sozinhos, enquanto país, não podemos alterar muito, mas a nossa contribuição é importante e necessária.

Esperamos, sinceramente, que trabalhos como este sejam tidos na devida consideração e que sejam fomentadores da tomada de decisões e acções no terreno, que nos deixem de consciência tranquila por tudo termos feito para harmonizar o nosso desenvolvimento e bem-estar, com um futuro desanuviado para os nossos filhos e netos.

António Comprido
PCA da BP Portugal

1

Problemática das Alterações Climáticas no Início do Século XXI

Filipe Duarte Santos
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO 19

EXECUTIVE SUMMARY 20

1. PROBLEMÁTICA DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NO INÍCIO DO SÉCULO XXI 21

1.1 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: O PASSADO E O FUTURO 21
1.1.1 Forçamento Radiativo e Efeito de Estufa 23
1.1.2 Sinais de Alterações Climáticas Recentes e Projecções para o Século XXI 25
1.1.3 Alterações Climáticas Abruptas 28

1.2 MODELOS CLIMÁTICOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS 28
1.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos Regionais (RCM) 29
1.2.2 Cenários de Emissões de Gases com Efeito de Estufa ... 30

1.3 VULNERABILIDADE E IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS 31
1.3.1 Sensibilidade, Capacidade de Adaptação e Vulnerabilidade às Alterações Climáticas 31
1.3.2 Impactos das Alterações Climáticas 32
1.3.3 Impactos Diferenciados na Europa 32

1.4 RESPOSTAS PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO 33
1.4.1 Mitigação 34
1.4.2 Como Evitar Uma Interferência Antropogénica Perigosa sobre o Sistema Climático 35
1.4.3 O Pós-Quioto 36
1.4.4 Adaptação 37

1.5 INCERTEZAS 38
1.5.1 Interpretação Bayesiana das Probabilidades e Princípio da Precaução 39

1.6 O CASO DE PORTUGAL E O PROJECTO SIAM ... 40
1.6.1 Mitigação e Cumprimento do Protocolo de Quioto em Portugal 41

1.7 REFERÊNCIAS 42

SUMÁRIO EXECUTIVO

O Capítulo 1 constitui uma breve introdução à problemática das alterações climáticas antropogénicas, ou seja, de origem humana. Sabemos que, no passado, o clima da Terra variou profundamente devido a causas naturais. Na última época glaciar, que terminou há cerca de 20 000 anos, a temperatura média global da atmosfera à superfície era cerca de 5 °C a 7 °C menor do que a actual e o nível médio do mar estava 100 a 120 m abaixo do actual.

As emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa (GEE) para a atmosfera, algumas com início na revolução industrial, modificaram ligeiramente a composição da atmosfera. A concentração atmosférica do dióxido de carbono (CO_2), o mais importante GHG em termos de forçamento radiativo e cujas emissões resultam sobretudo da combustão dos combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – mas também da desflorestação, aumentou de 34 % desde o valor pré-industrial de 280 ppmv (partes por milhão em volume) até ao valor de 374 ppmv em 2004.

Os modelos de circulação geral da atmosfera que simulam o sistema climático terrestre, incluindo a atmosfera, os oceanos e a biosfera, indicam que parte das alterações climáticas observadas a nível global, desde meados do século XIX e especialmente nas últimas três décadas, é causada pelas emissões antropogénicas de GEE. Há vários sinais de alterações climáticas recentes. Desde o início do século XX a temperatura média global da atmosfera à superfície aumentou de 0,6±0,2 °C e em algumas regiões continentais o aumento foi maior como, por exemplo, na Europa onde atingiu 0,95 °C. No que respeita à precipitação observou-se, especialmente nas últimas décadas, uma maior frequência de fenómenos extremos: episódios de precipitação intensa, sobretudo nas latitudes médias e altas, e secas nas latitudes médias. Durante o século XX observou-se um recuo da grande maioria dos glaciares de montanha, uma redução da massa de gelo nas grandes altitudes e uma redução significativa na área de gelos permanentes no Árctico.

Quanto ao futuro os modelos climáticos projectam um agravamento destas tendências. Para a temperatura média global a projecção até 2100 é de um aumento entre 1,4 °C e 5,8 °C. Na Europa o aumento projectado é de 2,0 °C a 6,3 °C, um pouco mais elevado do que a média global. Os cenários climáticos futuros indicam também uma maior frequência de fenómenos climáticos extremos: episódios mais frequentes de precipitação muito intensa e secas mais frequentes e severas. De acordo com as projecções o nível médio do mar irá subir até ao século XXI entre 0,09 e 0,88 m, sendo o valor mais provável da ordem de 0,5 m.

As alterações climáticas antropogénicas são já inevitáveis no século XX, têm uma probabilidade elevada de se agravarem e terão impactos, na maior parte negativos, sobre vários sistemas naturais e sociais. Perante estas conclusões é necessário formular e pôr em prática respostas adequadas. Há essencialmente dois tipos de respostas: a mitigação e adaptação. A primeira consiste em estabilizar a concentração atmosférica dos GEE por meio da redução das emissões actuais e futuras. A adaptação tem por objectivo minimizar os efeitos negativos dos impactos das alterações climáticas nos diversos sistemas naturais e sociais.

O tema principal deste livro é o estudo dos impactos e das medidas de adaptação às alterações climáticas em Portugal com base em cenários climáticos futuros obtidos com modelos climáticos de circulação geral e regionais. No presente Capítulo faz-se uma avaliação das incertezas inerentes a estudos deste tipo.

As observações do impacto das recentes alterações climáticas e as projecções para o futuro indicam que a região mediterrânica e o Sul da Europa são mais vulneráveis às alterações climáticas do que o Centro e o Norte da Europa. No caso de Portugal, tanto quanto é do nosso conhecimento, a primeira avaliação de impactos e medidas de adaptação multissectorial e integrada realizou-se no âmbito da primeira fase do Projecto SIAM (Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures) que decorreu de 1999 a 2002. Esta foi também a primeira avaliação deste tipo que se realizou num país do Sul da Europa.

A segunda fase do Projecto SIAM (SIAM II), que decorreu em 2002 e 2003 teve por objectivo aprofundar e alargar o âmbito das investigações realizadas no SIAM I, alargar o âmbito do estudo às Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, realizar um estudo de caso na região da bacia hidrográfica do rio Sado e iniciar um processo organizado de divulgação e discussão dos resultados junto dos agentes (empresas, administração central e local e organizações não governamentais) afectados pela problemática das alterações climáticas. No presente trabalho foram avaliados os impactos e medidas de adaptação em vários sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos de Portugal, designadamente, recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde, energia, florestas, biodiversidade e pescas.

EXECUTIVE SUMMARY

Chapter 1 is a brief introduction to the subject of anthropogenic climate change, its challenges and responses. In the past the Earth's climate suffered profound changes due to natural causes. For instance in the last ice age, that came to an end about 20 000 years ago, the global average temperature of the atmosphere was 5° to 7 °C lower.

The anthropogenic emissions of greenhouse gases (GHG) to the atmosphere, since the industrial revolution, have induced slight changes in the composition of the atmosphere. In particular the emissions of carbon dioxide (CO_2), the most important GHG in terms of radiative forcing, results mainly from the combustion of fossil fuels – coal, oil and natural gas – and from deforestation. Its atmospheric concentration increased by 35 % from a pre-industrial value of 280 ppmv (parts per million in volume) to 374 ppmv in 2004.

The interpretation of the recent climate using general circulation models that simulate the behaviour of the climate system, including the atmosphere, the oceans and the biosphere, has shown that part of the climate changes observed since the middle of the XIX century and specially in the last three decades are the result of anthropogenic emissions of GHG. Various signs of recent climate changes have been identified. Since the beginning of the XX century the average global temperature of the atmosphere increased 0.6±0.2 °C and in certain regions the increase was larger as, for instance, in Europe with a value of 0.95 °C. As regards precipitation more frequent events have been observed: events of intense precipitation, specially in medium and high latitudes and droughts in medium latitudes. During the XX century the large majority of mountain glaciers have receded, the snow mass at high altitudes has decreased and the area of permanent ice in the Arctic has been substantially reduced.

Climate models project that these tendencies will intensify in the future. The global average temperature of the atmosphere is projected to increase from 1.4 °C to 5.8 °C until 2100. The increase in Europe is projected to be slightly larger, from 2.0 °C to 6.5 °C. The future climate scenarios also indicate a higher frequency of extreme climate events: more frequent events of intense precipitation and more frequent end severe droughts. Until the end of the XXI century the sea-level is projected to rise from 0.09 m to 0.88 m with a more probable value around 0.5 m.

Anthropogenic climate changes are already inevitable during the XX century. They are likely to intensify and in most cases they will have negative impacts in various natural and social systems. In view if these conclusions we need to develop and implement adequate responses. There are essentially two types of responses: mitigation and adaptation. The objective of the first is to stabilize the atmospheric concentrations of GHG through the reduction of the present and future emissions of these gases to the atmosphere. Adaptation aims at minimizing the negative impacts of climate change on the various natural and social systems.

The main subject of this book is the study of the impacts and adaptation measures to climate change in Portugal using future climate scenarios obtained from general circulation models and regional models. The present Chapter contains a description and an assessment of the various types of uncertainties involved in this type of study.

The observation of the impact of recent climate changes and the study of climate changes projected in future scenarios indicate that the South of Europe and the Mediterranean region are more vulnerable than Central an Northern Europe. In the case of Portugal, as far as we know, the first multi-sectorial and integrated assessment of climate change impacts and adaptation measures was performed in the first phase of the SIAM (Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures) Project, that took place from 1999 to 2002. This type of assessment was also the first for a Southern European Country.

The main objectives of the SIAM Project (SIAM II) second phase in 2002 and 2003, were to enlarge the scope of the previous research, to fill some of the research gaps identified in the first phase, to extend the study to the Autonomous Regions of Azores and Madeira Islands, to conduct a focused and integrated case study in the region of the Sado river basin and to initiate an organized process of outreach and discussion of the SIAM I results with the agents (business, central and local administrations and non-governmental organizations) potentially affected by climate change impacts. The present work contains an assessment of the impacts and adaptation measures on various socio-economic and biophysical systems in Portugal, namely, water resources, coastal zones, agriculture, health, energy, forests, biodiversity and fisheries.

1. Problemática das Alterações Climáticas no Início do Século XXI

Filipe Duarte Santos

1.1 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: O PASSADO E O FUTURO

A atmosfera da Terra, desde a sua formação, há mais de 4000 milhões de anos, foi e é essencial para a evolução e preservação da vida. Ao longo deste imenso intervalo de tempo o clima[1], ou seja, o «tempo médio» ou «estado médio» da atmosfera, tem variado significativamente. Houve ciclos de glaciação com formação de extensas camadas de gelo nas regiões polares e subsequente fusão. A última época glaciar teve início há aproximadamente 120 000 anos e terminou há cerca de 20 000 anos. Nessa época a temperatura média global da atmosfera à superfície era 5 ° a 7 °C menor do que a actual e o nível médio do mar estava cerca de 100 a 120 m abaixo do actual.

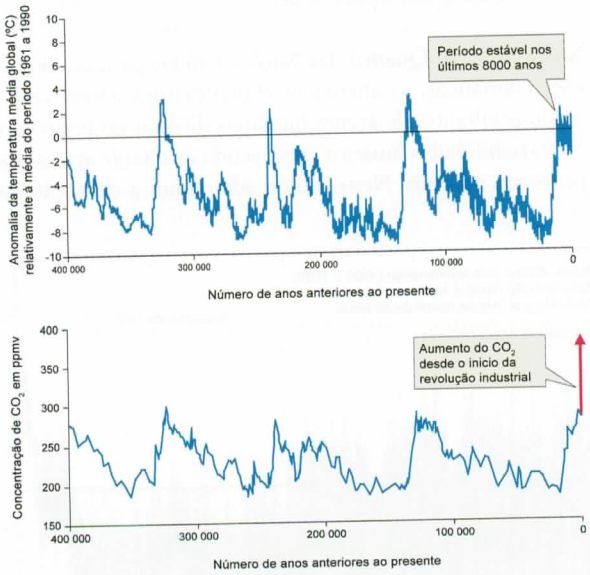


Figura 1.1 – Reconstituição da evolução da temperatura média global da baixa atmosfera, representada por meio da anomalia relativamente à média do período de 1961 a 1990, e da concentração atmosférica do CO_2 nos últimos 400 000 anos (Petit, 1999). Figura adaptada de EEA, 2004. Repare-se na correlação que se observa entre os dois registos. O aumento da concentração do CO_2 a partir da revolução industrial e até ao presente está indicado por um vector aproximadamente vertical devido à escala de tempo utilizada na Figura

A reconstituição da história do clima da Terra revela frequentes variações climáticas. Algumas manifestam-se com uma forte regularidade temporal em ciclos relativamente bem definidos. A maioria das variações climáticas dão-se em períodos de centenas, milhares ou milhões de anos e todas têm causas naturais. As principais causas conhecidas são pequenas variações na órbita que a Terra descreve em torno do Sol, variações na posição do eixo de rotação da Terra, flutuações na actividade solar e períodos de maior actividade vulcânica. Nos últimos 400 000 anos o clima da Terra apresentou uma alternância entre períodos glaciares frios, com uma duração aproximada de 80 000 a 100 000 anos, e períodos interglaciares relativamente quentes, com uma duração típica de 10 000 a 20 000 anos (Figura 1.1). Presentemente estamos num período interglaciar que podemos caracterizar como um «longo Verão» (Fagan, 2004): o clima nos últimos 8000 anos tem sido muito estável relativamente aos períodos glaciares, com pequenas flutuações de menos de 1 °C por século. A estabilidade do clima e o valor relativamente elevado da temperatura média, durante aquele intervalo de tempo, criou condições especialmente favoráveis ao desenvolvimento das várias civilizações e da actual sociedade humana globalizante.

Desde o início do século XX a temperatura média global da atmosfera à superfície aumentou de 0,6±0,2 °C (IPCC, 2001a) (Figura 1.2). Em algumas regiões continentais o aumento foi maior, como, por exemplo, na Europa onde o valor médio atingiu 0,95 °C (CRU, 2003). As temperaturas no Inverno tiveram um aumento maior do que no Verão e na Europa o aumento de temperatura foi mais acentuado no Noroeste da Federação da Rússia e na Península Ibérica (EEA, 2004). Estes aumentos são anormais, tanto no valor como na rapidez com que ocorreram. Efectivamente, a variação observada na temperatura nos últimos 100 anos excede largamente as variações climáticas naturais dos últimos 1000 anos, conforme se conclui da análise da Figura 1.3 (IPCC, 2001a). A Figura 1.2 mostra que a maior parte do aumento da temperatura média global desde os finais do século XIX deu-se em dois períodos distintos: de 1910 a 1945 e a partir de 1976. Durante estes intervalos de tempo a taxa de aumento da temperatura média global foi cerca de 0,15 °C por década

[1] O clima de um determinado local ou região é definido pela descrição estatística em termos da média e variabilidade, das variáveis meteorológicas que caracterizam o estado da atmosfera nesse local ou região, durante um período de tempo no mínimo de alguns meses e até milhares ou milhões de anos. A Organização Meteorológica Mundial utiliza um período mínimo de 30 anos para definir um clima, ou mais precisamente uma «normal climática».

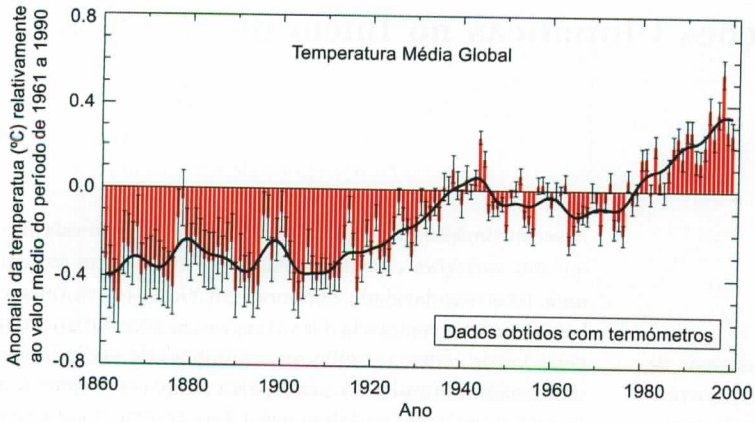


Figura 1.2 – Temperatura anual média global da atmosfera à superfície, representada em termos da anomalia relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (IPCC, 2001a). O intervalo de erro está representado por uma barra

e actualmente é de 0,17±0,05 °C por década (IPCC, 2001a). A década de 1990 foi a mais quente e o ano de 1998 o mais quente desde 1861. Seguem-se por ordem decrescente de temperatura média global os anos de 2002, 2003 e 2004.

De acordo com as conclusões do Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), publicado em 2001 (IPCC, 2001a), a maior parte do aquecimento global observado nos últimos 50 anos resulta provavelmente das emissões para a atmosfera de gases com efeito de estufa (GEE) provocados pelas actividades humanas, especialmente a queima de combustíveis fósseis e as alterações no uso dos solos, em particular a desflorestação. O mesmo relatório conclui também ser muito provável que o aumento da temperatura média global da atmosfera, desde meados do século XIX, tenha contribuído significativamente para o aumento observado do nível médio do mar durante o século XX, por meio da expansão térmica das camadas superficiais do oceano e da fusão dos gelos das regiões montanhosas. A plausibilidade destas conclusões tem sido reforçada nos últimos anos, desde 2001, por inúmeras publicações relatando novas observações e estudos.

Existe ainda uma incerteza considerável na quantificação da contribuição antropogénica para o aquecimento global, que é necessário reduzir. Há porém um consenso nos meios científicos, cada vez mais generalizado, de que as emissões antropogénicas para a atmosfera de GEE têm contribuído para as alterações climáticas que se observaram no último século e especialmente nos últimos 50 anos.

Não é apenas o IPCC que reconhece esta relação causal mas também muitas organizações científicas nacionais e internacionais como, por exemplo, a National Academy of Sciences dos Estados Unidos da América (NASC SCC, 2001). Num estudo recente (Oreskes, 2004), em que se analisaram 928 artigos sobre alterações climáticas publicados em revistas científicas com sistema de arbitragem e referenciadas na base de dados do ISI entre 1993 e 2003, conclui-se que em nenhum deles se contraria a tese de o homem estar a interferir com o sistema climático e a provocar alterações climáticas. Em 75 % desses artigos defende-se explicitamente a posição consensual de que as emissões antropogénicas de GEE estão a provocar alterações climáticas. No entanto, apesar deste acordo quanto à natureza do problema, há ainda muito desconhecimento e incerteza sobre o funcionamento detalhado do sistema climático e sobre as consequências futuras da interferência humana sobre esse sistema. O consenso é muitíssimo menor acerca do que se deve ou não fazer para combater as alterações climáticas antropogénicas.

Na Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas, as alterações climáticas definem-se como sendo resultantes de acções humanas directas ou indirectas e a variabilidade climática como sendo resultante apenas de processos naturais. Neste estudo adoptamos a definição do

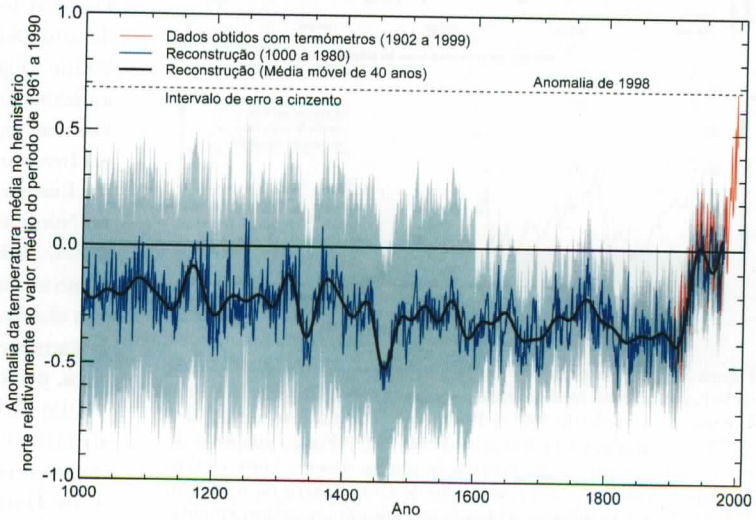


Figura 1.3 – Temperatura anual média da atmosfera à superfície no hemisfério Norte desde o ano 1000 (IPCC, 2001a), representada por meio da anomalia relativamente à média do período de 1961 a 1990. Reconstrução de 1000 a 1980 representada a azul e obtida com base na análise dos anéis das árvores, corais, cilindros de gelo obtidos em furos nos gelos polares e dados históricos. Série instrumental representada a vermelho e intervalo de erro a cinzento

IPCC (IPCC, 2001a), na qual uma alteração climática consiste numa variação estatisticamente significativa da média e/ou da variabilidade das variáveis que definem o clima e que persiste durante um período longo, tipicamente da ordem de décadas ou maior, sem identificar especificamente a causa daquela alteração. De acordo com esta definição, uma alteração climática poderá ter causas naturais, antropogénicas ou resultar de ambas.

1.1.1 Forçamento Radiativo e Efeito de Estufa

Os GEE têm a propriedade de absorverem e emitirem radiação infravermelha. Quando se aumenta a concentração de GEE na atmosfera há uma maior parte da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra que é absorvida. Este forçamento radiativo implica que a radiação infravermelha emitida no sentido ascendente pela atmosfera tem a sua origem, em média, a uma maior altitude, onde a temperatura é menor. Dado que a quantidade de energia emitida diminui com a temperatura, estabelece-se um desequilíbrio entre a quantidade total de energia radiativa recebida do Sol e a quantidade total de energia radiativa emitida pela Terra. O equilíbrio restabelece-se naturalmente por meio de um ligeiro aumento da temperatura da baixa atmosfera, chamada troposfera. O processo de aumento de temperatura da baixa atmosfera provocado pelo aumento da concentração dos GEE chama-se efeito de estufa.

Os principais gases com efeito de estufa presentes na atmosfera são o vapor de água, cuja concentração é muito variável, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozono (O_3), os clorofluorcarbonetos (CFC), os hidroclorofluorcarbonetos (HCFC) e ainda outros de menor importância. Os GEE desempenham um papel crucial no equilíbrio radiativo da atmosfera. A superfície esférica da Terra recebe em média 343 Wm^{-2} de radiação solar, sobretudo no visível, dos quais cerca de 103 Wm^{-2} são reflectidos para o espaço pelas nuvens e superfície e nesta sobretudo pela neve, gelos e desertos. Os restantes 240 Wm^{-2} são absorvidos e aquecem o sistema Terra-atmosfera mas voltam a ser irradiados para o espaço sob a forma de radiação infravermelha para manter o equilíbrio radiativo. Destes 240 Wm^{-2}, cerca de 40 Wm^{-2} são emitidos pela superfície, 35 Wm^{-2} pelas nuvens e 165 Wm^{-2} pela atmosfera, principalmente pelos GEE. Na ausência de GEE a superfície terrestre irradiaria directamente para o espaço: a radiação infravermelha não seria absorvida pela atmosfera e esta não emitiria energia para a superfície. Nesta situação hipotética a temperatura média global da atmosfera à superfície seria próxima dos −18 °C em lugar dos actuais 15 °C. Esta diferença de 33 °C resulta de um efeito de estufa natural que favorece decisivamente as condições de habitabilidade do planeta.

Desde o início da revolução industrial, em meados do século XVIII, até 2004 as emissões antropogénicas de CO_2 aumentaram a concentração atmosférica deste gás em 35 %, desde o valor pré-industrial de 280 ppmv (partes por milhão em volume) até ao valor de 379 ppmv em 2004. Este valor excede em cerca de 70 ppmv o máximo da concentração atmosférica do CO_2 durante os últimos 420 000 anos (Figura 1.1) e provavelmente não foi excedido nos últimos 20 milhões de anos (IPCC, 2001a). Note-se porém que em eras geológicas mais recuadas, designadamente no Cretácico, a concentração de CO_2 foi provavelmente várias vezes superior ao valor actual. Nessa época geológica a temperatura média global da atmosfera era muito mais elevada do que actualmente e não existiam calotes polares de gelos nos hemisférios Norte e Sul (Huber, 2000). O que há de verdadeiramente inédito na situação presente é a elevada taxa de variação da concentração de CO_2. Durante as duas últimas décadas do século XX a taxa média anual do aumento da concentração de CO_2 foi de 1,5 ppmv, valor que é mais de cem vezes superior àquele que se registou nas transições recentes dos períodos glaciares para os períodos interglaciares (Figura 1.1).

O aumento da concentração do CO_2 atmosférico resulta predominantemente da queima de combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – e, em menor grau, da desflorestação e outras alterações no uso dos solos. Em média cerca de 75 % das emissões antropogénicas de CO_2 nos últimos 20 anos resultaram da combustão de combustíveis fósseis. O restante resultou principalmente de alterações no uso dos solos, em especial a desflorestação. A proveniência fóssil do carbono nas moléculas do acréscimo de CO_2 pode estabelecer-se inequivocamente por meio da medição das abundâncias relativas dos isótopos ^{13}C e ^{14}C, relativamente ao ^{12}C, no CO_2 atmosférico (Harvey, 2000). Outros GEE com emissões antropogénicas importantes são: o CH_4 proveniente da agricultura, em especial da pecuária e dos arrozais, o N_2O proveniente da agricultura e da indústria e os CFCs e HCFCs utilizados em várias indústrias. A Figura 1.4 mostra a evolução da concentração atmosférica dos principais GEE com emissões antropogénicas – CO_2, CH_4 e N_2O – nos últimos 1000 anos.

Foi já referido que o aumento da concentração atmosférica de GEE provoca um forçamento radiativo que tende a aumentar a temperatura da atmosfera. O forçamento radiativo de um GEE é a variação média do fluxo radiativo na tropopausa (Harvey, 2000) (zona de transição entre a troposfera e a estratosfera) provocada pelo aumento da sua concentração. Actualmente as emissões antropogénicas de CO_2 produzem um forçamento radiativo médio de 1,5 Wm^{-2} (Figura 1.4) correspondente a cerca de 60 % do forçamento radiativo médio global do conjunto das emissões antropogénicas de GEE. É pois conveniente exprimir a concentração atmosfé-

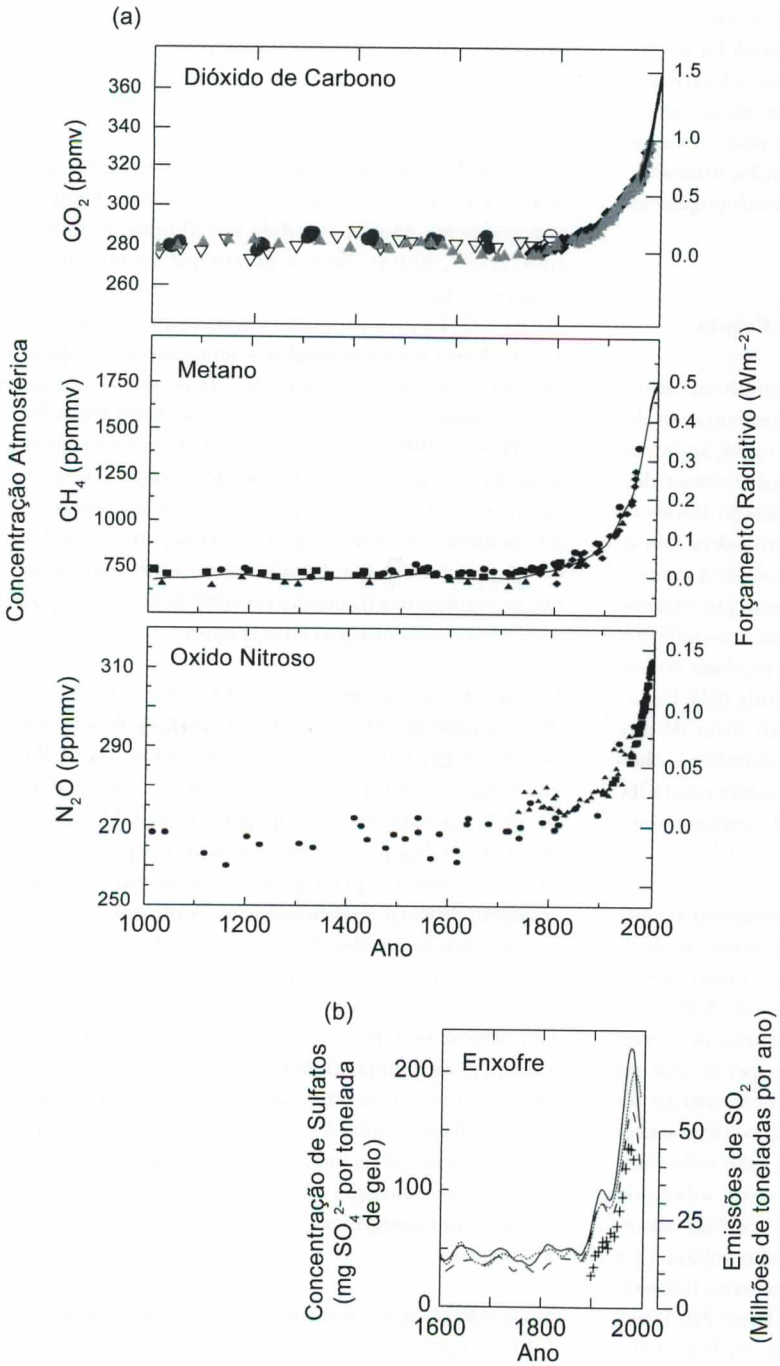


Figura 1.4 – Evolução das concentrações de vários componentes da atmosfera (IPCC, 2001a). (a) Concentrações de três dos principais gases com efeito de estufa (GEE), com emissões antropogénicas – CO_2, CH_4 e N_2O – nos últimos 1000 anos. Dados obtidos a partir de furos nos gelos da Antárctida e Gronelândia e de observações directas nas últimas décadas (indicada por uma linha no caso do CO_2). No gráfico relativo ao CH_4 a curva representa a média global. O forçamento radiativo provocado pela presença destes gases na atmosfera está representado à direita. No caso do CH_4 e N_2O a concentração está representada em partes por milhar de milhão em volume (ppmmv). (b) Concentrações de sulfatos obtidas a partir de furos nos gelos da Gronelândia em três locais (curvas) e emissões totais de SO_2 na Europa e nos Estados Unidos da América (indicadas com +)

rica de uma dada mistura de GEE em termos de CO_2 – equivalente, ou seja, da concentração de CO_2 que produziria o mesmo forçamento radiativo do que a referida mistura.

As actividades humanas também interferem com o balanço radiativo da atmosfera por meio da produção e emissão de aerossóis. Algumas actividades industriais e agrícolas produzem, directamente ou por meio de reacções químicas secundárias, aerossóis, isto é, partículas em suspensão, que reflectem ou absorvem a radiação solar. Na maioria dos casos há reflexão, pelo que contribuem para um forçamento radiativo negativo que tende a arrefecer a atmosfera. Por exemplo a queima de carvão em centrais térmicas, especialmente quando contém teores elevados de enxofre, produz dióxido de enxofre (SO_2) que, por via de reacções químicas, origina aerossóis de sulfatos que reflectem a radiação solar (Figura 1.4). Por outro lado, os motores a diesel e a queima de biomassa produzem aerossóis negros, como a fuligem, que tendem a absorver a radiação solar, pelo que produzem um forçamento radiativo positivo. As estimativas (IPCC, 2001a) indicam que o conjunto de aerossóis antropogénicos produz um forçamento radiativo médio global negativo de cerca de -1 Wm^{-2}, mas é ainda grande a incerteza associada a este valor.

O Sol é o principal factor de forçamento externo do clima da Terra. A sua luminosidade – potência radiativa total emitida pela estrela – pode determinar-se através do fluxo total de energia radiativa à distância média da Terra ao Sol, chamado irradiância solar total ou constante solar. A constante solar, cujo valor aproximado é de 1368 Wm^{-2} (Hoyt, 1997), pode medir-se com elevada precisão desde os finais da década de 1970 com radiómetros colocados em satélites. Os modelos climáticos indicam claramente que o

ciclo de 11 anos da actividade solar, que provoca variações na constante solar de poucas décimas de 1%, tem impactos mensuráveis na estratosfera mas um efeito praticamente nulo sobre o clima na troposfera (Benestad, 2002). Embora haja indicações de que variações de período longo da constante solar influenciam o clima não existe base científica credível para aceitar que essas variações constituam uma antítese do aquecimento global provocado pelo aumento da concentração de GEE na atmosfera.

Para além dos aerossóis antropogénicos é necessário também considerar os aerossóis naturais como, por exemplo, os que resultam das erupções vulcânicas, da erosão dos solos pelo vento e dos vários processos de formação de aerossóis de sais marinhos, provenientes dos oceanos. Repare-se, finalmente, que os aerossóis produzem um efeito indirecto sobre o clima ao actuarem como núcleos de condensação para a formação das gotas de água que constituem as nuvens. A intervenção dos aerossóis no sistema climático, em especial dos que têm origem em actividades humanas, é ainda pouco conhecida e constitui uma fonte adicional de incerteza no esforço de separação do sinal das alterações climáticas antropogénicas do ruído da variabilidade climática natural.

A profunda dependência da economia mundial nos combustíveis fósseis indica que as emissões antropogénicas de CO_2 para a atmosfera vão continuar a aumentar nas próximas décadas. No início do século XXI os combustíveis fósseis totalizavam cerca de 80 % das fontes primárias de energia mundial e de acordo com o último relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2004) as emissões globais anuais de CO_2 para a atmosfera vão aumentar 60 % até 2030 se não houver mudanças significativas nas políticas energéticas. Mais de dois terços do aumento das emissões terá origem nos países em desenvolvimento, que, de acordo com as projecções, irão continuar a usar o carvão de forma intensiva. Quanto às emissões de CO_2 provenientes da desflorestação e de outras alterações no uso dos solos é plausível que continuem sem sofrer reduções significativas. É pois provável que a concentração atmosférica de CO_2 continuará a aumentar, possivelmente até ao final do século XXI. Neste contexto é importante salientar que a resposta da concentração atmosférica de CO_2 às variações nas emissões é muito lenta porque, em média, as moléculas de CO_2 permanecem cerca de 100 anos na atmosfera, antes de desaparecerem por meio de vários processos – a dissolução nos oceanos, a fotossíntese e a meteorização das rochas, são os mais importantes. Se fosse possível reduzir até ao zero as emissões antropogénicas de CO_2 de forma repentina, digamos em um ano, só passados cerca de 100 anos é que a concentração atmosférica desse gás sofreria a correspondente redução. Finalmente, as emissões antropogénicas de outros GEE não têm também tendência de redução devido à importância económica dos processos responsáveis por essas emissões.

Em conclusão é muito provável que as emissões antropogénicas de GEE continuem a aumentar nas próximas décadas. Consequentemente, é também muito provável que as alterações climáticas se irão agravar ao longo do século XXI. Compreende-se pois a importância de construir modelos do sistema climático que nos permitam fazer cenários do clima futuro, tanto quanto possível fiáveis. A questão dos modelos climáticos e da incerteza nas projecções do clima será retomada mais tarde. Contudo, importa desde já referir que a severidade das alterações climáticas futuras depende do comportamento das emissões de GEE ao longo do tempo e especialmente nos próximos 100 anos. Há pois uma incerteza significativa sobre o clima futuro que resulta dos diferentes cenários possíveis para o desenvolvimento socio-económico e correspondentes emissões de GEE até ao final do século.

1.1.2 Sinais de Alterações Climáticas Recentes e Projecções para o Século XXI

O Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2001a) conclui que um conjunto de 35 cenários de emissões de GEE (que não incluem medidas específicas de redução destas emissões [IPCC, 2001c]), utilizados em vários modelos climáticos, projecta[2] para 2100 um aumento da temperatura média global situado no intervalo de 1,4 °C a 5,8 °C relativamente à média de 1961 a 1990. A Figura 1.5 procura comparar este aumento num período de aproximadamente 100 anos com as variações da temperatura média durante os últimos 20 000 anos. Após o início da presente época glaciar houve um período quente há cerca de 8000 anos no qual o actual deserto do Sahara tinha maior precipitação e estava parcialmente coberto por savanas. Foi nesse período que surgiu a civilização suméria na Mesopotâmia com as primeiras cidades-estado. Mais tarde, na Idade Média, houve novamente um período relativamente quente entre 1100 e 1300 seguido da «pequena idade do gelo» entre cerca de 1400 e 1800 que contribuiu decisivamente para os Vikings terem abandonado a Gronelândia. Os estudos arqueológicos permitem actualmente concluir que as variações do clima influenciaram profundamente as civilizações por vezes de forma positiva, outras de forma negativa, contribuindo até, em alguns casos, para o seu colapso, como aconteceu com o império da Acádia, na Síria, há cerca de 4170 anos e com o

[2] Utiliza-se a palavra projecção e não previsão porque uma previsão implica normalmente que se conhece a lei de probabilidades que lhe está associada o que, actualmente, não é possível fazer para o clima futuro.

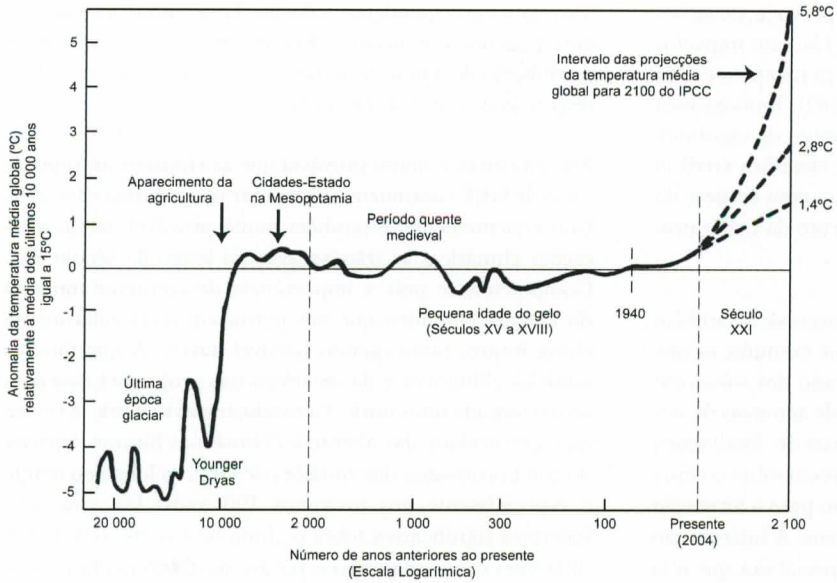


Figura 1.5 – Evolução da anomalia da temperatura média global da baixa atmosfera desde há 20 000 anos, relativamente à média dos últimos 10 000 anos (15 °C), representada numa escala logarítmica do tempo. A partir do presente (2004) representam-se a tracejado três cenários possíveis para a evolução da anomalia da temperatura média global até 2100 obtidos com os cenários do IPCC (IPCC, 2001a; IPCC, 2001c). Os cenários mais alto e mais baixo conduzem a 5,8 °C e 1,4 °C, respectivamente, correspondentes aos valores extremos do intervalo de incerteza da anomalia. A Figura apresenta ainda uma projecção intermédia que conduz a uma anomalia de 2,8 °C em 2100. Figura adaptada de Kovats, 2003

império Maia Clássico, na América Central, entre os anos 750 e 900 da nossa era (deMenocal, 2001). A causa destas variações climáticas naturais não está ainda completamente esclarecida. Podem resultar em parte de forçamentos externos tais como períodos de intensa actividade vulcânica ou variações na irradiância do Sol ou de forçamentos internos ao sistema climático resultantes da interacção entre a atmosfera e os oceanos.

O aumento da temperatura média global da atmosfera projectado até ao final do século XXI é maior nas regiões continentais do que nos oceanos, perturbando o actual regime de monções e as chuvas que lhe estão associadas e são vitais para grande parte das populações do Sul e Sueste da Ásia. Na Europa o aumento projectado da temperatura até 2100 (sem medidas efectivas de redução das emissões de GEE) é de 2,0 °C a 6,3 °C (EEA, 2004), um pouco mais elevado do que a média global. O aquecimento tende também a ser maior nas latitudes elevadas, especialmente no Inverno. Nos próximos 100 anos projecta-se um aumento da temperatura média do Árctico de 4 a 7 °C (ACIA, 2004). A amplitude térmica diurna tende a diminuir, sobretudo nas regiões continentais, devido a um maior aumento da temperatura mínima relativamente à máxima. As ondas de calor, caracterizadas, por exemplo, por uma temperatura máxima superior a 35 °C, irão aumentar tanto em frequência como em intensidade.

Estas projecções climáticas correspondem a tendências que têm sido observadas nas últimas décadas.

No que respeita ao ciclo da água os modelos indicam que a concentração do vapor de água na atmosfera e a precipitação global irão aumentar. Haverá também mudanças significativas na distribuição espacial da precipitação: aumento nas latitudes mais elevadas, em algumas regiões equatoriais e no Sueste da Ásia. Nas latitudes médias, incluindo o Sul da Europa, a região mediterrânica e a Amazónia a generalidade dos modelos projectam uma diminuição da precipitação. Na Europa as projecções dos modelos climáticos indicam, para o período até 2100, que a precipitação irá aumentar no Norte e diminuir no Sul (ACACIA, 2000).

No que respeita à precipitação, observou-se nas últimas décadas do século XX, especialmente nas latitudes médias e altas do hemisfério Norte (IPCC, 2001a), uma maior frequência de episódios de precipitação intensa. Por outras palavras, a fracção da precipitação anual que ocorre de forma intensa em intervalos de tempo curtos tem aumentado, embora a precipitação média anual não tenha variado significativamente. No extremo oposto observa-se também em várias regiões da África, Ásia e Europa uma tendência para uma maior frequência e intensidade de situações de seca. Estas tendências recentes para uma maior frequência de fenómenos climáticos extremos são semelhantes às que são projectadas pelos cenários climáticos futuros. É pois muito provável que se irão agravar durante os próximos 100 anos.

Durante o século XX e especialmente nos últimos 50 anos observou-se um recuo da grande maioria dos glaciares de montanha e uma redução da massa de gelo nas grandes altitudes que é compatível com as observações do aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície durante esse intervalo de tempo (Oerlemans, 2005). Apenas alguns glaciares, sobretudo em regiões costeiras, não estão a recuar e essas situações resultam provavelmente de um aumento da precipitação nessas regiões (IPCC, 2001a). Na Europa oito em cada nove glaciares estão a recuar e de 1850 a 1980 os glaciares dos Alpes perderam aproximadamente um terço da sua área e cerca de metade da sua massa. Após 1980 perderam mais 20 a 30 % da restante massa de gelo (EEA, 2004).

Nas calotes polares a situação é também preocupante embora mais fácil de interpretar no Árctico do que na Antárctida. De acordo com um relatório recente (ACIA, 2004) a área de gelos marítimos estivais no Árctico reduziu-se de 16 a 20 % nos últimos 30 anos. Na Gronelândia a área da camada de gelo, anualmente sujeita à fusão durante o Verão, aumentou de 16 % de 1979 a 2002. Nas águas do oceano Atlântico Norte também se observam alterações. Há uma redução significativa da salinidade e da densidade no Atlântico Norte resultante de um maior afluxo de água doce causada pela fusão dos gelos oceânicos, do degelo dos glaciares e de um maior escoamento nos rios. O eventual agravamento futuro desta tendência poderá alterar as correntes oceânicas, especialmente a corrente termo-halina, responsável pela incursão da corrente quente do Golfo até às latitudes elevadas do Atlântico Norte, com consequências graves para o clima regional. Em conclusão, o Árctico está a sofrer alterações climáticas muito rápidas e intensas relativamente a outras regiões do globo e por outro lado as transformações que daí resultam têm impactos profundos à escala global. Modelos climáticos recentes (Gregory, 2004) indicam que um aumento da temperatura média global da atmosfera superior a 3 °C poderá conduzir à fusão integral da camada de gelo sobre a Gronelândia num intervalo de tempo superior a 1000 anos. Esta fusão elevaria o nível médio do mar em cerca de 7 m.

O Terceiro Relatório do IPCC (IPCC, 2001a) conclui que as observações sistemáticas realizadas por meio de satélites desde 1978 não revelaram alterações significativas na área dos gelos oceânicos da Antárctida. Na região Leste da Antárctida há indicações de um aumento da precipitação e, consequentemente, da massa de gelo no período de 1950 a 1991 (Smith, 1998). Porém, no Oeste da Antárctida a camada de gelo é mais vulnerável às alterações climáticas porque, em muitos locais, a sua base encontra-se abaixo do nível médio do mar. Levantamentos recentes indicam que os glaciares na região Oeste estão a perder massa e alguns deles a fluir mais rapidamente para o oceano, provavelmente devido ao efeito do aumento da temperatura superficial do oceano na base do glaciar. As observações indicam que a perda de massa na camada de gelo na região do mar de Amundsen é superior à acumulação resultante da queda de neve. Estas instabilidades na região Oeste da Antárctida começam a ser motivo de preocupação. Note-se que a fusão da camada de gelo naquela região corresponderia a um aumento do nível médio do mar da ordem de 5 m. A fusão da totalidade da actual calote polar antárctica produziria um aumento do nível médio do mar da ordem de 60 m (IPCC, 2001a). Consequentemente, a fusão total dos gelos da Gronelândia e da Antárctida produziria um aumento do nível médio do mar de cerca de 67 m.

Uma outra conclusão de carácter geral é o aumento do nível médio do mar, observado na rede mundial de marégrafos, durante o século XX. O aumento observado situou-se entre 1,0 e 2,0 mm/ano e é cerca de 10 vezes superior ao valor médio estimado por meio de observações indirectas para os últimos 3000 anos (IPCC, 2001a). Sabe-se que o nível médio do mar tem uma variação significativa e rápida nas transições entre épocas glaciares e interglaciares (Lambeck, 2001). No final da última época glaciar, entre 15 000 e 6000 anos atrás, a subida do nível médio do mar foi de 10 mm/ano (IPCC, 2001a).

O aumento do nível médio do mar nos últimos 100 anos é, na sua maior parte, devido à dilatação térmica da camada superficial dos oceanos, provocada pelo aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície, e ao degelo dos glaciares das montanhas. Esta conclusão resulta da interpretação, por meio de modelos, da variação da temperatura superficial dos oceanos observada durante aquele intervalo de tempo (IPCC, 2001a). A continuação da expansão térmica da camada superficial dos oceanos e a propagação do acréscimo de calor às camadas mais profundas irão, muito provavelmente, acelerar o aumento do nível médio do mar durante o século corrente. É importante ter presente que o tempo de resposta dos oceanos ao aumento da concentração de GEE

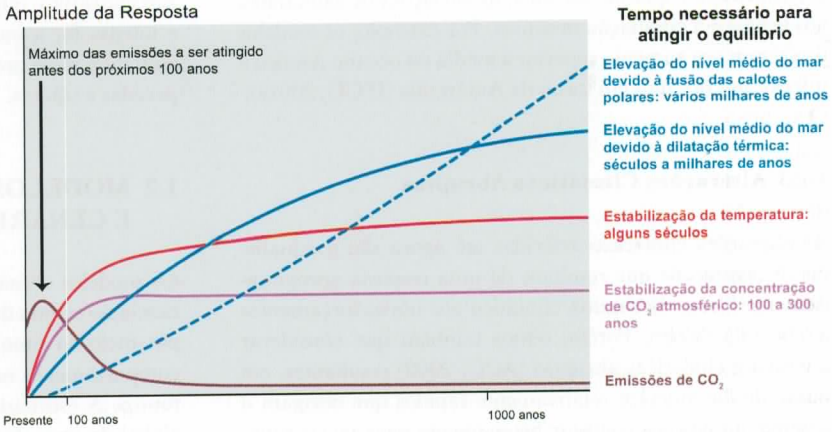


Figura 1.6 – Evolução da concentração do CO_2 atmosférico, da temperatura média global da baixa atmosfera e do nível médio do mar induzida por uma evolução das emissões antropogénicas de CO_2 que atingem um máximo nos próximos 100 anos. Neste cenário a estabilização da concentração do CO_2 dá-se passados 100 a 300 anos e a estabilização da temperatura média global passados alguns séculos. No que respeita ao nível médio do mar a estabilização do seu aumento, provocado pela dilatação térmica e pelo degelo das calotes polares, dá-se passadas várias centenas de anos a mais de um milhar e passados vários milhares de anos, respectivamente. Figura adaptada de IPCC, 2003

na atmosfera é muito maior do que o tempo de resposta da atmosfera. Foi referido que a atmosfera, no que respeita à evolução da concentração de CO_2, tem um tempo de resposta da ordem de 100 anos; o tempo de resposta dos oceanos ao aumento do efeito de estufa é superior a 500 anos devido à sua maior inércia térmica. A Figura 1.6 representa o tempo de resposta da atmosfera e dos oceanos, ou seja, o tempo necessário para o sistema atingir o equilíbrio, perante o forçamento de uma determinada evolução das emissões antropogénicas de CO_2. Se fosse possível interromper total e imediatamente as emissões antropogénicas de GEE, o nível médio do mar continuaria a subir durante pelo menos 500 anos. Observações recentes (Barnett, 2001; Kerr, 2005) confirmam que o aquecimento da camada superficial dos oceanos está a propagar-se às camadas mais profundas até profundidades da ordem de milhares de metros. A concordância entre o perfil térmico observado e o que se obtém por meio de modelos climáticos é actualmente interpretada como uma das provas mais robustas do aquecimento global antropogénico.

O aumento do nível médio do mar projectado até ao final deste século pelo Terceiro Relatório do IPCC (IPCC, 2001a), com base num conjunto de modelos climáticos e de cenários socioeconómicos futuros, está compreendido entre 0,09 e 0,88 m. Este aumento resulta principalmente da expansão térmica da camada superficial dos oceanos e do degelo dos glaciares das montanhas. De acordo com os modelos utilizados, a contribuição da fusão dos gelos da Gronelândia e da Antárctida para o aumento do nível do mar nos próximos 100 anos não será muito significativa. Note-se que o aumento do nível médio do mar não é o mesmo para todos os oceanos e para todas as regiões de um dado oceano devido à variação geográfica da expansão térmica, às variações de salinidade, aos ventos e à circulação oceânica. Por exemplo, os modelos projectam um aumento superior à média no oceano Árctico e inferior nos oceanos em torno da Antárctida (IPCC, 2001a).

1.1.3 Alterações Climáticas Abruptas

As alterações climáticas referidas até agora são gradualistas no sentido de que resultam de uma resposta aproximadamente linear do sistema climático aos novos forçamentos a que está sujeito. Porém, temos também que considerar alterações climáticas abruptas (ACC, 2002) resultantes, em geral, de forçamentos relativamente rápidos que obrigam o sistema climático a transitar bruscamente para novas situações de equilíbrio muito diferentes das anteriores. O sistema climático envolve uma grande multiplicidade de interacções e mecanismos de retroacção, muitos deles não lineares. Estes processos criam limiares de resposta às perturbações a partir dos quais o comportamento do sistema é profundamente alterado. Estudos de paleoclimatologia revelam claramente vários exemplos de alterações climáticas abruptas nos últimos 100 000 anos, especialmente nos períodos de transição para a última época glaciar e desta para a actual época interglaciar. Há indícios de variações abruptas da temperatura média global, de cerca de 5 °C, em intervalos de tempo curtos da ordem das poucas décadas. Um dos exemplos mais conhecidos, chamado Younger Dryas, deu-se no final da época glaciar há cerca de 12 800 a 11 500 anos e resultou provavelmente da interrupção e reposição da corrente termo-halina no Atlântico Norte. Outro exemplo registado nos gelos da Gronelândia foi um arrefecimento local de cerca de 6 °C, durante um pequeno intervalo de tempo, há cerca de 8200 anos, provocado, provavelmente, pela fusão da camada de gelo na baía de Hudson no Canadá (Barber, 1999).

As alterações climáticas abruptas são mais difíceis de simular e de prever porque resultam de processos não lineares em situações particularmente instáveis, embora os seus efeitos possam ser mais graves. Uma das situações que tem sido amplamente analisada é a eventualidade da corrente do Golfo, que faz parte da corrente termo-halina (IPCC, 2001a), deixar de atingir as latitudes elevadas no Atlântico Norte devido ao aumento do afluxo de água doce nessas regiões provocado pelo degelo e por uma maior precipitação. Esta interrupção iria alterar o clima do Atlântico Norte e em particular da Europa Ocidental tornando-o mais frio, muito embora a temperatura média global continuasse a aumentar. Presentemente, os modelos indicam ser muito provável que no Atlântico Norte a corrente termo-halina enfraqueça durante este século, mas improvável que seja interrompida (ACC, 2002).

Em conclusão, importa ter presente que quanto mais rápida e intensa for a interferência antropogénica sobre o sistema climático mais prováveis se tornarão as suas respostas inesperadas e súbitas.

1.2 MODELOS CLIMÁTICOS E CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Os modelos climáticos são instrumentos de grande importância no estudo das alterações climáticas porque permitem, por meio da simulação do sistema climático, interpretar o comportamento recente do clima e obter cenários do clima futuro. A estimativa de −18 °C para a temperatura média global da atmosfera na ausência do efeito de estufa natural resulta da aplicação de um modelo climático extremamente simples que se reduz a uma equação de balanço radiativo no planeta Terra. Os actuais modelos climáticos mais realistas e fiáveis são muito mais complexos: incluem os subsistemas atmosfera e oceano, as suas interacções e a descrição dos vários processos físicos, químicos e biológicos que determi-

nam o clima. O modelo climático ideal deveria descrever todos os processos com relevância para o clima e todos os fenómenos até às mais pequenas escalas temporal e espacial. Evidentemente que tal não é possível; os modelos climáticos são necessariamente incompletos e envolvem vários tipos de aproximações. Por exemplo, é necessário estabelecer compromissos entre as resoluções temporal e espacial do modelo climático devido a limitações computacionais.

É importante referir que não existe contradição entre a impossibilidade de os modelos meteorológicos produzirem previsões do tempo fiáveis para além de 10 dias e a viabilidade de se obterem cenários do clima futuro para os próximos 100 anos. Nos modelos de previsão do tempo pretende-se uma grande resolução espacial e nas escalas pequenas a dinâmica da atmosfera tem um comportamento caótico. Qualquer pequena perturbação atmosférica num determinado local e instante é susceptível de provocar uma perturbação significativa a grandes distâncias, da ordem de milhares de quilómetros, passado um intervalo de tempo curto, da ordem de poucas semanas. Será que o sistema climático tem características caóticas que impedem a previsão do clima futuro? Uma boa forma de procurar responder a esta pergunta é através da análise e interpretação dos climas do passado. Sabemos que a alternância entre os períodos glaciares e interglaciares durante os últimos 500 000 anos tem na sua origem variações cíclicas nos parâmetros orbitais da Terra (Benn, 1998). Esta hipótese, proposta por Milutin Milankovitch, é confirmada pelo facto de que 60±10 % da variância observada nos registos paleoclimáticos da temperatura média global ocorre próximo das frequências dos ciclos das variações orbitais identificadas na teoria de Milankovitch (Houghton, 1997). Esta regularidade sugere que o sistema climático tem uma tendência fraca para ter um comportamento caótico, sobretudo nas grandes escalas espaciais e temporais, e responde de forma determinista a certo tipo de forçamentos tais como variações na luminosidade do Sol, alterações na distribuição da radiação solar recebida à superfície da Terra com a latitude e as estações do ano, provocadas por variações nos parâmetros dos movimentos de rotação e translação da Terra, e alterações na composição da atmosfera. Esta propriedade permite-nos avaliar o efeito sobre o clima do aumento da concentração de GEE por meio de modelos climáticos.

1.2.1 Modelos de Circulação Geral (GCM) e Modelos Regionais (RCM)

Os actuais modelos climáticos, chamados de circulação geral, GCM (General Circulation Models) simulam o sistema climático terrestre, incluindo a atmosfera e os oceanos, por meio de uma malha tridimensional com uma resolução horizontal de cerca de 300 km e com 10 a 40 níveis verticais (Harvey, 2000). Para cada célula da malha o modelo, através da resolução de equações que descrevem a conservação da energia, do momento linear e da massa, calcula os valores das variáveis meteorológicas, tais como, temperatura, pressão, humidade e nebulosidade. Fenómenos que se processam em escalas mais pequenas do que a dimensão da malha elementar, tais como a formação de nuvens, são representados por meio de parametrizações. A fiabilidade de um GCM depende em grande parte do desenvolvimento, teste e validação de parametrizações adequadas para aqueles fenómenos.

Qual é o grau de confiança que poderemos atribuir aos cenários climáticos futuros? Como se podem validar os modelos climáticos que os produzem? Uma das provas da robustez dos GCMs é a capacidade de reproduzirem satisfatoriamente o comportamento do clima durante os últimos 150 anos em que há registos de medições directas de várias variáveis meteorológicas. Outras técnicas de validação consistem em reproduzir a resposta da atmosfera a forçamentos transientes, como os que ocorrem após uma forte erupção vulcânica que, ao injectar grandes quantidades de SO_2 e poeiras para a atmosfera, provocam um forçamento radiativo negativo. A erupção do vulcão do monte Pinatubo nas Filipinas em 12 de Junho de 1991 provocou uma anomalia negativa da temperatura média global durante cerca de 5 anos com um valor médio de −0,25 °C que foi bem reproduzida pelos modelos climáticos (Hansen, 1992). Uma outra forma de validar os modelos climáticos é testar a sua capacidade de reproduzir o ciclo sazonal das variáveis meteorológicas. As observações revelam que o Inverno tem uma temperatura média inferior à do Verão de 15 °C no hemisfério Norte e de 5 °C no hemisfério Sul. Esta diferença resulta de os oceanos ocuparem mais área no hemisfério Sul pelo que a sua maior capacidade calorífica modera as variações da temperatura da atmosfera. Os GCMs reproduzem muito bem estas variações sazonais da temperatura e a assimetria entre os dois hemisférios.

Um dos conceitos mais importantes associados aos modelos climáticos é o da sensibilidade climática: de forma simplificada define-se como a razão entre um aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície e o forçamento radiativo positivo que o provocou (Harvey, 2000). Porém, para calcular e comparar as sensibilidades climáticas dos GCMs, a prática usual é considerar uma duplicação do CO_2 atmosférico. De acordo com esta definição, a sensibilidade climática é o aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície quando a atmosfera se ajusta a uma concentração fixa de CO_2 com o valor de 560 ppmv, duplo do valor pré-industrial de 280 ppmv. O valor da sensibilidade climática é aproximadamente independente do valor inicial da concentração de CO_2 dado que a temperatura média global tem uma variação quase logarítmica com o aumento daquela concentração (Houghton, 1997). Note-se

ser bastante provável que a concentração do CO_2 atmosférico atinja 560 ppmv antes do final do século corrente.

A maioria dos GCMs têm uma sensibilidade climática entre 2 e 4 °C. Contudo, algumas simulações apontam para valores mais elevados como é o caso de um estudo recente (Stainforth, 2005) em que se atingem valores superiores a 7 °C.

Até há relativamente pouco tempo, devido a limitações computacionais, os modelos climáticos produziam apenas simulações de equilíbrio, nas quais a concentração de CO_2 não varia no tempo. As actuais simulações transientes, em que a concentração de CO_2 evolui no tempo, são obviamente mais realistas. A sensibilidade climática numa simulação transiente é tipicamente metade da que se obtém, com o mesmo modelo climático, numa simulação de equilíbrio, devido ao atraso no aumento de temperatura da atmosfera associado ao aquecimento dos oceanos. O menor aumento da temperatura num processo transiente, resultante da duplicação da concentração de CO_2, é apenas temporário dado que o valor da sensibilidade climática de equilíbrio será inevitavelmente atingido após algumas décadas. A interpretação das causas do comportamento recente, nos últimos 150 anos, da temperatura média global da atmosfera e, em especial, a identificação de sinais de uma alteração climática antropogénica, só foi possível por meio da utilização de simulações transientes nas quais é possível variar no tempo os forçamentos naturais e antropogénicos sobre o sistema climático (Stott, 2000).

Para um dado cenário de evolução das emissões de GEE existe ainda uma incerteza significativa nos cenários climáticos futuros projectados pelos GCMs e, em particular, no valor projectado para o aumento da temperatura média global no final do século. Esta incerteza resulta essencialmente da nossa incapacidade actual de simular nos GCMs os fenómenos meteorológicos à escala do km e das horas, em especial os processos associados à formação de nuvens. Porém, esta resolução espacial e temporal requer uma capacidade de supercomputação que ainda não existe. Será necessário aumentar a velocidade de computação de 20 Teraflops (10^{12} operações de vírgula flutuante por segundo) dos mais rápidos supercomputadores actuais para os Petaflop (10^{15}) o que irá provavelmente exigir um forte investimento específico à escala internacional (Palmer, 2005).

A actual resolução espacial dos GCMs (tipicamente da ordem dos 300 km) gera grandes dificuldades na utilização dos respectivos cenários climáticos futuros no estudo dos impactos das alterações climáticas em áreas de dimensões menores do que a malha e em particular em países com áreas relativamente pequenas, como é o caso de Portugal. As dificuldades são particularmente notórias no estudo dos impactos em sectores muito sensíveis à geografia a nível local, tipicamente da ordem de ou inferior a 50 km, como é o caso dos recursos hídricos, agricultura, florestas e biodiversidade. Uma das possíveis soluções para o problema é utilizar modelos de elevada resolução espacial numa determinada área limitada, designados modelos regionais ou abreviadamente RCM (Regional Climate Model). Os RCMs têm tipicamente uma resolução de 30 a 50 km e são forçados pelas condições de fronteira gerados por um GCM. Note-se que este processo de regionalização dos modelos tem a grande vantagem de permitir obter cenários numa escala com maior detalhe espacial mas incorpora as incertezas do GCM bem como as que resultam do processo de regionalização dinâmica a partir desse GCM. Existem também metodologias de regionalização estatística nas quais se utilizam modelos estatísticos para relacionar as variáveis climáticas de larga escala, chamados preditores (*predictors*), com as variáveis a nível regional ou local, designadas predicandos (*predictans*) (IPCC, 2001a). Os preditores obtidos com um GCM, ao serem introduzidos no modelo estatístico, permitem fazer uma estimativa das características do clima a nível regional ou local. A principal fraqueza da regionalização estatística na construção de cenários climáticos é pressupor que as relações estatísticas encontradas no clima actual se mantêm no clima futuro. Há ainda metodologias de regionalização mistas que envolvem técnicas dinâmicas e estatísticas. No presente estudo utilizaram-se GCMs e RCMs obtidos por regionalização dinâmica e desenvolveu-se um modelo de regionalização para ilhas de pequenas dimensões (com uma dimensão máxima da ordem dos 70 km) que se aplicou a algumas ilhas dos arquipélagos dos Açores e da Madeira.

O clima de uma região é determinado pelos forçamentos e circulações atmosféricas que ocorrem nas escalas planetária (áreas maiores que 10^7 km^2), regionais (tipicamente 10^4 km^2) e locais (menores do que 10^4 km^2), em escalas de tempo muito variadas, desde as horas até muitas décadas (IPCC, 2001a). Os forçamentos à escala planetária determinam a circulação geral da atmosfera que influenciam os climas regionais. Contudo, os forçamentos à escala regional e local além de influenciarem os climas regionais têm também efeitos sobre os regimes de circulação global. A orografia, características da superfície terrestre, lagos e albufeiras interiores, campos de neve, gelos e correntes oceânicas constituem alguns exemplos importantes de forçamentos à escala regional. A variabilidade climática de uma região é também influenciada por anomalias cíclicas em regiões mais ou menos próximas, como El Niño e a Oscilação do Atlântico Norte.

1.2.2 Cenários de Emissões de Gases com Efeito de Estufa

Importa referir que para obter uma simulação transiente do clima futuro com um GCM é necessário escolher um cenário

de evolução das concentrações de GEE. A construção destes cenários foi iniciada pelo IPCC no *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) (Nakicenovic, 2000). Os cenários SRES são baseados em quatro famílias de possíveis narrativas do desenvolvimento socioeconómico futuro – A1, A2, B1, B2 – que incluem de forma coerente os factores demográficos, sociais, económicos e tecnológicos (IPCC, 2001c).

O cenário A1 descreve um mundo com um desenvolvimento económico e tecnológico rápido e uma população global que atinge um máximo em meados do século XXI. O cenário A2 corresponde a um mundo profundamente heterogéneo com um desenvolvimento socioeconómico e tecnológico fragmentado em que a população mundial cresce durante todo o século XXI. O cenário B1 descreve um mundo convergente que privilegia o desenvolvimento sustentável e as soluções globais para os problemas sociais e económicos. Finalmente, o cenário B2 descreve um mundo centrado na procura de soluções locais para os problemas sociais, económicos e ambientais e no qual a população cresce até ao final do século XXI, mas a um ritmo inferior ao do cenário A2.

Cada um destes cenários SRES permite construir um cenário de evolução das emissões de GEE até ao final do século. Nenhum deles inclui medidas específicas de redução das emissões acordadas no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas ou do Protocolo de Quioto. De um modo geral as famílias de cenários A1 e A2 projectam uma maior quantidade de emissões de GEE até 2100 do que as famílias de cenários B1 e B2. Consequentemente, os cenários de emissões do tipo A1 e A2 conduzem em geral a um maior aumento da temperatura média global do que os cenários do tipo B1 e B2.

1.3 VULNERABILIDADE E IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

A interferência humana sobre o sistema climático está já a provocar alterações climáticas que se irão agravar ao longo do presente século. Face a esta situação torna-se necessário avaliar a vulnerabilidade dos vários sistemas naturais e sociais às alterações climáticas, bem como os potenciais impactos, positivos e negativos, sobre esses sistemas. Um dos principais objectivos deste tipo de estudo é identificar, avaliar e propor medidas de adaptação que minimizem os impactos negativos das alterações climáticas e potenciem os aspectos positivos. Foi já referido que as principais características das alterações climáticas antropogénicas projectadas para este século incluem a continuação do aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície, alterações na distribuição espacial e temporal, ao longo do ano, da precipitação, alterações na frequência e intensidade de alguns fenómenos climáticos extremos e o aumento do nível médio do mar. Estes efeitos irão ter impactos mais ou menos significativos em vários sistemas naturais e sociais tais como: recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde humana, florestas, biodiversidade, pescas, energia, zonas urbanas, turismo e seguros. As alterações climáticas antropogénicas irão muito provavelmente dificultar de forma desigual o desenvolvimento sustentável em diferentes regiões no mundo e contribuir para um agravamento da pobreza, da degradação ambiental e das actuais desigualdades profundas de desenvolvimento entre países.

1.3.1 Sensibilidade, Capacidade de Adaptação e Vulnerabilidade às Alterações Climáticas

O grau com que um determinado sistema natural ou social é afectado de forma positiva ou negativa pelos estímulos climáticos caracteriza a sua sensibilidade às alterações climáticas. A capacidade de adaptação de um sistema às alterações climáticas traduz a sua capacidade de se adaptar às variações da média e da variabilidade das variáveis que caracterizam o clima, de moderar os estragos potenciais e tirar vantagem das novas situações (IPCC, 2001b). Finalmente, a vulnerabilidade descreve o grau com que um sistema natural ou social é susceptível de suportar ou não os efeitos adversos das alterações climáticas, considerando o seu nível de exposição às alterações climáticas, a sua sensibilidade e a sua capacidade de adaptação.

A vulnerabilidade às alterações climáticas dos sistemas naturais e sociais varia conforme a localização geográfica e as condições sociais, económicas e ambientais em que se inserem. Os impactos negativos serão particularmente graves nas regiões e países em desenvolvimento, que, por essa razão, têm menor capacidade para adoptar medidas de adaptação capazes de os minimizar. Um exemplo claro consiste em comparar a capacidade de resposta em diferentes regiões do mundo vulneráveis à subida do nível do mar. Actualmente há cerca de 100 milhões de pessoas que vivem numa faixa de zonas costeiras com uma elevação máxima de 1 m em relação ao nível médio do mar. No Bangladesh são cerca de 6 milhões. Admitindo que até ao final do século há uma subida do nível médio do mar da ordem de 0,5 m, é notório que os países em desenvolvimento, com maior risco de inundação como, por exemplo, o Bangladesh, Moçambique e a região do delta do Nilo no Egipto são mais vulneráveis porque têm menor capacidade de adaptação do que os países desenvolvidos sujeitos ao mesmo tipo de risco, como, por exemplo, a Holanda. A aceleração da subida do nível do mar será particularmente grave nos Estados formados por pequenas ilhas especialmente quando de muito baixa altitude, como é o caso das Maldivas no oceano Índico e das ilhas Marshall no Pacífico.

Dado que praticamente todos os sistemas naturais e sociais são sensíveis ao clima e interactuam entre si e com o sistema climático de forma mais ou menos complexa, torna-se extremamente difícil fazer uma avaliação completa dos impactos das alterações climáticas. Para obviar esta dificuldade é conveniente seleccionar um conjunto de sistemas nos quais os impactos são já suficientemente perceptíveis e mensuráveis para servirem de indicadores dos impactos no sistema global. Os indicadores do clima e dos impactos das alterações climáticas podem também servir para estabelecer objectivos de controlo da interferência antropogénica sobre o sistema climático e das suas consequências. Num relatório recente da Agência Europeia do Ambiente (EEA, 2004) agruparam-se os indicadores nas seguintes oito categorias: atmosfera e clima, glaciares, neve e gelos, sistemas marinhos, ecossistemas terrestres e biodiversidade, água, agricultura, economia e saúde humana.

1.3.2 Impactos das Alterações Climáticas

Consideram-se agora de forma muito sucinta os principais impactos nos vários continentes para depois focar a nossa atenção sobre a Europa e finalmente sobre Portugal.

A África tem uma vulnerabilidade elevada às alterações climáticas devido: à dependência duma agricultura pouco desenvolvida; às secas e cheias frequentes; à pobreza e, de um modo geral, à muito limitada capacidade de adaptação que resulta do seu fraco desenvolvimento económico e tecnológico. É provável que a desertificação se acelere no Sul, Norte e Oeste de África devido à diminuição da precipitação anual projectada pelos cenários climáticos. Haverá também uma perda significativa de biodiversidade com impactos adversos nas comunidades rurais e no turismo.

Na Ásia os países em desenvolvimento apresentam uma vulnerabilidade muito maior do que os países desenvolvidos. O degelo dos glaciares e a maior frequência de cheias e secas irão ter impactos negativos nos recursos hídricos, agricultura, florestas e biodiversidade, especialmente nos países em desenvolvimento. O aumento do nível médio do mar e um possível aumento da intensidade e frequência dos ciclones tropicais irá afectar e deslocar muitas dezenas de milhões de pessoas das zonas costeiras baixas, nas regiões temperadas e tropicais da Ásia. Na Austrália a capacidade de adaptação é em geral elevada, exceptuando alguns povos indígenas.

Na América do Sul a capacidade de adaptação às alterações climáticas é relativamente baixa. Tal como em outras regiões a maior frequência de cheias e secas e o recuo dos glaciares irá ter impactos negativos sobre os recursos hídricos, a agricultura, as florestas e a biodiversidade. Os modelos climáticos projectam uma diminuição da precipitação anual na região da floresta do Amazonas. Esta redução poderá agravar-se devido à desflorestação da Amazónia que, por meio do decréscimo da evapotranspiração, provoca também uma diminuição da precipitação (Henderson-Sellers, 1993; Lean, 1996). A combinação destas duas tendências poderá revelar-se muito gravosa tanto para o sector da agricultura como das florestas, no Brasil. Na América do Norte a vulnerabilidade é relativamente baixa devido à maior capacidade de adaptação. Algumas regiões do Norte do Canadá poderão tornar-se produtivas para a agricultura e a área de floresta tenderá a aumentar em zonas anteriormente ocupadas por tundra.

1.3.3 Impactos Diferenciados na Europa

Finalmente, na Europa a capacidade de adaptação é geralmente elevada. As regiões do Sul, do Mediterrâneo e da Europa do Árctico são mais vulneráveis do que as restantes. A maior vulnerabilidade no Sul resulta sobretudo de que nessa região há uma diminuição da precipitação anual enquanto que no Norte há um aumento, de acordo com os modelos climáticos. Cenários climáticos recentes projectam um aumento da precipitação anual no Norte da Europa da ordem de 1-2 % por década e uma diminuição no Sul de cerca de 1 % por década (ACACIA, 2000; IPCC, 2001b). No que respeita à distribuição sazonal projecta-se uma tendência para o aumento da precipitação no Verão de 2 % por década no Norte e diminuição de 5 % por década no Sul (ACACIA, 2000; IPCC, 2001b). A redução da precipitação no Sul será acompanhada por períodos de seca mais frequentes com impactos muito gravosos em vários sectores, especialmente na agricultura e nos recursos hídricos. O escoamento dos rios tenderá a aumentar no Norte da Europa e a diminuir fortemente no Sul com consequências gravosas para a disponibilidade de recursos hídricos e para a qualidade da água. De um modo geral, ao longo do século actual, a agricultura e as culturas na Europa tenderão a deslocar-se para norte. No Sul o impacto na agricultura das alterações climáticas será em geral negativo e obrigará a recorrer a medidas de adaptação. As ondas de calor irão tornar-se mais frequentes e intensas na Europa mas no Sul os valores mais elevados da temperatura tenderão a torná-las mais gravosas para a saúde humana. Em contrapartida os períodos muito frios tenderão a tornar-se menos frequentes, reduzindo o impacto na mortalidade especialmente no Norte da Europa.

A taxa anual de subida do nível médio do mar na Europa durante o século XX observada em marégrafos variou entre 0,8 mm/ano em Brest, França, e 3 mm/ano em Narvik, na Noruega (Liebsch, 2002). Este último valor está corrigido do efeito de ajustamento isostático provocado pela fusão dos

gelos da última glaciação. Em geral, na Escandinávia, o nível médio do mar está a descer relativamente à costa, devido àquele efeito (Douglas, 2001). Os cenários futuros projectam uma taxa de aumento do nível do mar na Europa até 2100 que é 2,2 a 4,4 vezes superior ao observado no século XX (EEA, 2004). É muito provável que, para além de 2100, o nível médio do mar continuará a subir durante várias centenas de anos.

Desde o final do século XIX observou-se uma subida da temperatura média global do mar à superfície de 0,6±0,1 °C, compatível com o aumento observado da temperatura média global da atmosfera à superfície (IPCC, 2001a). Até 2100 o aumento projectado para a temperatura média global do mar à superfície, relativamente a 1990, é de 1,1 a 1,4 °C. Este aumento, embora inferior àquele que se projecta para a baixa atmosfera, irá provocar um deslocamento das espécies marinhas para as altitudes mais elevadas e uma profunda reorganização dos ecossistemas planctónicos.

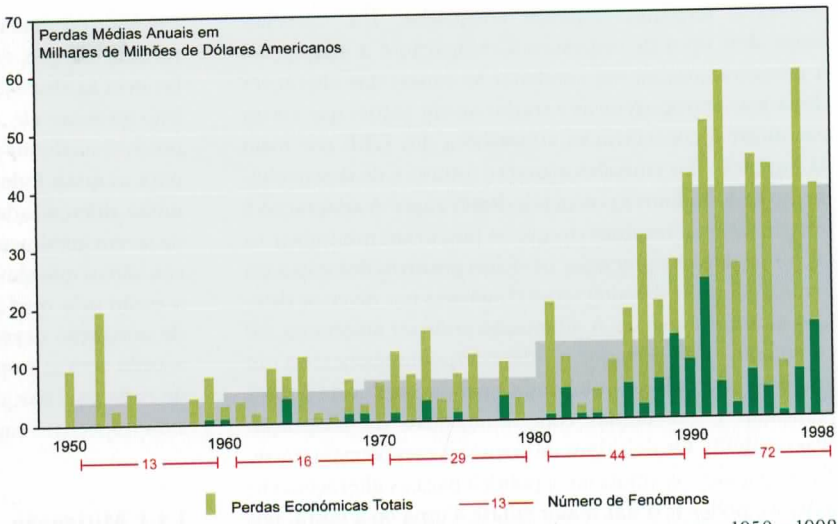


Figura 1.7 – Custos económicos globais dos fenómenos climáticos extremos entre 1950 e 1998 ajustados à inflação e expressos em dólares americanos (US$) de 1999. Os custos anuais à escala global provocados por fenómenos climáticos catastróficos aumentaram desde cerca de 4 mil milhões de US$, na década de 1950, para 40 mil milhões de US$ na década de 1990. A percentagem das perdas cobertas pelos seguros aumentou desde um nível insignificante até um valor médio de cerca de 33 % na década de 1990. Os custos associados aos fenómenos climáticos não catastróficos seguem uma tendência análoga. A tendência de subida dos custos das perdas, nos últimos 50 anos, resulta em parte de factores socioeconómicos (crescimento demográfico, aumento dos rendimentos, urbanização de zonas vulneráveis) e em parte do aumento da frequência dos fenómenos climáticos extremos. Figura adaptada do IPCC, 2001b

No que respeita aos ecossistemas terrestres e à sua biodiversidade projecta-se em geral um deslocamento para Norte e para maiores altitudes dos ecossistemas e uma perda de biodiversidade mais acentuada no Sul do que no Norte da Europa. A perda e fragmentação dos *habitats* e a proliferação das espécies invasoras limitam a capacidade de migração e adaptação dos ecossistemas às alterações climáticas pelo que a extinção de espécies se tornará mais frequente na última metade do século XXI. A capacidade potencial da biosfera terrestre, no continente europeu, para sequestrar o CO_2 atmosférico por meio da fotossíntese irá provavelmente diminuir de forma significativa devido principalmente ao aumento da temperatura média.

O projectado aumento da frequência dos fenómenos climáticos extremos irá ter um impacto crescente nas economias europeias ao longo do século XXI. Os prejuízos na Europa resultantes de fenómenos meteorológicos e climáticos extremos – cheias, tempestades, secas e ondas de calor – aumentaram nos últimos 20 anos desde valores médios anuais de 5000 milhões até 11 000 milhões de dólares americanos (Munich, 2000). A nível global observa-se a mesma tendência (Figura 1.7). Durante a década de 1990, na Europa, o número de desastres originados por situações meteorológicas ou climáticas extremas duplicou enquanto que o número de desastres de origem não climática, como, por exemplo, sismos violentos, manteve-se constante. É muito provável que esta tendência se agrave durante o presente século.

Os principais impactos das alterações climáticas na saúde resultam das ondas de calor, cheias, doenças originadas pela qualidade deficiente da água e dos alimentos, poluição atmosférica e doenças transmitidas por vectores e roedores. A onda de calor do Verão de 2003 provocou um excesso de cerca de 20 000 mortos na Europa, especialmente nas faixas etárias mais elevadas. De acordo com os cenários climáticos futuros estas ondas de calor irão tornar-se mais frequentes e intensas obrigando à adopção de medidas de adaptação adequadas. De um modo geral projecta-se que os impactos das alterações climáticas na saúde serão mais gravosas no Sul do que no Norte da Europa.

1.4 RESPOSTAS PARA AS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS: MITIGAÇÃO E ADAPTAÇÃO

As alterações climáticas antropogénicas são já inevitáveis no século XXI, têm uma probabilidade elevada de se agravarem e terão impactos, na maior parte negativos, sobre vários sistemas naturais e sociais. Perante estas conclusões torna-se

necessário formular respostas adequadas. Há essencialmente dois tipos de respostas: a mitigação e a adaptação. A primeira consiste em combater as causas das alterações climáticas antropogénicas e traduz-se em acções que visam estabilizar a concentração atmosférica dos GEE por meio da limitação das emissões actuais e futuras e do desenvolvimento de sumidouros potenciais desses gases. A adaptação é um processo de resposta em que se procuram minimizar os efeitos negativos e potenciar os efeitos positivos dos impactos actuais e futuros das alterações climáticas nos diversos sistemas naturais e sociais. A adaptação pode ser autónoma, tal como num organismo que se adapta espontaneamente a um ambiente alterado, ou planeada quando resulta de acções planeadas e executadas com o objectivo da adaptação (Parry, 1998). Os dois tipos de respostas complementam-se, não se excluem e, conforme a política para as alterações climáticas, poder-se-á dar maior ênfase a uma ou a outra, nos diversos níveis, nacional, regional ou internacional.

A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (CQNUAC) apresentada para assinatura na Cimeira da Terra do Rio de Janeiro em 1992, e que entrou em vigor a 21 de Março de 1994, constituiu o primeiro passo, concertado a nível internacional, no sentido de evitar uma interferência perigosa da humanidade no sistema climático da Terra, por meio de medidas de mitigação. Em 2004 tinham já ratificado a CQNUAC 189 Estados, ou seja, praticamente a totalidade do mundo. Na terceira Conferência das Partes (COP – 3) da CQNUAC, realizada no ano de 1997, adoptou-se o Protocolo de Quioto (PQ) que estabelece uma redução obrigatória das emissões de GEE, para o conjunto dos países desenvolvidos, de 5 % no período de cumprimento 2008-2012, relativamente a 1990. Após longas negociações o PQ entrou em vigor a 16 de Fevereiro de 2005. Tanto a CQNUAC como o PQ contêm determinações sobre adaptação às alterações climáticas mas a sua principal ênfase centra-se nos processos de mitigação.

Importa ter presente que os dois tipos de resposta às alterações climáticas – mitigação e adaptação – envolvem custos significativos para a economia que, porém, têm uma dependência muito distinta no quantitativo global de redução das emissões de GEE (CC, 1996). Dito de outra forma, é necessário comparar os custos das acções de mitigação com os custos das consequências da inacção. Os custos da mitigação são tanto maiores quanto maior for o quantitativo de redução global das emissões de GEE a curto e médio prazos, enquanto que os custos dos prejuízos e das medidas de adaptação às alterações climáticas são tanto maiores quanto menor for aquele quantitativo. Por outras palavras, ao evitar ou adiar a redução das emissões ou ainda ao reduzir pouco as emissões, diminuímos os custos de mitigação mas aumentamos os custos de adaptação a futuras alterações climáticas mais pronunciadas e gravosas. O problema é global na medida em que, cada país, isoladamente, não pode controlar nem as alterações climáticas nem os impactos que têm e irão ter sobre ele. O controlo das alterações climáticas só é possível mediante a redução das emissões globais de GEE para as quais todos os países contribuem, embora de forma muito diferenciada. Os países em desenvolvimento, apesar de serem geralmente mais vulneráveis às alterações climáticas, são os que têm menores emissões *per capita* de GEE. Esta a razão pela qual a CQNUAC estabelece que os processos de mitigação devem realizar-se numa base equitativa e de acordo com as responsabilidades comuns mas diferenciadas de cada país nas alterações climáticas e tendo em conta as suas respectivas capacidades.

1.4.1 Mitigação

Uma das principais dificuldades em desenvolver medidas de mitigação efectivas encontra-se no actual paradigma energético mundial no qual os combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – constituem a maior parte das fontes primárias de energia. Em 2000 os combustíveis fósseis constituíam cerca de 80 % das fontes primárias de energia a nível mundial (petróleo 34,8 %, carvão 23,5 % e gás natural 21,1 %) (IEA, 2002). A energia nuclear correspondia a 6,8 % e nas energias renováveis, os resíduos e os combustíveis renováveis representavam 11 %, enquanto que as restantes – hidroelectricidade, geotérmica, solar, marés e ondas – correspondiam apenas a 2,8 %.

Outra dificuldade muito importante é a enorme disparidade de acesso ao consumo de energia e de consumo de energia *per capita* entre os países desenvolvidos e os países em desenvolvimento. Nos países desenvolvidos persiste o paradigma de um consumo elevado de energia *per capita*, com tendência para aumentar e com um valor médio anual cerca de 10 vezes superior à média do consumo de energia *per capita* nos países em desenvolvimento, cujo valor médio anual em 1999 era de 0,64 tep (1 tep = 1 tonelada de equivalente de petróleo = 10^{10} cal = 4,1868 x 10^{10} J). Nesse mesmo ano o consumo anual de energia *per capita* nos Estados Unidos da América foi de 7,86 tep enquanto que no conjunto de África teve o valor médio de 0,32 tep. Cerca de 2500 milhões de pessoas não têm acesso aos serviços modernos de distribuição de energia – electricidade e gás. Geralmente são comunidades pobres vivendo em zonas rurais onde o principal ou único recurso energético é a biomassa.

Mais de metade da população mundial pretende ter acesso a um maior consumo de energia que os aproxime dos padrões actuais de qualidade de vida dos países desenvolvidos. Existe pois uma enorme apetência para o consumo

de energia que se agravará tanto mais quanto maior for o crescimento da população mundial. Actualmente o aumento do consumo anual de energia a nível mundial é de cerca de 2 %. Se esta tendência se mantiver, o consumo global de energia duplica em 2035 relativamente a 1998 e triplica em 2055. Onde estão as fontes primárias de energia capazes de suportar este consumo de energia? Não é este o local para procurar responder a esta pergunta. Contudo é importante referir que a energia é a questão dominante na problemática das alterações climáticas no século XXI e uma das questões centrais na problemática do desenvolvimento sustentável.

O grande desafio para a mitigação é pois diminuir o consumo a nível mundial dos combustíveis fósseis por meio da poupança de energia, utilização mais eficiente da energia primária, desenvolvimento das energias renováveis, de novas tecnologias de produção de energia e inovação. É provável que estas medidas se irão revelar insuficientes e que será necessário recorrer ao sequestro do CO_2 produzido por combustão e ao seu armazenamento em reservatórios naturais subterrâneos (IPCC, 2001c). A descarbonização da economia mundial poderá ser acelerada pelo aumento do preço do barril de petróleo que, de acordo com alguns autores, resulta já, em parte, de estarmos próximo do máximo do consumo global anual de petróleo, chamado máximo de Hubbert (Deffeyes, 2001).

1.4.2 Como Evitar Uma Interferência Antropogénica Perigosa sobre o Sistema Climático

O objectivo principal da CQNUAC, expresso no seu artigo 2.º, é estabilizar a concentração atmosférica dos GEE a um nível que evite uma interferência antropogénica perigosa no sistema climático da Terra. Admitamos que se pretende estabilizar o CO_2 atmosférico – o mais importante GEE em termos de forçamento radiativo – no valor de 560 ppmv, duplo da concentração pré-industrial. Há várias evoluções possíveis das emissões antropogénicas de CO_2 que permitem chegar àquele objectivo. Os modelos climáticos (IPCC, 2001a; Joos, 1996; Jain, 2000) construídos especificamente com o objectivo de determinar a evolução temporal da concentração do CO_2 atmosférico e da temperatura média global da atmosfera, em função de diferentes cenários de emissões de CO_2 indicam que para estabilizar a concentração do CO_2 num determinado valor, ou seja 560 ppmv, é necessário primeiro reduzir as emissões de CO_2 para níveis inferiores aos que tiveram lugar há 10 ou 20 anos. Geralmente escolhe-se para ano de referência, 1990, dado que este ano é também o ano de referência para os compromissos de redução de emissões de GEE dos países desenvolvidos no PQ.

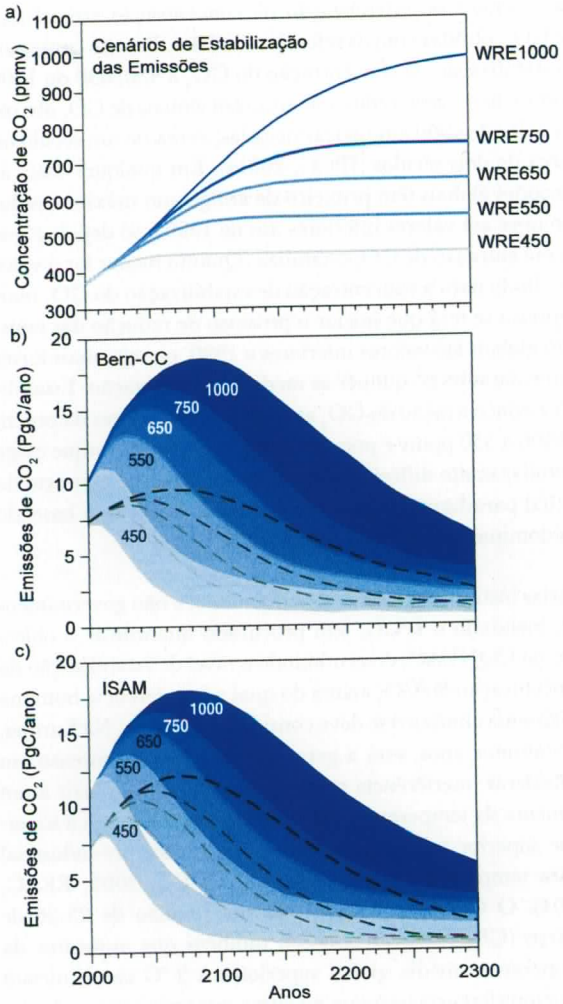


Figura 1.8 – Projecções da evolução das emissões antropogénicas de CO_2 conducentes a diferentes níveis de estabilização da concentração atmosférica de CO_2 (IPCC, 2001a). A Figura a) mostra cenários da evolução da concentração do CO_2 correspondentes a vários valores de estabilização (450, 550, 650, 750 e 1000 ppmv) obtidos por Wigley, Richels e Edmonds (WRE) (Wigley, 1996). Em b) e c) estão representadas as evoluções das emissões antropogénicas de CO_2, que conduzem às trajectórias das emissões representadas em a), obtidas por meio de dois modelos do ciclo do carbono, Bern-CC (Joos, 1996) e ISAM (Jain, 2000). As faixas em várias tonalidades de azul correspondem a diferentes parametrizações dos modelos e a diferentes hipóteses sobre o efeito de fertilização das plantas provocado pelo aumento da concentração do CO_2, a resposta da respiração heterotrófica ao aumento da temperatura e a variação da taxa de dissolução do CO_2 nos oceanos. A faixa relativa a cada valor de estabilização do CO_2 e a cada modelo é delimitada pelas trajectórias extremas correspondentes aos valores mais elevados e mais baixos das emissões de CO_2. A trajectória inferior é representada por uma linha a tracejado quando ocultada por uma outra faixa de incerteza (as emissões anuais de CO_2 estão representadas em $PgC=10^{15}$ g de carbono)

A Figura 1.8 mostra projecções da evolução das emissões antropogénicas de CO_2 correspondentes a vários valores

para o nível de estabilização da concentração atmosférica de CO_2, obtidas com os referidos modelos. Para se conseguir a estabilização da concentração do CO_2 a 450, 650 ou 1000 ppmv é necessário reduzir as emissões globais de CO_2 abaixo do valor de 1990 em poucas décadas, cerca de um século ou cerca de dois séculos (IPCC, 2001a). Em qualquer caso, as emissões globais têm primeiro de atingir um máximo, reduzirem-se até valores inferiores aos de 1990 e só depois é que a concentração de CO_2 estabiliza. Quanto menor for o valor escolhido para a concentração de estabilização do CO_2 mais depressa se terá que iniciar o processo de redução das emissões globais até valores inferiores a 1990, ou seja, mais fortes e imediatas terão que ser as medidas de mitigação. Estabilizar a concentração do CO_2 atmosférico em valores da ordem de 400 a 550 ppmv é pois um desafio tremendo porque exige medidas muito difíceis e com custos elevados no contexto do actual paradigma de consumo mundial de energia baseado predominantemente nos combustíveis fósseis.

Várias instituições a nível governamental e não governamental, incluindo o IPCC, têm procurado quantificar o objectivo da CQNUAC, determinando o nível de estabilização da concentração do CO_2 acima do qual a interferência humana no sistema climático se deve considerar perigosa. Na Europa, nos últimos anos, está a gerar-se um relativo consenso em considerar interferência perigosa aquela que conduzir a um aumento da temperatura média global da atmosfera à superfície superior a 2 °C, relativamente ao valor pré-industrial dessa temperatura (GACGC, 2003; ICCT, 2005; EEAC, 2004). O Conselho Europeu na sua reunião de 25-26 de Março (CE, 2004) reconheceu também que aumentos da temperatura média global superiores a 2 °C constituiriam uma interferência perigosa no clima que teria consequências graves a nível mundial, tais como: acentuada diminuição da produtividade agrícola, um aumento significativo do número de pessoas em situação de grande escassez de recursos hídricos, impactos adversos generalizados na saúde humana e prejuízos irreversíveis em vários ecossistemas terrestres com elevadas perdas de biodiversidade. Importa contudo salientar que a meta dos 2 °C é apenas uma proposta que reúne algum consenso na Europa mas não há nenhum compromisso estabelecido nesse sentido que envolva os Estados Unidos da América, outros países desenvolvidos ou os países em desenvolvimento.

Qual o valor da concentração de estabilização do CO_2 que garante um aumento da temperatura média global inferior a 2 °C relativamente ao valor pré-industrial? A resposta a esta pergunta depende da sensibilidade climática do modelo utilizado. Consequentemente é apenas possível estabelecer um intervalo de probabilidades de atingir aquela variação de temperatura para uma dada concentração de estabilização. A Figura 1.9 mostra projecções da variação da temperatura média global a partir de 1990 obtidas para vários valores da concentração de estabilização do CO_2 atmosférico. Num cenário de estabilização do CO_2 em 450 ppmv, correspondente aproximadamente a 550 ppmv de GEE em CO_2 – equivalente, o aumento de temperatura projectado, relativamente ao valor pré-industrial, é de 2,3 °C, ainda acima dos referidos 2 °C (Criqui, 2003). Uma concentração de estabilização dos GEE de 450 ppmv em CO_2 – equivalente tem uma probabilidade maior, da ordem de 20 % a 70 %, de conduzir a um aumento de temperatura inferior a 2 °C (EEAC, 2004). Tendo presente que em 2004 a concentração do CO_2 era já de 379 ppmv, conclui-se que há uma enorme dificuldade, quase impossibilidade, de limitar o aquecimento global a 2 °C.

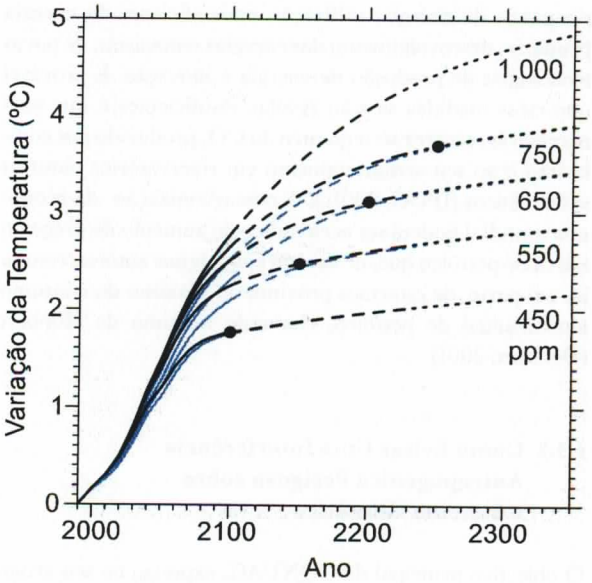


Figura 1.9 – Projecções da variação da temperatura média global desde 1990 obtidas quando a concentração atmosférica de CO_2 é estabilizada de acordo com os perfis WRE (Wigley, 1996) da Figura 1.8 (IPCC, 2001a). As trajectórias a azul representam cálculos anteriores utilizados no Segundo Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 1996a). Os resultados correspondem aos valores indicados para o nível de estabilização do CO_2 e constituem médias de conjuntos de projecções obtidas com modelos climáticos. O cenário de base para as emissões de GEE até 2100 (exceptuando o CO_2) é o A1B. Admite-se que depois de 2100 as emissões destes gases se mantêm constantes com os valores do cenário A1B em 2100. Os pontos a negro indicam a data em que se dá a estabilização do CO_2. Para o perfil correspondente 1000 ppmv a estabilização dá-se no ano de 2375. Repare-se que, para cada curva, a estabilização da temperatura dá-se muito depois da estabilização do CO_2

1.4.3 O Pós-Quioto

É evidente que o cumprimento dos compromissos de redução das emissões de GEE estabelecidos no PQ não permite estabilizar a concentração atmosférica desses gases. A redução das

emissões, admitindo que as metas são cumpridas, é cerca de 5 % em 2012 relativamente a 1990, mas apenas para o conjunto de países desenvolvidos que ratificaram o PQ. Entretanto outros países desenvolvidos, como os Estados Unidos da América e a Austrália e os países em desenvolvimento, em especial os países de economia em transição, como o Brasil, China, Índia e Indonésia, irão provavelmente continuar a aumentar as emissões de GEE até 2012 e para lá de 2012. O PQ prevê que pelo menos 7 anos antes do final do 1.º período de cumprimento (2008-2012) as partes iniciem o processo de definição dos compromissos de redução de emissões de cada país para um 2.º período de cumprimento. É o chamado pós-Quioto cuja negociação teve início no ano de 2005. Apenas a União Europeia tem demonstrado publicamente o seu empenho em procurar negociar e estabelecer metas de redução de emissões para o período pós-Quioto. Numa reunião realizada em Março de 2005 os ministros do Ambiente da UE concordaram em reduzir as emissões de GEE de 15 % a 30 % até 2020 e de 60 % a 80 % até 2050, relativamente a 1990. Contudo, não existe ainda qualquer esboço de acordo com os outros países desenvolvidos ou com os países em desenvolvimento. As medidas de mitigação pós-Quioto estão ainda profundamente indefinidas, poderão adoptar modelos muito diversos e são objecto de intensa investigação e discussão (Meyer, 2000; Michaelowa, 2003; Pershing, 2003; Yohe, 2004). Recentemente alguns autores têm salientado a necessidade de considerar simultaneamente políticas de mitigação das alterações climáticas no médio e longo prazos numa escala de tempo de várias décadas a um século de modo a poder planear e assegurar a transição para uma economia tendencialmente livre de emissões de GEE daqui a cerca de um século (Hasselmann, 2003).

1.4.4 Adaptação

Os processos de adaptação às alterações climáticas são essenciais para minimizar os impactos negativos que começam já a ter sobre alguns sistemas naturais e sociais e que muito provavelmente se irão agravar durante as próximas décadas. Temos de nos preparar e adaptar às consequências das alterações climáticas antropogénicas para além de procurar combatê-las por meio de medidas de mitigação. É pois necessário desenvolver estratégias de adaptação para evitar ou minimizar os prejuízos nos sistemas naturais e sociais vulneráveis às alterações climáticas e para procurar garantir um desenvolvimento sustentável num contexto de mudança climática. A adaptação requer a participação activa dos agentes, públicos e privados, envolvidos nos diversos sectores socioeconómicos que são ou serão afectados pelas alterações climáticas.

Uma estratégia de adaptação representa um conjunto de políticas e medidas concebidas e planeadas para minimizar um determinado risco ou um conjunto de riscos resultantes dos impactos das alterações climáticas. O primeiro passo num processo de adaptação consiste pois em fazer uma avaliação dos impactos das alterações climáticas. A forma habitual de realizar este tipo estudo, para uma dada região, país ou a nível global, consiste em considerar cenários climáticos futuros gerados por GCMs e avaliar os diversos impactos das alterações climáticas descritas por aqueles cenários. A avaliação é multissectorial quando se avaliam os impactos em vários sistemas naturais e sociais sensíveis às alterações climáticas. A avaliação de impactos é multissectorial e integrada quando envolve a investigação da dinâmica interna e das interacções entre os vários sistemas naturais e sociais expostos à mudança climática, utilizando as metodologias e os conhecimentos das várias disciplinas científicas relevantes para o estudo desses sistemas e se baseia nos mesmos conjuntos de cenários climáticos futuros para avaliar aqueles impactos. Fica assim garantida a coerência das avaliações o que permite identificar sinergias entre os impactos sectoriais. Vários autores e instituições têm desenvolvido directrizes e modelos para este tipo de avaliação de impactos conhecido pelas designações de directo, *top-down* ou *scenario-based* (Carter, 1994; Feenstra 1998; Parry, 1998). Um outro tipo de avaliação de impactos, mais recente e conhecido pelas designações de *bottom-up* ou *vulnerability-based* consiste em analisar a vulnerabilidade climática actual dos sistemas naturais e sociais de uma dada região, estudar o modo como as comunidades populacionais se estão a adaptar e depois usar os resultados para projectar o que se irá passar no futuro face às projecções para as alterações climáticas, ambientais e socioeconómicas. Esta metodologia incorpora desde o início os processos de adaptação pelo que é mais adequada para desenvolver estratégias de adaptação. Os dois tipos de avaliação de impactos são complementares e têm sido utilizados simultaneamente.

As avaliações *scenario-based*, multissectoriais, integradas e globais dos impactos das alterações climáticos foram realizadas pelo IPCC (IPCC, 1996b; IPCC, 2001b). No terceiro relatório de avaliação (IPCC, 2001b) foram considerados os seguintes sectores: recursos hídricos; ecossistemas e os seus bens e serviços, incluindo a agricultura e as florestas; zonas costeiras e ecossistemas marinhos; aglomerados populacionais urbanos e rurais; energia e indústria, seguros e outros serviços financeiros e saúde humana. As avaliações multissectoriais e integradas a nível nacional são ainda em número limitado. Segundo Kovats *et al.* (Kovats, 2003) na Europa, em meados de 2002, existiam apenas duas avaliações multissectoriais nacionais que incluíam o sector da saúde (CCIRG, 1996; SIAM, 2002).

As avaliações de impactos das alterações climáticas à escala regional, nacional ou global são instrumentos importantes

para informar e sensibilizar o público, sobretudo os agentes envolvidos na problemática das alterações climáticas, em especial os decisores políticos. Servem também para incentivar a participação daqueles agentes e do público em geral no planeamento e execução de estratégias de adaptação. Na vertente económica e financeira são importantes para fundamentar estudos de avaliação dos custos dos prejuízos potenciais provocados pelos impactos adversos das alterações climáticas e das medidas de adaptação, destinadas a minimizar esses impactos. Os resultados deste tipo de estudos são essenciais para efectuar análises de custo-benefício que permitam optimizar o peso relativo das componentes de adaptação e mitigação das políticas de combate às alterações climáticas. As avaliações multissectoriais e integradas constituem naturalmente o fundamento conceptual científico e político das medidas de mitigação, pelo que desempenham um papel importante na racionalização e justificação dessas medidas.

1.5 INCERTEZAS

Em ciência não existem verdades absolutas, apenas conclusões que têm maior ou menor probabilidade de descrever e prever os fenómenos com precisão. No caso de teorias bem estabelecidas como a termodinâmica, a mecânica quântica, a teoria da evolução das espécies ou o efeito de estufa, a probabilidade de nos conduzirem a conclusões que representam uma excelente aproximação para a descrição e previsão dos fenómenos é muito elevada pelo que as podemos considerar praticamente como certas. A incerteza torna-se muito maior quando pretendemos efectuar a descrição do comportamento e evolução futura de um sistema complexo tal como, por exemplo, o sistema climático. As razões desta incerteza são muitas e incluem as incertezas nos dados de base, resultantes da observação do sistema, incertezas na descrição e no conhecimento dos processos de natureza física, química, biológica, ou outros, que intervêm no sistema, e finalmente incertezas resultantes das aproximações necessárias para simular o seu comportamento por meio de modelos matemáticos.

No estudo do clima e dos cenários climáticos futuros há várias fontes de incerteza: conhecimento imperfeito do comportamento passado das variáveis que descrevem o clima, em particular a temperatura média global, devido principalmente ao número reduzido e à distribuição pouco homogénea das estações meteorológicas a nível mundial, às mudanças na instrumentação usada e no ambiente urbano ou rural onde essas estações se encontram; conhecimento limitado dos fenómenos físicos, químicos, biológicos e geológicos que se processam no sistema climático; necessidade de utilizar aproximações para simular o comportamento e as interacções das várias componentes do sistema climático nos modelos climáticos, em especial, parametrizações para representar fenómenos, como por exemplo a formação de nuvens, que se processam em escalas espaciais de dimensão inferior à malha dos modelos computacionais. Estas incertezas dificultam a identificação quantitativa da componente antropogénica nas alterações climáticas observadas nas últimas décadas e estão na origem de parte da incerteza inerente aos cenários climáticos futuros.

Os cenários climáticos futuros contêm também a incerteza associada à evolução das emissões globais de GEE durante o século XXI. A avaliação das consequências desta incerteza no clima futuro pode fazer-se por meio da utilização de vários cenários de emissões construídos com base nos cenários socioeconómicos do IPCC (IPCC, 2001c). Esta metodologia permite avaliar o efeito de aumentar ou diminuir o ritmo actual das emissões globais de GEE sobre o sistema climático e em particular sobre a temperatura média global da atmosfera.

A avaliação do impacto das alterações climáticas nos vários sistemas naturais e sociais envolve também incertezas resultantes da dificuldade em separar os efeitos provenientes de transformações sociais, económicas, tecnológicas ou ambientais dos que provêm especificamente da mudança climática. Por exemplo, a perda de biodiversidade resulta em grande parte da perturbação, perda e fragmentação dos *habitats* devido às actividades que neles se realizam e às alterações no uso dos solos. As alterações climáticas constituem apenas mais um factor de pressão negativa sobre a biodiversidade que se adiciona aos restantes e cujo impacto específico se deve procurar identificar claramente, para efeitos de avaliação de impactos e de selecção e implementação de medidas de adaptação.

Uma das principais fontes de incerteza nas avaliações de impactos das alterações climáticas resulta da escassez de dados de base relativos aos indicadores do clima e dos impactos das alterações climáticas nos vários sistemas naturais e sociais. Frequentemente os dados existem apenas para alguns países ou para algumas regiões de um dado país. Há pois uma grande necessidade de melhorar e amplificar os processos de recolha de dados através de programas mais intensivos de monitorização, que é reconhecida por vários países, instituições internacionais e pelas Nações Unidas (GCOS, 2003). Os oceanos são um dos sistemas onde é necessário intensificar a monitorização, especialmente devido à importância desta componente do sistema climático na evolução do clima futuro, desenvolvendo tecnologias de observação mais eficientes do ponto de vista do custo-benefício. No conjunto dos indicadores das alterações climáticas há vários onde é notória a escassez de dados.

Um exemplo claro consiste na dificuldade em identificar os efeitos específicos das alterações climáticas nos ecossistemas terrestres e na biodiversidade devido à inexistência de programas adequados de observação, monitorização e modelização à escala regional, especialmente nos países em desenvolvimento.

1.5.1 Interpretação Bayesiana das Probabilidades e Princípio da Precaução

Os cenários do clima futuro e os impactos das projectadas alterações climáticas nos vários sistemas naturais e sociais não se podem testar de modo empírico, tal como numa experiência laboratorial. Não podemos realizar experiências nos sistemas complexos naturais ou sociais para determinar a frequência relativa da ocorrência de determinada manifestação ou evento significativo do ponto de vista ambiental, social ou económico. Consequentemente não é possível desenvolver a habitual metodologia estatística «objectiva» da ciência em que a validade de uma determinada hipótese é testada por meio de uma série de experiências na qual se regista a frequência relativa com que a hipótese se verifica e se procura assim determinar a sua probabilidade. Consideremos um exemplo concreto. Os cenários climáticos futuros não se podem determinar empiricamente porque é obviamente impossível fazer «experiências» com a atmosfera da Terra. Podemos apenas simular «experiências» em modelos computacionais do sistema climático e experimentar vários tipos de interferências como, por exemplo, alterar a composição da atmosfera, aumentar a actividade vulcânica ou alterar a distribuição da radiação solar recebida ao longo do ano na superfície da Terra em função da latitude, provocada pelas variações nos parâmetros dos movimentos de rotação e translação da Terra que caracterizam os ciclos Milankovitch. O confronto dos resultados destas experiências com as observações e outros testes sobre a fiabilidade das simulações dos vários subsistemas do sistema climático conduzem os cientistas a estabelecer o seu grau de confiança nos cenários climáticos futuros. Estes níveis de confiança, apesar de não serem necessariamente os mesmos para todos os cientistas, permitem avaliar as incertezas com base numa caracterização «subjectiva» ou bayesiana (Edwards, 1992; Leonard, 1999; IPCC, 2001b) das probabilidades. Nesta interpretação a probabilidade de ocorrência de determinado fenómeno num sistema complexo é medida pelo grau de confiança com que um conjunto de especialistas acredita nessa ocorrência de modo fundamentado nas observações, no conhecimento dos processos que determinam o comportamento do sistema e nos modelos que simulam esse comportamento. Fica assim caracterizada uma probabilidade *a priori*. À medida que surgem novos dados, novos conhecimentos sobre os processos e novos modelos de simulação, mais fiáveis, a probabilidade subjectiva é revista e substituída por uma nova probabilidade *a posteriori* que pode ser obtida por meio das metodologias do teorema de Bayes (Tol, 1998).

Esta metodologia é especialmente útil para avaliar o nível relativo de confiança nas conclusões obtidas numa avaliação multissectorial dos impactos das alterações climáticas. Foi utilizada no Terceiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2001a, 2001b, 2001c) recorrendo a escalas quantitativas de níveis de confiança correspondentes a cinco e sete intervalos de probabilidade. No primeiro caso níveis de confiança designados por muito elevado, elevado, médio, baixo e muito baixo, correspondem, respectivamente, aos seguintes intervalos de probabilidade: maior do que 95 %, entre 67 % e 95 %, entre 33 % e 67 %, entre 5 % e 33 % e menor do que 5 %.

Frequentemente não é sequer possível caracterizar a incerteza nestes intervalos de probabilidade e recorre-se a uma avaliação qualitativa baseada no nível de conhecimento científico, caracterizado pela robustez da fundamentação científica (observações, simulação através de modelos e teoria) e no grau de acordo entre especialistas. Assim, temos conclusões «bem estabelecidas» quando a fundamentação científica é robusta e as observações são consistentes com os modelos. As conclusões podem considerar-se «bem estabelecidas embora com conhecimento incompleto» quando os modelos incorporam a maioria dos processos e as observações são consistentes com os modelos, mas incompletas. Os dois outros elementos desta matriz são «explicações competitivas» quando diferentes modelos ao explicar apenas aspectos distintos das observações conduzem a representações competitivas e finalmente «especulativas» quando a fundamentação científica é frágil e conduz a incertezas significativas que não é possível diminuir.

A caracterização bayesiana das incertezas e das probabilidades das várias projecções futuras das alterações climáticas antropogénicas e dos seus impactos coloca a sociedade e em especial os decisores políticos perante a incontornável necessidade de procederem a um juízo de valor que os leve a acreditar ou não na ocorrência dessas projecções e a adoptar políticas e medidas de resposta. Este processo decisório é profundamente complexo e envolve avaliações de naturezas diversas. A decisão implica avaliações do processo científico, da caracterização subjectiva das incertezas, do risco envolvido naquilo que se projecta para o futuro e sobretudo das suas eventuais consequências a nível pessoal, familiar, da comunidade local, nacional, internacional de âmbito regional e global.

O principal fundamento para este tipo de processos de decisão é o princípio da precaução (Harremöes, 2002), um dos princípios básicos mais importantes do desenvolvimento

sustentável, incluído em vários Tratados, Convenções e Protocolos, tais como a Declaração do Rio sobre Ambiente e Desenvolvimento (1992), o Tratado de Maastricht da União Europeia (1992) e a CQNUAC. Neste último caso o art.º 3.3 afirma: «As partes devem tomar medidas cautelares para antecipar, evitar ou minimizar as causas das alterações climáticas e mitigar os seus efeitos prejudiciais. Quando haja ameaças de danos graves ou irreversíveis, a falta de certeza científica não deve ser utilizada para justificar o adiamento da tomada de tais medidas, tendo em conta, no entanto, que as políticas e as medidas relacionadas com as alterações climáticas devem ser eficazes relativamente ao seu custo, de tal modo que garantam a obtenção de benefícios globais ao menor custo possível.»

1.6 O CASO DE PORTUGAL E O PROJECTO SIAM

Múltiplas observações e projecções indicam que, conforme foi já referido, a região mediterrânica e o Sul da Europa, são mais vulneráveis às alterações climáticas antropogénicas do que o Norte da Europa. É pois particularmente relevante e urgente proceder à avaliação dos impactos das alterações climáticas e à identificação e implementação de estratégias de adaptação nos países do Sul da Europa. No caso de Portugal, tanto quanto é do nosso conhecimento, a primeira avaliação de impactos e medidas de adaptação multissectorial e integrada realizou-se no âmbito da primeira fase do Projecto SIAM (SIAM I), que decorreu de meados de 1999 até ao início de 2002 (SIAM, 2002). Segundo Kovats *et al.* (Kovats, 2003) esta foi também a primeira avaliação deste tipo que se realizou num país do Sul da Europa. Em Espanha as principais conclusões da primeira avaliação de impactos multissectorial e integrada (OECC, 2005) foram apresentadas em Fevereiro de 2005. Os resultados deste estudo, que incidiu sobre os sectores dos recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, solos, energia, florestas, ecossistemas terrestres e marinhos, pescas, turismo e seguros são semelhantes aos do Projecto SIAM (SIAM, 2002). Face à severidade dos impactos negativos das alterações climáticas projectadas para Espanha os autores concluem que não há mais tempo a perder e que se deve iniciar de imediato um processo de adaptação às alterações climáticas de modo a minimizar as suas consequências adversas (OECC, 2005).

A segunda fase do Projecto SIAM, que decorreu nos anos de 2002 e 2003, teve por objectivo aprofundar e alargar o âmbito das investigações iniciadas anteriormente, procurar preencher várias lacunas de conhecimento que foram identificadas, alargar o estudo às Regiões Autónomas dos Açores e da Madeira, realizar um estudo de caso mais focado e integrado para uma região especialmente vulnerável do Continente e iniciar um processo organizado de divulgação e discussão dos resultados obtidos junto de agentes cujas actividades são afectadas pelas alterações climáticas. O presente livro contém a síntese dos resultados do trabalho realizado na segunda fase do Projecto SIAM (SIAM II). Muitos dos resultados originais obtidos no âmbito do Projecto foram entretanto divulgados em conferências nacionais e internacionais e/ou publicados em revistas científicas.

O SIAM II manteve a mesma metodologia e estrutura de funcionamento por equipas sectoriais do SIAM I (SIAM, 2002) e envolveu cerca de 61 investigadores distribuídos por 11 equipas. Os sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos sobre os quais incidiu o presente trabalho são os mesmos do SIAM I, designadamente, recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde, energia, florestas e biodiversidade e pescas, embora se tenha alargado consideravelmente o âmbito e a profundidade do estudo. Em cada um dos capítulos dedicados a estes sectores faz-se um resumo breve dos resultados obtidos no SIAM I (SIAM, 2002). Há vários sectores importantes que não foram especificamente considerados, nomeadamente, turismo, solos, pecuária, áreas urbanas, seguros e outros serviços financeiros. Foram construídos cenários climáticos futuros para várias ilhas dos arquipélagos dos Açores e Madeira mas não foi possível, no tempo disponível, fazer a avaliação de impactos e medidas de adaptação às alterações climáticas nessas ilhas.

No SIAM II, para estudo de caso, foi escolhida a região da bacia hidrográfica do rio Sado devido à maior vulnerabilidade do Sul do país às alterações climáticas (especialmente nos sectores dos recursos hídricos, agricultura, florestas e biodiversidade) e ainda ao facto de incluir uma larga área estuarina potencialmente vulnerável à subida do nível médio do mar. Este trabalho constituiu um estudo-piloto para uma abordagem regional. É desejável, no futuro, poder dispor de avaliações dos impactos e medidas de adaptação para as grandes regiões do país que permitam fazer uma identificação dos sectores mais vulneráveis, e dos principais impactos e das estratégias de adaptação mais adequadas nessas regiões. Esta regionalização da avaliação de impactos é um instrumento muito útil para a política das alterações climáticas, tanto na vertente da adaptação como na vertente da mitigação, que está a ser desenvolvida e usada em vários países da UE. A maior ênfase nos impactos e medidas de adaptação a nível local e regional facilita o processo de divulgação e sensibilização junto do público e especialmente junto dos agentes mais directamente envolvidos na problemática das alterações climáticas. Importa salientar que a mitigação e a adaptação são duas respostas complementares e sinérgicas para combater os riscos envolvidos nas alterações climáticas, que deverão desenvolver-se simultaneamente e de forma integrada.

1.6.1 Mitigação e Cumprimento do Protocolo de Quioto em Portugal

A UE ao ratificar o PQ assumiu o compromisso de reduzir as emissões antropogénicas de seis GEE – CO_2, CH_4, N_2O, HFC, PFC e SF_6 – em 8 % no primeiro período de cumprimento, 2008-2012, relativamente a 1990. Pelo acordo de partilha de responsabilidades na UE, Portugal pode aumentar as suas emissões de GEE em 27 % até ao final do primeiro período de cumprimento. É porém muito difícil atingir este objectivo apenas com políticas e medidas de mitigação de âmbito nacional, ou seja, sem recorrer aos chamados mecanismos de Quioto – comércio de emissões, implementação conjunta e mecanismo de desenvolvimento limpo. De acordo com a Terceira Comunicação Nacional à CQNUAC (TCN, 2003) as emissões de GEE de Portugal em 2000 atingiram 84,7 Mton (milhões de toneladas) de CO_2 – equivalente (excluindo o sector de actividade das florestas e alterações de uso do solo), valor que corresponde a um aumento de 30 % relativamente a 1990. Em 2003 o aumento atingiu 38,6 % (IA, 2005). Note-se que há vários países da UE cujas emissões também ultrapassaram já largamente os compromissos de redução para o primeiro período de cumprimento. É o caso, entre outros, da Espanha, Irlanda e Itália que atingiram aumentos em 2001 de 32,1 %, 31,1 % e 7,1 % quando os compromissos são de 15 %, 13 % e -6,5 %, respectivamente (EEA, 2004a). As projecções das emissões nacionais de GEE apontam para um aumento no ano de 2010, face a 1990, que se situa no intervalo de 46,5 % a 53,5 % (ICN, 2003). De acordo com estas estimativas Portugal terá que reduzir as emissões entre 12,6 e 17,2 Mton de CO_2 – equivalente para cumprir o PQ.

As políticas e medidas nacionais elaboradas com o principal objectivo de Portugal cumprir o PQ estão contidas no Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) cuja primeira versão foi apresentada para discussão pública em Dezembro de 2001 e cuja última versão foi aprovada em Conselho de Ministros em Junho de 2004 (RCM, 2004). O PNAC contém essencialmente medidas de mitigação e procura identificar de forma equilibrada e equitativa as responsabilidades de redução de emissões de GEE nos sectores da energia, indústria, transportes, agricultura, floresta, doméstico, serviços e resíduos para atingir o objectivo integrado de cumprimento do PQ. Em conjugação com este esforço é necessário definir e executar um plano nacional de adaptação que procure minimizar os efeitos prejudiciais das alterações climáticas nos vários sectores socioeconómicos e sistemas biofísicos. Para atingir este objectivo é necessário primeiro ter conhecimento detalhado dos impactos das alterações climáticas projectados com base nos modelos climáticos. Este conhecimento é também essencial para justificar e racionalizar a adopção de políticas e medidas de mitigação eficazes tanto a nível nacional, da UE como global.

1.7 REFERÊNCIAS

ACACIA, 2000, M.L. Parry (editor), Assessment of the Potential Effects and Adaptations for Climate Change in Europe: The Europe ACACIA Project, Jackson Environment Institute, University of East Anglia, UK.

ACC, Abrupt Climate Change, 2002, National Research Council. National Academy of Sciences, USA.

ACIA, 2004, Impacts of a Warming Arctic. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press (http://www.acia.uaf.edu).

Barber, D.C., A. Dike, C. Hillaire-Marcel, A.E. Jennings, J.T. Andrews, M.W. Kerwin, G. Bilodeau, R. McNeely, J. Southon, M.D. Morehead and G. Gagnon, 1999, Forcing of the Cold Event of 8200 Years Ago by Catastrophic Drainage of Laurentide Lakes, *Nature* 400: 344-348.

Barnett, T.P., D.W. Pierce and R. Schnur, 2001, Detection of Anthropogenic Climate Change in the World's Oceans, *Science* 292: 270-274.

Benestad, R.E., 2002, Solar Activity and Earth's Climate, Springer-Verlag, Berlin.

Benn, D.I. and D.A.J. Evans, 1998, Glaciers and Glaciation, Edward Arnold, London.

Carter, T.R. *et al.*, 1994, IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations, University College, London.

CC – Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, 1996, J. Bruce, H. Lee and E. Haites (eds), CUP.

CCIRG, Climate Change Impacts Review Group, 1996, Review of the Potential effects of Climate Change in the United Kingdom, HMSO, London.

CE, Conselho Europeu, 2004, Reunião de 25-26 de Março de 2004, Doc. 7631/04 (Annex), p. 29.

Criqui, P., A. Kitous, M. Berk, M. den Elzen; B. Eickhout, P. Lucas, D. van Vuuren, N. Kouvaritakis and D. Vanregemorter, 2003, Greenhouse Gas Reduction Pathways in the UNFCCC Process up to 2025, Study Contract: B4-3040/2001/325703/MAR/E.1 for the D G Environment, EU.

CRU, Climate Research Unit, 2003, University of East Anglia, UK, Global Average Temperature Change 1856-2003 (http//cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/).

Deffeyes, K.S., 2001, Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage, Princeton University Press.

deMenocal, P. B., 2001, Cultural Responses to Climate Change During the Late Holocene, *Science* 292: 667-673.

Douglas, B.C, M.S. Kearney and S.P. Leatherman, 2001, Sea Level Rise, *International Geophysics Series* N.º 75, Academic Press.

Edwards, A.W.F., 1992, Likelihood, The John Hopkins University Press, Baltimore, USA.

EEA, European Environmental Agency, 2004, Impacts of Europe's Changing Climate, Report N.º 2/2004.

EEA, European Environmental Agency, 2004a, Analysis of Greenhouse Gas Emission Trends and Projections in Europe in 2003, Copenhagen (http://reports.eea.eu.int/technical_report_2004_4/en).

EEAC, European Environment and Sustainable Development Advisory Councils, 2004, Towards European Targets for Greenhouse Gas Reduction 2050 and 2020, Den Haag.

Fagan, Brian, 2004, The Long summer, Basic Books, New York.

Feenstra, J.F., I. Burton, J.B. Smith and R.S.J. Tol, 1998, Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies, United Nations Environment Programme and Institute for Environmental Studies, Vrije Universiteit, Amsterdam.

GACGC, German Advisory Council on Global Change, 2003, Climate Protection Strategies for the 21st Century: Kyoto and Beyond (http://www.wbgu.de/wbgu_home_engl.html).

GCOS, Global Climate Observation System, 2003, The 2nd Report on the Adequacy of Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC, report n.º GCOS-82.

Gregory, J.M., P. Huybrechts and S.C.B. Raper, 2004, Threatened Loss of the Greenland Ice-Sheet, *Nature* 428: 616.

Hansen, J., A. Lacis, R. Ruedy and M. Sato, 1992, Potential Climate Impact of Mount Pinatubo Eruption, *Geophysical Research Letters* 19: 215.

Harremöes, P., D. Gee, M. MacGarvin, A. Stirling, J. Keyes, B. Wynne and S.G. Vaz (eds), 2002, The Precautionary Principle in the 20th Century, Earthscan, London.

Harvey, L. D. Danny, 2000, Global Warming, The Hard Science, Prentice Hall.

Hasselmann, K., M. Latif, G. Hoos, C. Azar, O. Edenhofer, C.C. Jaeger, O.M. Johannessen, C. Kemfert, M. Welp and A. Wokam, 2003, The Challenge of Long-Term Climate Change, *Science* 303: 1923-1925.

Henderson-Sellers, A. *et al.*, 1993, Tropical Deforestation: Modelling Local to Regional Scale Climate Change, *J. Geophysical Research* 98: 7289-7315.

Houghton, J., 1997, Global Warming: the Complete Briefing, Cambridge University Press.

Hoyt, D.V. and K.H. Schatten, 1997, The Role of the Sun in Climate Change, Oxford University Press.

Huber, B. T., K. G. Macleod and S. L. Wing (eds), Warm Climates in Earth History, Cambridge University Press, 2000.

IA, Instituto do Ambiente, 2005, Comunicação à UE dos dados das emissões de GEE de Portugal relativos a 2003.

ICCT, The International Climate Change Taskforce, 2005; Recommendations of the ICCT, January 2005 (http://www.ippr.org/).

ICN, Terceira Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, 2003, Instituto do Ambiente, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.

IEA, International Energy Agency, World Energy Outlook, 2002.

IEA, International Energy Agency, World Energy Outlook, 2004.

IPCC, 1996a, Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the IPCC, J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callender, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell (eds), Cambridge University Press.

IPCC, 1996b, Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press.

IPCC, 2003, Synthesis of the Third Assessment Report of Working Groups I, II and III, R. T. Watson (eds), IPCC.

IPCC. 2001a, Third Assessment Report of the Working Group I: The Science of Climate Change, J. T. Houghton *et al.* (eds), Cambridge University Press.

IPCC. 2001b, Third Assessment Report of the Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability, J. J. McCarthy *et al.* (eds), Cambridge University Press.

IPCC, 2001c, Third Assessment Report of the Working Group III: Mitigation, B. Metz *et al.* (eds), Cambridge University Press.

Jain, A. K., 2000, The Web Interface of Integrated Science Assessment Model (ISAM), (http://Frodo.atmos.uiuc.edu/isam).

Joos, F., M. Bruno, R. Fink, U. Siegenthaler, T. F. Stocker and C. Le Quéré, 1996, An Efficient and Accurate Representation of Complex Oceanic and Biospheric Models of Anthropogenic Carbon Uptake, *Tellus Series* B, 48; 397-417.

Kerr, R. A., 2005, Ocean Warming Model Again Points to a Human Touch, *Science*, 307; 1190.

Kovats, R. S., B. Menne, M.J. Ahern and J.A. Patz, 2003, in Climate Change and Human Health, A.J. McMichael *et al.* (eds), World Health Organization, Geneva.

Lambeck, K. and J. Chappel, 2001, Sea Level Change Through the Last Glacial Cycle, *Science* 292, 679-686.

Lean, J., C.B. Bunton, C.A. Nobre and P.R. Rowntree, 1996, The Simulated Impact of Amazonian Deforestation on Climate Using Measured ABRACOS Vegetation Characteristics, in Amazonian Deforestation and Climate, J.H.C. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and R.L. Victoria (eds), John Wiley, U.K.

Leonard, T. and J.S.J. Hsu, 1999, Bayesian Methods, Cambridge University Press.

Liebsch, G., K. Novotny and R. Dietrich, 2002, Untersuchung von Pegelreihen Zur Bestimmung der Änderung des Mittleren Meeresspiegels an den Europäischen Küsten, Technische Universität Dresden, Deutschland.

Meyer, A., 2000. Contraction and Convergence – The Global Solution to Climate Change – Schumacher Briefing N.º 5, Green Books, Bristol.

Michaelowa, A., S. Butzengeiger and M. Young, 2003, Graduation and Deepening – An Ambitious Post-2012 Climate Policy Scenario, Hamburg Institute in International Economics, Hamburg.

Munich, 2000, Topics-Annual Review of Natural Disasters 1999, Munich Reinsurance Group, Munich, Germany.

Nakicenovic, N. *et al.*, 2000, Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge.

NASC SCC, National Academy of Sciences Committee on the Science of Climate Change, Climate Change Science: An Analysis of some Key Questions, 2001, National Academy Press, Washington, DC.

OECC, Oficina Española de Cambio Climático, 2005, Principales Conclusiones de la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático, Ministério de Medio Ambiente, Madrid (http://www.mma.es/oecc).

Oerlemans, J., 2005, Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records, *Science* 308: 675-677.

Oreskes, N, 2004, The Scientific Consensus on Climate Change, *Science* 306: 1686.

Palmer, T., 2005, Global Warming in a Nonlinear Climate – Can we be Sure? *Europhysics News*, European Physical Society, March/April, 42-46.

Parry, M. and T. Carter, 1998, Climate Impact and Adaptation Assessment, Earthscan, London.

Pershing, J. and F. Tudela, 2003, A Long Term Target – Framing the Climate Effort, in Beyond Kyoto – Advancing the International Effort Against Climate Change, Pew Center on Climate Change, Arlington, USA.

Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Benders, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delayque, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman and M. Stievenard, 1999, Climate and Atmospheric History of the Past 420 000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica, *Nature* 399, 429-436.

RCM, Resolução do Conselho de Ministros n.º 119/2004.

SIAM, Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures – SIAM Project, 2002, F.D. Santos, K. Forbes and R. Moita (eds), Gradiva, Lisboa, (http://www.siam.fc.ul.pt).

Smith, I.N., W.F. Budd and P. Reid, 1998, Model Estimates of Antarctic Accumulations Rates and Their Relationship to Temperature Changes, *Annals of Glaciology* 27: 246-250.

Stainforth, D.A., T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D.J. Frame, J.A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J.M. Murphy, C.Plani, D. Sexton, L.A. Smith, R.A. Spicer, A.J. Thorpe and M.R. Allen, 2005, Uncertainty in Predictions of the Climate Response to Rising Levels of Greenhouse Gases, *Nature* 433: 403-406.

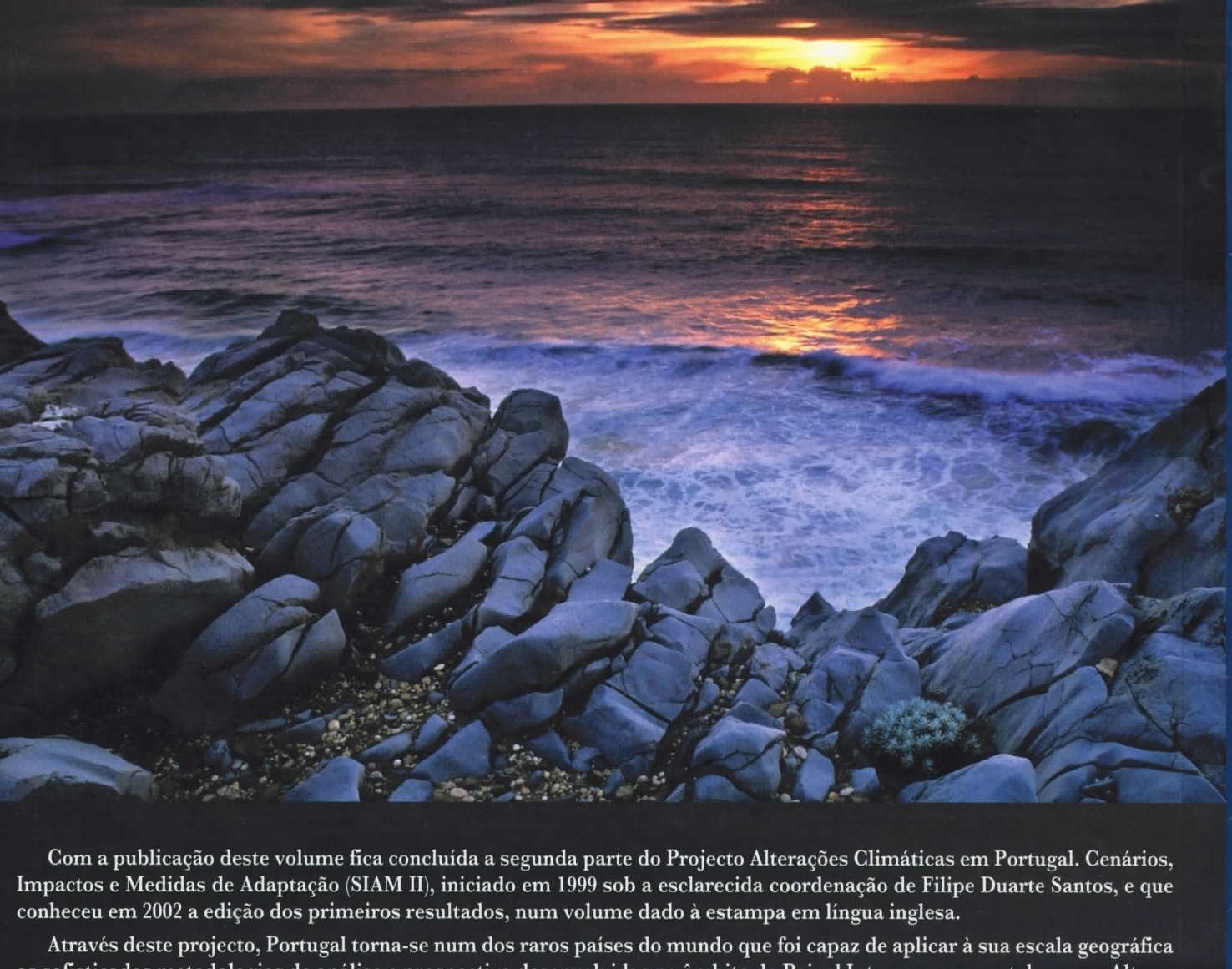
Stott, P.A., S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell and G.J. Jenkins, 2000, External Control of Twentieth Century Temperature Variations by Natural and Anthropogenic Forcings, *Science* 290; 2133–2137.

TCN, Terceira Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas, 2003, Instituto do Ambiente, Ministério das Cidades, Ordenamento do Território e Ambiente.

Tol, R.S.J and A.F. de Vos, 1998, A Bayesian Statistical Analysis of the Enhanced Greenhouse Effect, *Climate Change* 38: 87-112.

Wigley, T. M. L., R. Richels and J. A. Edmonds, 1996, Economic and Environmental Choices in the Stabilization of CO_2 Concentrations: Choosing the «Right» Emissions Pathway, *Nature* 379: 240-243.

Yohe, G., N. Andronova and M. Schlesinger, 2004, To Hedge or Not Against an Uncertain Climate Future, *Science* 306: 416-417.



Com a publicação deste volume fica concluída a segunda parte do Projecto Alterações Climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação (SIAM II), iniciado em 1999 sob a esclarecida coordenação de Filipe Duarte Santos, e que conheceu em 2002 a edição dos primeiros resultados, num volume dado à estampa em língua inglesa.

Através deste projecto, Portugal torna-se num dos raros países do mundo que foi capaz de aplicar à sua escala geográfica as sofisticadas metodologias de análise e prospectiva desenvolvidas no âmbito do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), e que conduziram aos importantes relatórios apresentados por esta rede planetária em 1995 e 2001.

Neste estudo projectam-se diferentes cenários de alterações climáticas em Portugal, envolvendo domínios tão diversos como o dos recursos hídricos, zonas costeiras, agricultura, saúde humana, energia, biodiversidade, pescas, não esquecendo as regiões atlânticas da Madeira e Açores, ou estudos de caso como o do estuário do Sado.

Este volume consagra ao mesmo tempo um gesto cientificamente pioneiro e uma interpelação radical tanto à consciência dos actores sociais, como à responsabilidade dos agentes e instituições públicos. A mensagem é forte e clara: nas próximas décadas Portugal vai sofrer as consequências do mais rápido e arriscado processo de mudança climática global em que a humanidade se viu envolvida ao longo da sua história, pelo menos nos últimos dez mil anos.

O tempo escasseia para encontrarmos e implementarmos as medidas de mitigação e adaptação que permitam ao país atravessar esta longa crise sem fracturas sociais e clivagens regionais insustentáveis. Precisamos de inovação nos nossos sistemas económicos, nos nossos hábitos de consumo, nas nossas opções de investimento público e privado. Precisamos de um espírito ousado e pioneiro no desenho de novas políticas públicas à altura deste desafio de grandiosa dimensão.

Eis as tarefas em aberto que o Projecto SIAM ajuda a identificar para o futuro sustentável de Portugal.

Viriato Soromenho-Marques
Vice-Presidente da Rede Europeia de Conselhos do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (EEAC)

ISBN 989-616-081-3
9 789896 160814

FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN
PROGRAM AMBIENTE
Co-financiado pela União Europeia - FEDER
Instituto do Ambiente
MINISTÉRIO DAS CIDADES, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E AMBIENTE
bp
75 anos de Portugal
A GARANTIR O PROGRESSO COM INOVAÇÃO

2 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS EM PORTUGAL