

Foi o físico francês Joseph Fourier quem primeiro colocou a questão de saber os factores que determinam a temperatura média global da atmosfera à superfície e como calcular o seu valor:

Fourier em 1827 viu-se forçado a admitir a existência na atmosfera de um mecanismo de aumento de temperatura semelhante ao observado numa estufa uma vez que obteve, através dos seus cálculos de balanço radiativo, uma temperatura da atmosfera muito inferior à da fusão da água.

A FÍSICA DAS AL CLIMÁTICAS

Sabemos hoje que o clima da terra, desde a sua formação há mais de 4 000 milhões de anos, tem variado de modo significativo, frequentemente de forma cíclica com períodos que vão desde as dezenas de milhões de anos até aos milhares de anos.

A reconstrução dos climas passados e a identificação das causas das variações climáticas resultou de um longo processo de investigação iniciado na primeira metade do século XIX no qual tiveram um papel de relevo a física, a química e a geologia. Foi o físico francês Joseph Fourier quem primeiro colocou a questão de saber os factores que determinam a temperatura média global da atmosfera à superfície e como calcular o seu valor. Fourier concluiu correctamente que a superfície da Terra emite radiação infravermelha cujo fluxo total de energia deve igualar o fluxo de energia da radiação solar absorvida pela Terra. Porém, ao obter nos seus cálculos de balanço radiativo uma temperatura da atmosfera muito inferior à da fusão da água viu-se forçado a admitir a existência na atmosfera de um mecanismo de aumento de temperatura semelhante ao observado numa estufa (Fourier, 1827). A atmosfera deveria ser capaz de interceptar parte da radiação infravermelha emitida pela superfície evitando a sua total propagação para o espaço exterior.

FILIPE DUARTE SANTOS

Departamento de Física

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Edifício C8, Campo Grande

1749-016 Lisboa

fdsantos@oal.ul.pt

TERAÇÕES

A explicação cabal do que realmente se passa foi dada pela primeira vez pelo cientista John Tyndall que resolveu primeiro medir no seu laboratório a capacidade de absorção da radiação infravermelha de alguns dos gases que constituem a atmosfera: azoto, oxigénio e os componentes minoritários dióxido de carbono (CO_2) e gás metano (CH_4). Chegou à conclusão (Tyndall, 1863) que tanto o vapor de água como o CO_2 e o CH_4 são opacos à radiação infravermelha, isto é, absorvem-na, pelo que têm a designação actual de gases com efeito de estufa (GEE). A discrepância encontrada por Fourier estava explicada: a presença de GEE na atmosfera gera um efeito de estufa natural responsável pela actual temperatura média global de 15°C em lugar de uma temperatura de cerca de -18°C , que resultaria da sua ausência. O interesse de Tyndall por este assunto não era apenas académico: ele estava interessado em resolver uma questão de grande interesse, geradora de controvérsia na época e que consistia em conhecer a causa da última época glacial, cujos registos na paisagem, identificados pelos geólogos, eram inequívocos. Qual a razão do arrefecimento da atmosfera que provocou o espectacular avanço até às latitudes da Europa central e dos Estados Unidos dos gelos permanentes das actuais regiões polares? Tyndall não conseguiu dar uma resposta convincente,

mas a influência da concentração atmosférica dos GEE na temperatura continuou a interessar os cientistas dos finais do século XIX.

Foi o químico sueco Svante Arrhenius quem fez, pela primeira vez, estimativas do efeito da variação da concentração do CO_2 sobre a temperatura média global da atmosfera, tendo chegado à conclusão que a sua duplicação provocaria um aumento de temperatura entre 5 e 6°C (Arrhenius, 1896). Arrhenius reconheceu que as emissões de CO_2 resultantes das actividades industriais iriam inevitavelmente provocar um aumento da concentração atmosférica desse gás. Porém, não estava minimamente preocupado com as consequências desta interferência antropogénica sobre o sistema climático. Pelo contrário, no seu livro *Worlds in the Making* (Arrhenius, 1908) afirma que o aumento da concentração de CO_2 irá providenciar um melhor clima para a humanidade no futuro, “especialmente nas partes mais frias da Terra”.

EXISTIRÁ UMA INTERFERÊNCIA ANTROPOGÉNICA SOBRE O CLIMA?

A possibilidade de uma relação entre as actividades humanas e o clima manteve-se afastada dos interesses dos cientistas até 1938 quando o engenheiro Guy Stewart Callendar, especialista nas tecnologias do vapor e da combustão e climatologista amador, teve a audácia de apresentar uma comunicação na Royal Meteorological Society de Londres (Callendar, 1938), onde afirmou que o aumento da temperatura média global observado desde o início do século XX era resultante das emissões de CO_2 para a atmosfera provocadas pela combustão dos combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural. As suas conclusões baseavam-se na análise de séries de temperatura obtidas em mais de 200 estações meteorológicas espalhadas pelo mundo e em observações do recuo dos glaciares das montanhas. O artigo de Callendar foi recebido com grande cepticismo e praticamente esquecido. Questionava-se a argumentação de que o aumento da concentração atmosférica de CO_2 provocasse um aumento da absorção da radiação infravermelha porque se tinham efectuado medições demonstrando que as bandas de absorção do espectro do CO_2 ficavam saturadas com concentrações muito baixas.

O problema só ficou esclarecido depois da Segunda Grande Guerra como consequência indirecta dos grandes investimentos feitos pelos Estados Unidos da América em investigação científica nos mais variados domínios, incluindo as ciências da atmosfera. Gilbert Plass, um físico teórico doutorado na Universidade de Princeton, fez na década de 1950 estudos e cálculos sobre radiação infravermelha para um grupo experimental da Universidade de Johns Hopkins e, nos tempos livres, interessou-se pela

hipótese avançada nessa época de uma relação causal entre os períodos glaciares e as variações cíclicas da concentração de CO_2 atmosférico. Dedicou-se então ao estudo do modo como o CO_2 absorve a radiação infravermelha nos vários níveis da atmosfera e concluiu que o aumento da sua concentração provoca efectivamente um aumento da temperatura. A explicação deste fenómeno encontra-se no perfil da temperatura na baixa atmosfera ou troposfera. Quando se aumenta a concentração de CO_2 , a radiação infravermelha que emite passa a ter origem, em média, a uma maior altitude na troposfera na qual a temperatura é mais baixa. Porém, se a temperatura é mais baixa, de acordo com as leis da teoria da radiação, a quantidade total da radiação infravermelha emitida é menor, pelo que se cria um desequilíbrio entre o fluxo radiativo solar absorvido pela Terra e o fluxo radiativo emitido pela Terra no infravermelho. O equilíbrio radiativo é repostado mediante um aumento de temperatura da troposfera.

Num artigo publicado em 1956 Plass concluía que as emissões antropogénicas de CO_2 iriam provocar um aumento da temperatura média global de $1,1^\circ\text{C}$ por século (Plass, 1956). Esta conclusão, quando foi publicada, não tinha ainda suporte nas observações. A questão importante era pois saber se a concentração do CO_2 atmosférico estaria realmente a aumentar tal como Callendar e Plass suspeitavam. Muitos cientistas nessa época consideravam que o CO_2 emitido para a atmosfera na combustão dos combustíveis fósseis dissolvia-se nos oceanos totalmente ou, pelo menos, em grande parte, pelo que não haveria um aumento da sua concentração atmosférica. O caminho para desvendar esta questão foi aberto pelo químico Hans Suess que se especializou em datações por meio do isótopo radioactivo carbono-14 (^{14}C). O ^{14}C é continuamente produzido na atmosfera por meio da reacção $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ provocada pela colisão de neutrões (produzidos nas colisões dos raios cósmicos com os constituintes da atmosfera) com núcleos de azoto-14 (^{14}N). O seu tempo de meia-vida é de 5730 anos pelo que o carbono do CO_2 proveniente da combustão dos combustíveis fósseis não contém praticamente ^{14}C . Suess começou por provar que a atmosfera contém carbono antigo, isto é, com uma percentagem relativamente baixa de ^{14}C , proveniente, muito provavelmente, dos combustíveis fósseis. Em 1957 ele e o oceanógrafo Roger Revelle publicaram um artigo (Revelle and Suess, 1957) em que mediram a taxa de dissolução do CO_2 atmosférico nos oceanos por meio do ^{14}C e concluíram que a acumulação do CO_2 antropogénico na atmosfera “se poderá tornar significativa nas décadas futuras se continuar o aumento exponencial da combustão industrial dos combustíveis fósseis”. Ficou célebre a frase que escreveram: “Os seres humanos estão a realizar uma experiência de geofísica em larga escala de um tipo que não poderia ter acontecido no passado nem vir a dar-se no futuro”. É curioso e revelador que os trabalhos de Arrhenius, Callen-

dar, Plass, Revelle e Suess, fundamentais para o estabelecimento da base científica da interpretação do aquecimento global, resultaram de uma curiosidade e interesses científicos colaterais em relação às actividades dominantes das suas carreiras profissionais.

O ANO GEOFÍSICO INTERNACIONAL DE 1957 – 1958, AS MEDIÇÕES DA CONCENTRAÇÃO DO CO_2 ATMOSFÉRICO E OS PRIMEIROS MODELOS CLIMÁTICOS

A dinâmica do desenvolvimento da ciência e dos grandes investimentos em investigação que se gerou no pós-guerra beneficiou várias áreas científicas, em particular a geofísica, a geoquímica e, de um modo geral, as ciências da terra e do espaço. Começou a tornar-se evidente que o estudo dos sistemas terrestres era necessariamente transversal em relação às disciplinas clássicas da física, química, geologia e biologia e requeria um forte esforço de cooperação interdisciplinar baseado em definições e metodologias bem estabelecidas e consensuais. O estudo do sistema climático formado por vários subsistemas que interactuam entre si – atmosfera, hidrosfera, criosfera, biosfera e litosfera – é claramente multidisciplinar e incompatível com uma cultura rígida de fragmentação das ciências. Motivados por estas preocupações um grupo de cientistas propôs a criação do Ano Geofísico Internacional (AGI) de 1957-1958. A proposta teve acolhimento favorável por parte dos EUA, da União Soviética e dos respectivos aliados que o consideravam como uma boa oportunidade para fomentar a cooperação internacional, especialmente na recolha de dados geofísicos à escala global, e também para ganhar vantagens no contexto da guerra fria entre os dois blocos.

As alterações climáticas tinham uma prioridade muito baixa na lista de actividades do AGI. Contudo Revelle e Suess conseguiram obter as verbas necessárias para efectuar medições de alta precisão da concentração atmosférica de CO_2 em vários pontos do globo. O cientista escolhido para realizar este programa foi o químico Charles Keeling que tinha já construído instrumentos que lhe permitiam medir a concentração de CO_2 e observar a sua oscilação diurna, enquanto estudante de doutoramento no California Institute of Technology. Com financiamentos do AGI, Keeling construiu dois instrumentos que foram colocados em regiões remotas – no topo da montanha vulcânica de Mauna Loa, no Hawaii e na Antárctica – sem fontes próximas de emissões de CO_2 , para poder medir a concentração média global da atmosfera. Dois anos de medições na Antárctica, realizadas com imenso engenho para evitar possíveis contaminações e erros sistemáticos, foram suficientes para Keeling concluir que a concentração atmosférica do CO_2 estava a aumentar e que esse aumento era compatível com a hipótese de que apenas parte das emis-

sões antropogénicas estavam a ser dissolvidas nos oceanos (Keeling, 1960). As medições de Keeling em Mauna Loa confirmaram os resultados obtidos na Antárctica e passaram a constituir uma prova reconhecida e amplamente

citada nos meios científicos da interferência antropogénica sobre o sistema climático.

A década de 1960 teve grande importância na história do conhecimento do sistema climático da Terra e da simulação do seu comportamento por meio de modelos. A teoria astronómica dos ciclos de glaciação durante o Plistocénico, proposta pelo matemático Milutin Milankovitch que se dedicou às relações entre a astronomia e a geofísica, começou a ter uma aceitação científica generalizada nos meios científicos da época (Broecker, 1968; 1968a). Segundo Milankovitch (Milankovitch, 1930) a alternância entre períodos glaciares e interglaciares tem a sua origem em oscilações na distribuição sazonal da radiação solar recebida nas latitudes elevadas, provocadas por pequenas variações nos parâmetros orbitais da Terra, designadamente a excentricidade da órbita, a inclinação do eixo de rotação e o movimento de precessão deste eixo. Actualmente estamos num período interglaciar relativamente longo (Berger *et al.*, 2002).

Foi também na década de 1960 que Edward Lorenz, matemático que se tornou professor de meteorologia no Massachusetts Institute of Technology, iniciou um projecto de simulação de fenómenos meteorológicos e de previsão do tempo com computadores. Acidentalmente verificou que ao mudar apenas na quarta casa decimal os dados numéricos de iniciação de uma simulação de padrões de circulação geral da atmosfera o resultado, passado alguns meses, tornava-se completamente distinto do anterior. A pequeníssima variação nos dados iniciais era de tal modo amplificada nos milhares de operações aritméticas geradas pelo modelo que acabava por conduzir a um resultado completamente diferente. Este tipo de fenómeno de extrema sensibilidade aos valores das condições iniciais ficou conhecido por “efeito borboleta”. Lorenz concluiu que a atmosfera apresenta comportamentos característicos de um sistema caótico, isto é, de um sistema com uma dinâmica interna na qual pequeníssimas diferenças entre estados iniciais produzem enormes diferenças nos respectivos estados finais (Lorenz, 1963, 1967). Apesar da sua aperiocidade e irregularidade intrínsecas as variáveis meteorológicas mantêm valores médios globais sazonais e anuais relativamente estáveis ao longo dos anos. Embora não seja possível fazer previsões fiáveis do estado instantâneo futuro da atmosfera para além de um determinado intervalo de tempo que, actualmente, com os computadores de que dispomos, é da ordem de 7 a 10 dias, é viável fazer projecções do clima futuro, dado que este é definido pela descrição estatística, em termos da média e da variabilidade, das variáveis meteorológicas que caracterizam o estado da atmosfera.

Entretanto os esforços iniciados por John von Neumann e depois por Joseph Smagorinsky, no United States Weather Bureau, em Washington, para construir um modelo numérico que simulasse a circulação geral da atmosfera começa-

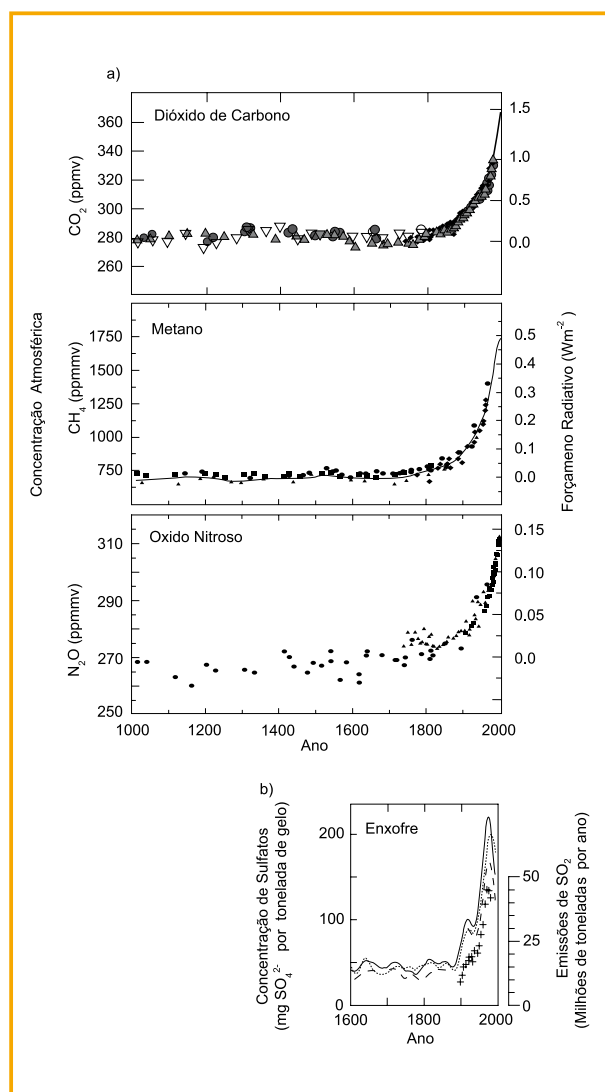


Fig. 1 - Evolução das concentrações de vários componentes da atmosfera (IPCC, 2001). (a) Concentrações de três dos principais gases com efeito de estufa (GEE), com emissões antropogénicas - CO₂, CH₄ e N₂O – nos últimos 1000 anos. Dados obtidos a partir de furos nos gelos da Antárctica e Gronelândia e de observações directas nas últimas décadas (indicada por uma linha no caso do CO₂). No gráfico relativo ao CH₄ a curva representa a média global. O forçamento radiativo provocado pela presença destes gases na atmosfera está representado à direita. No caso do CH₄ e N₂O a concentração está representada em partes por milhão de milhão em volume (ppmv). (b) Concentrações de sulfatos obtidas a partir de furos nos gelos da Gronelândia em três locais (curvas) e emissões totais de SO₂ na Europa e nos Estados Unidos da América (indicadas com +).

ram a dar resultados. Em 1965 J. Smagorinski, S. Manabe e J. L. Holloway (Smagorinski *et al.*, 1965) tinham construído um modelo tridimensional com nove níveis verticais no qual se resolvia o sistema de equações fundamentais que determinam a evolução do estado da atmosfera, constituído, designadamente, pelas equações de conservação de energia, de conservação do momento linear, de conservação da massa, ou seja, a equação da continuidade e a equação dos gases perfeitos, como aproximação para a equação de estado da atmosfera. Trata-se pois de um sistema não-linear de equações diferenciais às derivadas parciais cuja resolução só é possível por meio de métodos numéricos de aproximação.

Em 1970 o grupo de Manabe utilizou o seu modelo para determinar o comportamento da atmosfera perante um aumento da concentração de CO₂ (Manabe, 1970). O seu objectivo era calcular aquilo que se passou a designar por sensibilidade climática e que consiste no aumento da temperatura média global da troposfera resultante do seu ajustamento a uma concentração de CO₂ dupla do valor pré-industrial de 280 ppmv (partes por milhão em volume). Manabe obteve um valor próximo dos 2 °C que está em excelente acordo com o intervalo de valores obtidos actualmente com modelos de circulação geral da atmosfera, conhecidos pelo acrónimo GCM (*General Circulation Models*), muito mais sofisticados e realistas.

Durante a década de 1970 intensificaram-se os esforços no sentido de melhorar a fiabilidade dos GCM tornando-os mais realistas. Uma questão importante, ainda hoje longe de estar inteiramente resolvida, é a simulação da presença e do efeito das nuvens. A formação das nuvens resulta de um processo de nucleação por deposição de uma película de água sobre a superfície de núcleos de condensação quando a humidade relativa atinge valores próximos dos 100%. Consequentemente, a nebulosidade depende da presença na atmosfera de aerossóis naturais ou provenientes das actividades humanas que servem de núcleos de condensação. Para além deste efeito indirecto, os aerossóis influenciam também directamente o clima ao modificarem os fluxos radiativos na troposfera por reflexão ou absorção da radiação solar. A questão da influência dos aerossóis antropogénicos sobre o clima foi levantada inicialmente na década de 1960 por Reid Bryson, professor de meteorologia da Universidade de Wisconsin em Madison e fundador do Institute for Environmental Studies da mesma Universidade. Bryson chamou a atenção para o forçamento radiativo negativo provocado pelos aerossóis de sulfatos, produzidos na queima do carvão em centrais térmicas, pelos aerossóis produzidos na queima de biomassa, especialmente nas queimadas das regiões tropicais e pelas poeiras resultantes das actividades agrícolas (Bryson and Wendland, 1970). Vários cientistas nessa época salientaram que o clima dos últimos cerca de 10 000 anos tinha sido particularmente estável. Contudo, a transição para uma

nova época glacial era inevitável e a interferência humana sobre o sistema climático podia acelerar ou atrasar essa transição.

Para além das emissões de CO₂ provenientes da combustão do carvão, petróleo e gás natural as actividades humanas também interferem sobre o ciclo do carbono por meio de emissões de CO₂ resultantes das alterações no uso dos solos, especialmente a desflorestação nas regiões tropicais. Um dos primeiros cientistas que procurou fazer uma estimativa quantitativa deste efeito foi o botânico George Woodwell (Woodwell and Houghton, 1997). A sua principal mensagem era a de que a desflorestação, na escala a que estava a ser praticada, era muito perigosa e deveria ser travada porque, para além da destruição de ecossistemas úteis e da perda de biodiversidade, ela contribuía de forma significativa para agravar o problema do aumento da concentração atmosférica do CO₂.

Entretanto, paralelamente, prosseguiram os estudos paleoclimáticos muito importantes para procurar compreender o funcionamento do sistema climático e as interacções entre as suas várias componentes. Em 1954 o físico Willi Dansgaard demonstrou que o valor da razão isotópica ¹⁸O/¹⁶O na água da precipitação estava relacionado com a temperatura da atmosfera onde ocorre (Dansgaard, 1954). Na água em estado líquido, em particular nos oceanos, a evaporação das moléculas de água contendo o isótopo de oxigénio de menor massa é ligeiramente mais provável pelo que a razão isotópica é distinta no vapor de água e na água em estado líquido. O valor desta separação isotópica, que também se dá no processo inverso, condensação, depende da temperatura à qual se dá a evaporação ou a condensação. As medições precisas das razões isotópicas de ¹⁸O/¹⁶O e de ²H/¹H na água das sucessivas camadas anuais de gelo depositadas nas calotes polares e nas grandes massas de gelo das montanhas mais elevadas constituem um indicador da temperatura média do ano em que se deram e consequentemente do clima e da sua variação.

Estudos efectuados numa perfuração dos gelos da Gronelândia revelaram, com grande surpresa dos climatologistas, que o clima pode ter variações relativamente abruptas que, nessas regiões, se traduzem por variações da temperatura da ordem de 5 °C em poucas dezenas de anos. Um dos exemplos mais bem estudado e conhecido destas variações abruptas é a última oscilação climática anterior ao período interglacial em que nos encontramos, chamado Younger Dryas, nome derivado da planta selvagem *Dryas octopetala* cuja área de presença se alargou durante esse período (Dansgaard *et al.*, 1989). A causa desta alteração climática abrupta e de muitas outras que se deram durante os períodos glaciares está relacionada com a interacção entre a atmosfera e as correntes oceânicas. O Younger Dryas resultou muito provavelmente da interrupção e posterior reposição da corrente termohalina no Atlântico Norte.

Esta corrente, alimentada por um dos braços da Corrente do Golfo, traz águas quentes e salinas até às latitudes elevadas do Atlântico onde, por meio de trocas de calor com a atmosfera, arrefecem e ao tornarem-se mais densas afundam-se circulando em profundidade para Sul. A sua interrupção pode resultar de um afluxo anormal de água doce e provoca um arrefecimento nas latitudes elevadas do Atlântico e dos continentes da América e Europa podendo originar um período relativamente frio. As alterações climáticas abruptas são mais difíceis de simular e de prever por resultarem de processos não-lineares em situações instáveis, embora os seus efeitos possam ser mais graves para o homem.

A INSTITUCIONALIZAÇÃO DA PROBLEMÁTICA DAS ALTERAÇÕES ANTROPOGÉNICAS DO CLIMA

No final da década de 1970 a comunidade científica e os governos de alguns países mais desenvolvidos reconheceram a necessidade de intensificar o desenvolvimento da investigação sobre o clima no quadro de programas internacionais. Após a Conferência Mundial do Clima realizada em Genebra no ano de 1979 o International Council of Scientific Unions (ICSU) e a Organização Meteorológica Mundial (WMO) lançaram o World Climate Research Program (WCRP). As preocupações sobre as consequências do aumento da concentração atmosférica dos GEE tornaram-se mais generalizadas no seio das organizações das Nações Unidas e em 1985, por iniciativa da ICSU, WMO e do Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP), realizou-se em Villach, na Áustria, a “International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts” (WMO, 1986). A conferência e os documentos científicos que a sustentaram foram preparados por um conjunto de cientistas empenhados entre os quais se destacou Bert Bolin, professor de meteorologia na Universidade de Estocolmo de 1961 a 1990. Com ela deu-se um ponto de viragem na percepção governamental e pública da problemática do aquecimento global. Como é natural e previsível, os cientistas presentes insistiram fortemente na necessidade de intensificar o esforço de investigação embora adoptando uma posição moderadamente activista sobre a gravidade do problema face aos conhecimentos já adquiridos e à necessidade de lhe dar respostas adequadas.

Nos anos seguintes a questão do aquecimento global tornou-se um tópico frequente nos meios de comunicação social e passou a integrar a agenda das preocupações dos movimentos ambientalistas. Uma das razões que contribuiu para um interesse crescente foram as ondas de calor e secas que se verificaram em vários pontos do globo e em particular nos E.U.A. no ano de 1988 e que alguns cientistas, entre os quais James Hansen, associaram e divul-

garam como sendo provavelmente uma consequência do aquecimento global. Contudo, a nível mundial, o número de cientistas que se dedicavam integralmente a esta problemática era apenas da ordem das poucas dezenas e estavam dispersos em várias áreas da ciência. Era necessário focar as investigações e promover a cooperação interdisciplinar para poder responder às questões que se colocavam no caminho para a negociação e regulamentação política internacional de controlo da interferência humana sobre o clima. Incentivados por estas preocupações a WMO e a UNEP criaram em 1988 o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) com o objectivo de promover uma avaliação científica, técnica e sócio-económica da problemática das alterações climáticas numa base objectiva, integrada e transparente.

O IPCC distingue-se de outros painéis científicos e técnicos pelo facto de integrar representantes dos governos dos países membros das Nações Unidas para além de cientistas e tecnólogos de reconhecida competência. Em nenhum outro tipo de avaliação científica se reúne um tão grande número de cientistas provenientes dos mais variados países e com formações profissionais tão diversificadas, mas com o objectivo comum de analisar a problemática do clima e das suas alterações. Sob a direcção esclarecida e judiciosa de Bert Bolin, o IPCC produziu o seu primeiro relatório em 1990 (IPCC, 1990) que porém teve um impacto muito limitado nos centros de decisão política.

No início da década de 1990 intensificou-se o debate sobre a credibilidade dos cenários climáticos futuros para servirem de base justificativa da implementação de medidas de mitigação, ou seja, de redução das emissões de GEE. Vários relatórios do conservador George C. Marshall Institute salientaram as incertezas associadas às projecções do clima futuro e as imperfeições dos modelos climáticos em que se baseiam. Algumas destas publicações tiveram o apoio do físico da matéria condensada Frederick Seitz antigo presidente da National Academy of Sciences dos E.U.A. e de vários meteorologistas entre eles Richard Lindzen do M.I.T.. A maior parte das críticas apareceram em publicações financiadas por grandes grupos industriais, por fundações conotadas com os meios políticos conservadores e em jornais do sector económico e financeiro como o *Wall Street Journal*. Temia-se sobretudo o grande impacto negativo que eventuais medidas de mitigação teriam na economia americana. Algumas instituições nos E.U.A. advogavam medidas de redução das emissões tais como o Department of Energy, o Environmental Protection Agency e o Department of State, este sob pressão da União Europeia, mas as administrações dos Presidentes Ronald Reagan e George H.W. Bush preferiram enfatizar as muitas incertezas associadas à questão do aquecimento global. Em 1992 na Cimeira da Terra no Rio de Janeiro foi apresentada a Convenção Quadro das Nações Unidas

para as Alterações Climáticas (CQNUAC) que entrou em vigor em 1994 e que actualmente está ratificada pela quase totalidade dos países do mundo. O seu principal objectivo consiste em evitar uma interferência antropogénica perigosa sobre o sistema climático por meio de medidas de redução das emissões de GEE que estabilizem a concentração atmosférica destes gases. Porém, a CQNUAC não estabelece compromissos quantificados de redução de emissões, nem prazos para os atingir.

Em 1995 o IPCC produziu o seu segundo relatório de avaliação (IPCC, 1995) em que, pela primeira vez se admitia “ser improvável que a tendência de aumento da temperatura média global observada seja de origem natural”, e ainda que “mudanças futuras no sistema climático, inesperadas, grandes e rápidas (tais como as que ocorreram no passado) são possíveis”.

realizada em Quioto, adoptou-se o Protocolo de Quioto 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 Protocolo de Quioto entrou em vigor a 16 de Fevereiro de 2005.

O terceiro relatório de avaliação do IPCC (IPCC, 2001) conclui de forma enfática que a temperatura média global está a aumentar e que “a maior parte do aumento observado nos últimos 50 anos resultou, provavelmente, do aumento da concentração dos gases com efeito de estufa”. Sem medidas efectivas de mitigação o relatório prevê que o aumento da temperatura média global até ao final do século XXI se situará no intervalo entre 1,4 e 5,8 °C. A principal questão que se coloca actualmente é saber qual irá ser o esforço de mitigação no pós-Quioto, ou seja, depois

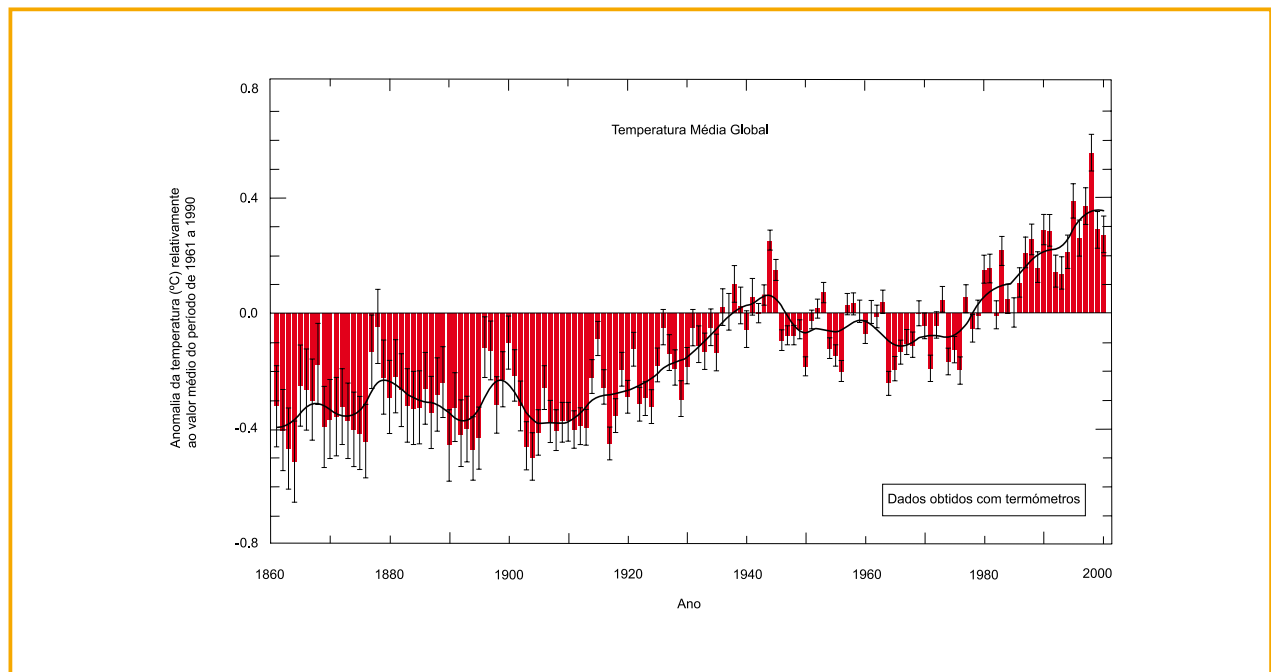


Fig. 2 - Temperatura anual média global da atmosfera à superfície representada em termos da anomalia relativamente ao valor médio do período de 1961 a 1990 (IPCC, 2001). O intervalo de erro está representado por uma barra.

Apesar da grande credibilidade do conjunto de cientistas e do exigente escrutínio exercido pelos representantes governamentais na elaboração do segundo relatório as suas conclusões foram bastante contestadas, sobretudo em alguns meios financeiros e económicos ligados às indústrias do petróleo e do carvão. Contudo, nos artigos sobre alterações climáticas publicados em revistas científicas com sistema de arbitragem a partir de meados da década de 1990 tornou-se consensual que as actividades humanas estão a interferir com o sistema climático (Oreskes, 2004). Em 1997, na Terceira Conferência das Partes da CQNUAC,

de 2012 e qual a sua distribuição pelos países do mundo, dado que as reduções de emissões de GEE acordadas no Protocolo de Quioto são insuficientes para evitar uma interferência antropogénica perigosa sobre o sistema climático.

INCERTEZAS ACTUAIS E CAMINHOS FUTUROS

Qual é o grau de confiança que podemos atribuir aos cenários climáticos futuros? Qual é o grau de incerteza nas projecções do clima futuro e nos impactos sobre os vários

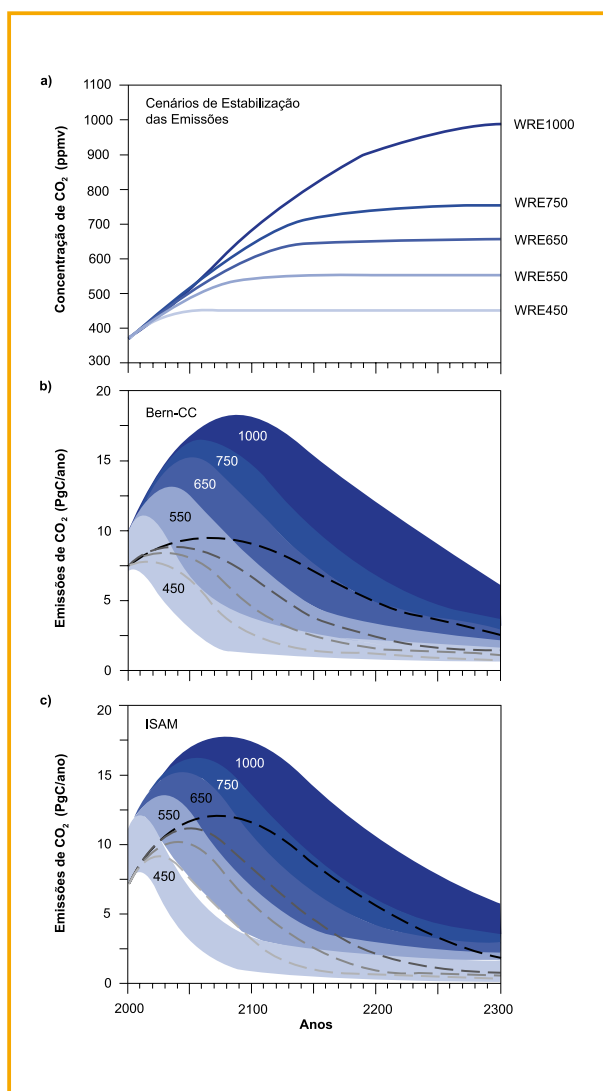


Fig. 3 - Projeções da evolução das emissões antropogénicas de CO_2 conducentes a diferentes níveis de estabilização da concentração atmosférica de CO_2 (IPCC, 2001). A figura a) mostra cenários da evolução da concentração do CO_2 correspondentes a vários valores de estabilização (450, 550, 650, 750 e 1 000 ppmv) obtidas 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 $\text{PgC}=10^{15}\text{g}$ de carbono).

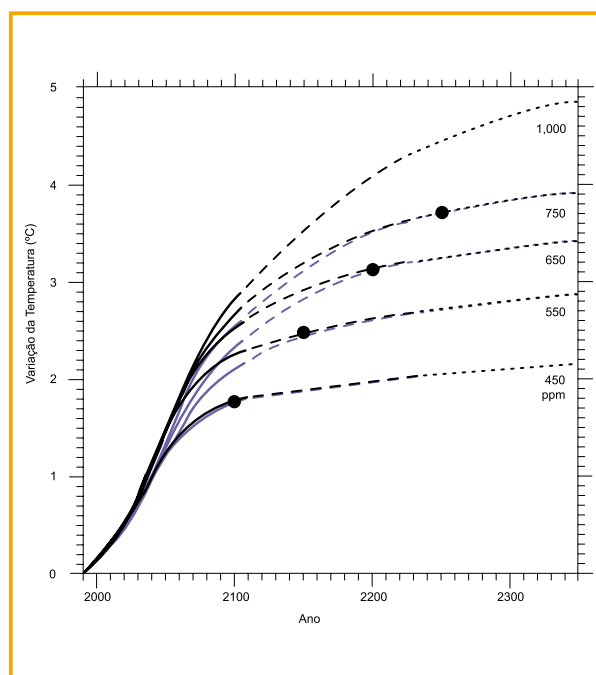


Fig. 4 - Projeções da variação da temperatura média global desde 1990 obtidas quando a concentração atmosférica de CO_2 é estabilizada de acordo com os perfis WRE (Wigley, 1996) da figura 1.8 (IPCC, 2001a). As trajectórias a azul representam cálculos anteriores utilizados no Segundo Relatório de Avaliação 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 a 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 .

sectores sócio-económicos e sistemas biofísicos? Importa desde já salientar que em ciência não existem verdades definitivas e absolutas mas apenas conclusões que têm uma maior ou menor probabilidade de descrever e prever os fenómenos com precisão. No caso de fenómenos físicos em sistemas relativamente simples como, por exemplo, um átomo, uma molécula ou uma amostra de matéria condensada, a probabilidade de as teorias físicas bem estabelecidas que descrevem o seu comportamento nos conduzirem a uma boa aproximação para a descrição e previsão desses fenómenos é muito elevada. A situação é completamente diferente quando pretendemos fazer o estudo dos sistemas profundamente complexos e heterogéneos de grande escala espacial, como é o caso do sistema climático terrestre, que envolvem múltiplos subsistemas – a atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a biosfera e a litosfera. Cada um destes subsistemas intervém no comportamento do sistema climático numa escala de tempo característica.

Por exemplo se pretendermos descrever o sistema climático em intervalos de tempo da ordem de horas a semanas a aproximação de considerarmos apenas o subsistema atmosfera é razoável. Para intervalos de tempo maiores, da ordem de meses e anos, é também necessário incluir os oceanos, para além da atmosfera. Para lá das centenas de anos é necessário recorrer também à criosfera e na escala de tempo dos milhões de anos é necessário incluir a litosfera. Repare-se na dificuldade de obter os dados de base que permitem reconstituir fielmente o comportamento passado dos vários subsistemas do sistema climático. Depois temos as incertezas na descrição e no conhecimento dos processos de natureza física, química, biológica e geológica que intervêm no sistema. Finalmente encontramos as incertezas resultantes das aproximações necessárias para simular o seu comportamento por meio de modelos matemáticos.

Note-se que o termo incerteza pode ser usado com vários significados para descrever situações que vão desde uma confiança próxima de certeza até à especulação. A incerteza pode resultar de problemas relacionados com os dados (por exemplo, dados incompletos ou com erros sistemáticos), com a interpretação desses dados ou com modelos (por exemplo, estrutura errada, parametrizações erróneas ou métodos de aproximação inadequados).

No estudo do clima e dos cenários climáticos futuros há várias fontes de incerteza: conhecimento deficiente do comportamento passado das variáveis que descrevem o clima; conhecimento limitado dos fenómenos físicos, químicos, biológicos e geológicos que se processam no sistema climático; aproximações deficientes para simular o comportamento e as interações das várias componentes do sistema nos modelos climáticos. Há incertezas significativas nas projecções das concentrações atmosféricas futuras de GEE devido a um conhecimento incompleto das fontes e sumidouros destes gases. Não sabemos ainda parametrizar satisfatoriamente fenómenos atmosféricos que se processam em escalas espaciais de dimensão inferior à malha dos modelos computacionais, como por exemplo as nuvens. O nosso conhecimento dos oceanos, da dinâmica das correntes oceânicas e da sua influência sobre o clima é ainda muito incompleto. Finalmente a interacção entre os gelos das calotes polares e as outras componentes do sistema climático, especialmente a atmosfera e os oceanos, é ainda pouco conhecida.

Nos modelos climáticos as principais incertezas são semelhantes às que se encontram nos modelos de previsão numérica do tempo e têm a sua origem na impossibilidade de simular fielmente os fenómenos à escala do quilómetro. As tentativas de parametrizar tais fenómenos por meio de metodologias da mecânica estatística não resolvem inteiramente o problema. Esta dificuldade resulta sobretudo da inexistência actual de capacidade de supercomputação

suficiente para permitir a redução da dimensão horizontal da malha na qual se simula o comportamento do sistema climático, actualmente da ordem de 300 km. Resultados recentes (Murphy *et al.*, 2004; Stainforth *et al.*, 2005) obtidos com GCM permitem concluir que a incerteza no aumento projectado da temperatura média global até ao fim do século XXI é ainda considerável, sobretudo à escala regional. Para diminuir a incerteza será necessário que os modelos adquiram a capacidade de descrever os processos atmosféricos em escalas da ordem de 1 km, como, por exemplo, a distribuição espacial do vapor de água e das nuvens. Os modelos climáticos devem ter também a capacidade de simular de forma realista os subsistemas do sistema climático designadamente a atmosfera, os oceanos, a criosfera e a biosfera, e as suas interações. Para atingir estes objectivos são necessários supercomputadores muito mais rápidos que os actuais, capazes de atingir um ritmo sustentado de cálculo da ordem do petaflop (10^{15} operações de vírgula flutuante por segundo). Actualmente os supercomputadores têm apenas velocidades sustentadas de cálculo da ordem de 10^{12} a 10^{13} flops.

Apesar das incertezas inerentes às actuais projecções do clima futuro, é possível afirmar com segurança que algumas actividades humanas estão a provocar uma interferência antropogénica sobre o sistema climático que produz alterações climáticas e que se pode tornar perigosa. Foram já identificados alguns sinais recentes destas alterações climáticas antropogénicas e é também seguro concluir que elas se irão agravar pelo menos até ao final deste século. Para poder quantificar com menor incerteza as variações projectadas para os vários indicadores do clima, tais como a temperatura média, a distribuição da precipitação ao longo do ano e a frequência dos fenómenos climáticos extremos, é necessário desenvolver a investigação sobre o clima e construir modelos climáticos mais realistas, que incluam os vários subsistemas e descrevam os fenómenos em escalas espaciais mais pequenas do que as dos actuais modelos.

REFERÊNCIAS

- [1] Arrhenius, S., 1896, "On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature", *Philosophical Magazine*, **41**, 237.
- [2] Arrhenius, S., 1908, *Worlds in the Making*, New York: Harper and Brothers.
- [3] Berger A. and M.F. Loutre, 2002, "An exceptionally long interglacial ahead?" *Science*, **297**, 1287.

- [4] Broecker, W.S. *et al.*, 1968a, "Milankovitch hypothesis supported by precise dating of coral reefs and deep-sea sediments", *Science*, **159**, 300.
- [5] Broecker, W.S., 1968, "In defense of the astronomical theory of glaciation", *Meteorological Monographs*, **8**, 139.
- [6] Callendar, G.S., 1938, "The artificial production of carbon dioxide and its influence on climate", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **64**, 223.
- [7] Daansgaard, W., 1954, "The ^{18}O -abundance in fresh water", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **6**, 241.
- [8] Dansgaard, W., J.W.C. White and S.J. Johnsen, 1989, "The abrupt termination of the Younger Dryas climate event", *Nature*, **339**, 532.
- [9] Fourier, Joseph, 1827, "Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires", *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, **7**, 569.
- [10] IPCC, 1990, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Reports prepared for IPCC by Working Groups I, II and III, United Nations Environmental Program and World Meteorological Organization*, Cambridge University Press.
- [11] IPCC, 1995, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Contributions of Working Groups I, II and III to the IPCC Second Assessment Report*, Cambridge University Press.
- [12] IPCC, 2001, Intergovernmental Panel on Climate Change, *Contributions of Working Groups I, II and III to the IPCC Third Assessment Report*, Cambridge University Press.
- [13] Jain, A. K., 2000, The Web Interface of Integrated Science Assessment Model (ISAM), <http://Frodo.atmos.uiuc.edu/isam>.
- [14] Keeling, C.D., 1960, "The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere", *Tellus*, **12**, 200.
- [15] Lorenz, E.N., 1963, "Deterministic nonperiodic flow", *J. Atmospheric Sciences*, **20**, 130.
- [16] Lorenz, E.N., 1968, "Climatic determinism", *Meteorological Monographs*, **8**, 1-3.
- [17] Manabe, S., 1970, "The dependence of atmospheric temperature of concentration of carbon dioxide", in *Global Effects of Environmental Pollution*, ed., S.F. Singer, Dallas, Texas, 25-29.
- [18] Milankovitch, M., 1930, "Matematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen", in *Handbuch der Klimatologie*, editado por W. Köppen and R. Geiger, **Vol. 1**, Pt. A, 1-176, Berlin, Borntraeger.
- [19] Murphy, J.M. *et al.*, 2004, "Quantifying uncertainties in climate change using a large ensemble of global climate model predictions", *Nature*, **430**, 768.
- [20] Oreskes, N., 2004, "The scientific consensus on climate change", *Science* **306**, 1686.
- [21] Plass, G.N., 1956, "The carbon dioxide theory of climate", *Tellus*, **8**, 140.
- [22] R.A. Bryson, and W.M. Wendland, 1970, "Climatic effects of atmospheric pollution", in *Global Effects of Environmental Pollution*, edited by S.F. Singer, p. 130-138, New York, Springer Verlag.
- [23] Revelle, R. and H.E. Suess, 1957, "Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the equation of an increase of atmospheric CO_2 during the past decades", *Tellus*, **9**, 18.
- [24] Smagorinsky, J., S. Manabe and J.L. Holloway, 1965, "Numerical results from a nine-level general circulation model of the atmosphere", *Monthly Weather Review*, **93**, 727.
- [25] Stainford, D.A., *et al.*, 2005, "Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases", *Nature*, **433**, 403-406.
- [26] Tyndall, J., 1863, "On Radiation through the Earth's Atmosphere", *Philosophical Magazine*, ser. 4, **25**, 204.
- [27] WHO, 1986, *Report of the International Conference on the Assessment of the Role of Carbon Dioxide and of other Greenhouse Gases in Climate Variations and Associated Impacts*, Villach, 1985, WHO, n° 661.
- [28] 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.
- [29] Woodwell, G.M. and R.A. Houghton, 1977, Biotic influences on the world carbon budget, in *Global Chemical Cycles and their Alterations by Man* (Report of the Dahlem Workshop, Berlin, Nov. 1976), edited by Werner Stumm, p. 61-72, Berlin, Abakon.