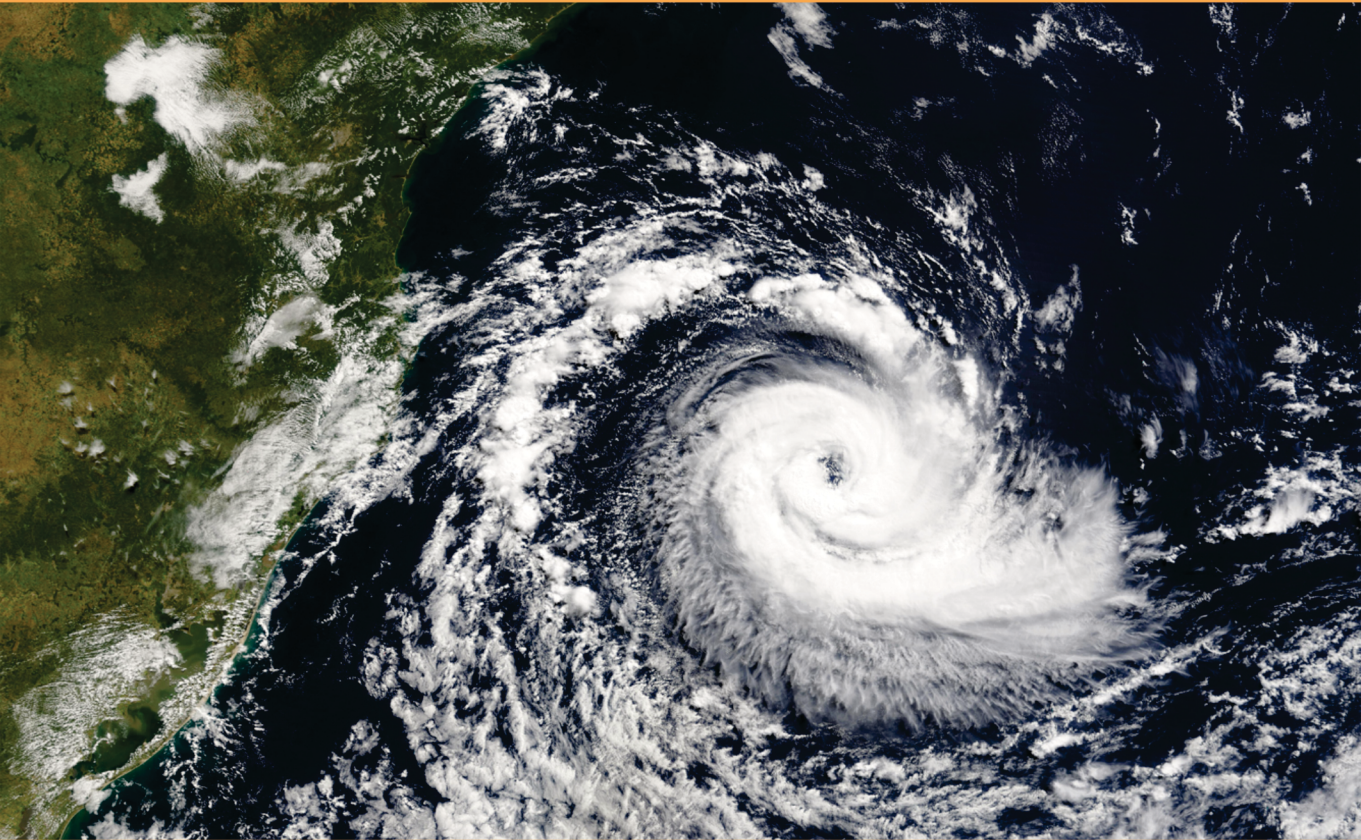


Ciência&Ambiente



Mudanças Climáticas

34

Sumário C&A 34

- 3 EDITORIAL
- 4 PRÓXIMA EDIÇÃO
- PONTO DE VISTA
- 5 UM NOVO CLIMA NO BRASIL
Marcelo Leite
- ARTIGOS
- 13 BREVE HISTÓRIA DO CLIMA
Pascal Acot
- 25 MODELOS CLIMÁTICOS
LIMITES DE UM INSTRUMENTO INDISPENSÁVEL
Hervé Le Treut
- 35 O AQUECIMENTO CONTEMPORÂNEO
ENTRE CERTEZA, CONTROVÉRSIA E DÚVIDA
Martine Tabeaud
- 49 O FUTURO DA CORRENTE DO GOLFO
MECANISMOS E CONSEQÜÊNCIAS DE UMA PERTURBAÇÃO
DA CIRCULAÇÃO TERMOHALINA NUM CLIMA QUE SE AQUECE
Didier Swingedouw
- 57 EL CIRCUITO TERMOHALINO EN EL OCÉANO ATLÁNTICO
CERTEZAS E INCERTIDUMBRES
Antón Uriarte
- 69 MUDANÇAS PALEOCLIMÁTICAS NA AMAZÔNIA DURANTE O HOLOCENO
*Bruno Turcq, Pascale Braconnot, Renato Campello Cordeiro, Abdelfettah Sifeddine,
Pedro Leite da Silva Dias, Jorge João Abrão, Tatiana Jorgetti, Renata Lima da Costa e
Francisco Fernando Lamego Simões Filho*
- 97 CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL EM 2100
José Marengo
- 115 FLUXOS TURBULENTOS
O DIÁLOGO ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA
Oswaldo L. Moraes, Otávio C. Acevedo, David R. Fitzjarrald e Ricardo K. Sakai
- 137 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS SOBRE OS
RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL
Carlos E. M. Tucci
- 157 O AQUECIMENTO CLIMÁTICO
IMPACTOS SOBRE A AGRICULTURA EUROPÉIA
Bernard Seguin
- 169 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA
UMA ABORDAGEM AGROCLIMATOLÓGICA
Eduardo Delgado Assad, Hilton Silveira Pinto, Jurandir Zullo Junior e Fábio Marin
- 183 INSTRUÇÕES PARA PUBLICAÇÃO
- 184 INSTRUCCIONES PARA PUBLICACIÓN

Expediente C&A 34

Universidade Federal de Santa Maria

REITOR	Clóvis Silva Lima
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS	Dalvan José Reinert – Diretor
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS	Martha Bohrer Adaime – Diretora
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS	Rogério Ferrer Koff – Diretor
EDITOR	Delmar Antonio Bressan
EDITORES CONVIDADOS	Pascal Acot Carlos Nobre
CONSELHO EDITORIAL	Beatriz Teixeira Weber Élgion Loreto José Newton Cardoso Marchiori Miguel Antão Durlo Ronai Pires da Rocha Ronaldo Mota Zília Mara Scarpari
CONSELHO CONSULTIVO	Alvaro Mones André Furtado Andrey Rosenthal Schlee Antonio Augusto Passos Videira Antonio Carlos Robert Moraes Aziz Nacib Ab'Saber Emilio Ulibarri Franz Andrae Luisa Massarani Luiz Antonio de Assis Brasil Pascal Acot
ANÁLISE, PREPARAÇÃO E REVISÃO DE TEXTO	Zília Mara Scarpari
EDITORIAÇÃO DE TEXTO E PROGRAMAÇÃO VISUAL	Valter Antonio Noal Filho
ILUSTRAÇÃO DA CAPA	Ciclone Catarina (litoral sul do Brasil – imagem da NASA cedida por www.popa.com.br)
IMPRESSÃO E ACABAMENTO	Gráfica Editora Pallotti/Santa Maria

ISSN 1676-4188

A revista *Ciência & Ambiente* é indexada ao
LATINDEX – Sistema Regional de Información en Línea
para Revistas Científicas de América Latina,
el Caribe, España y Portugal.

Ciência & Ambiente/Universidade Federal de Santa Maria.

UFSM - v. 1, n.1 (jul. 1990) - - Santa Maria :

Semestral

n. 34 (jan./jun. 2007)

CDD:605 CDU:6(05)

Ficha elaborada por Marlene M. Elbert, CRB 10/951

Ciência & Ambiente

Prédio 13/CCNE – Sala 1110 – Campus Universitário – Camobi
97105-900 – Santa Maria – Rio Grande do Sul – Brasil
Fone/Fax: (55) 32208735 e (55) 32208444/ramal 30
ambiente@ccne.ufsm.br – www.ufsm.br/cienciaeambiente

Abertura perceptível

Desde a sua fundação, no já distante ano de 1990, a revista *Ciência & Ambiente* abria-se para o mundo. Abertura perceptível, por exemplo, no interesse, logo divulgado, pelos artigos escritos em língua espanhola, em sintonia com a desejada integração do sul da América, e sobretudo pela universalidade do seu objeto de análise – a ciência e o meio ambiente.

Nessa ótica, os temas selecionados ao longo do tempo sempre perseguiram idéias de alcance global, mesmo quando aparentavam ser de escala regional, como no caso dos sítios paleontológicos ou dos núcleos de arenização observados em território sul-rio-grandense. O patrimônioossilífero e o processo ecológico (e antrópico) em questão, sem sombra de dúvidas, são capazes de despertar paixões além-fronteiras do Brasil ou mesmo da América do Sul, uma vez que representam momentos da própria história natural do planeta.

É justamente como parte desse esforço de internacionalização que deve ser compreendida a 34ª edição da revista dedicada ao tema **Mudanças Climáticas**. Digase, projeto editorial concebido bem antes do *boom* midiático observado em 2007 a partir da divulgação, em Paris, do último relatório do IPCC (*International Panel on Climate Change*). Para a montagem do número, dividido em partes iguais entre estudiosos franceses e brasileiros, os dois editores convidados – *Pascal Acot* e *Carlos Nobre*, pesquisadores do Centro Nacional de Pesquisas Científicas (CNRS/França) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/Brasil), respectivamente – emprestaram notável colaboração.

Ao fim e ao cabo, apresentamos ao público um alentado conjunto de textos acadêmicos, porém em linguagem acessível aos leitores não especializados. Textos que abordam desde a evolução do clima até as projeções de mudanças, bem como algumas das repercussões aventadas para setores sensíveis da atividade humana, entre os quais a agricultura. Sem catastrofismos e sem sensacionalismos, como convém a um veículo que se pretende portador de idéias embasadas no conhecimento científico.

Sobre tais excessos, que saltam aos olhos na cena atual, cabe um breve comentário. Estudos dessa magnitude, com tal número e grandeza de variáveis e que ainda exigem complementação dos dados hoje disponíveis, devem ser mostrados com todas as cautelas pelos pesquisadores, pelas instituições responsáveis e, particularmente, pelos meios de comunicação. Em assim não sendo, geram-se incertezas, desassossegos e, no limite, o pânico entre as populações supostamente afetadas. A boa ciência pressupõe boas formas de interação com o público. Pressupõe cientistas menos interessados nos holofotes da mídia e mais concentrados em desenvolver formas claras e objetivas de contato com uma legião de cidadãos ávidos por informações sobre o clima e tantos outros assuntos pertinentes ao mundo da ciência.

É com esse espírito universalista e ao mesmo tempo parcimonioso que entregamos aos leitores mais uma edição de *Ciência & Ambiente*.

A próxima edição da revista *Ciência & Ambiente* será dedicada ao tema **Fauna Neotropical Austral**. Além de colocar no centro das discussões a geografia da fauna na América do Sul Austral, incluindo moluscos, crustáceos, peixes, anfíbios, répteis, morcegos, borboletas, aves e mamíferos terrestres, os editores pretendem complementar o projeto iniciado com a publicação do volume sobre a geografia das plantas no sul da América. A professora **Sonia Zanini Cechin**, do Departamento de Biologia da Universidade Federal de Santa Maria, é a editora convidada do 35º número de *Ciência & Ambiente*.



UM NOVO CLIMA NO BRASIL

Marcelo Leite

Mesmo para quem acompanha há duas décadas a questão do aquecimento global, no mundo e no Brasil, foi surpreendente a notoriedade adquirida pelo tema a partir da divulgação do primeiro relatório da série programada para 2007 pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na abreviação em língua inglesa que consagrou esse organismo criado pela ONU em 1988 para avaliar cientificamente a ameaça da mudança climática). Para além de certo espanto, a súbita e adventícia atenção também sugere algum temor quanto à sustentabilidade do tema.

É verdade que o sumário para formuladores de políticas públicas divulgado pelo Grupo de Trabalho I do IPCC no dia

2 de fevereiro de 2007, em Paris, sobre a base de ciência física da mudança do clima (*Summary for Policy Makers*¹) trazia farto material para atrair a atenção da imprensa, a começar pelo fato de pela primeira vez em seus relatórios periódicos qualificar como “inequívocos” o aquecimento global já em curso (aumento de 0,76°C na temperatura média global desde 1850) e a responsabilidade humana nesse agravamento do efeito estufa. Por outro lado, porém, não havia propriamente novidades substantivas nessa primeira prestação do quarto relatório de avaliação (AR4).

¹ <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>, consultado em 20 de março de 2007.

Havia, sim, muitas alterações numéricas e metodológicas difíceis de entender e de explicar para o público. Uma delas foi a mudança de previsão no aumento da temperatura média global até o ano 2100: do intervalo de 1,4°C a 5,8°C no terceiro relatório de avaliação do IPCC (TAR, 2001) para 1,1°C a 6,4°C no AR4, mas com “melhores estimativas” entre 1,8°C e 4°C para os vários cenários de emissões. Trata-se de uma profusão de cifras que, em primeiro lugar, impedem metodologicamente a comparação direta dos relatórios e, depois, tendem a confundir o público não-especializado; para efeito de comunicação, fixou-se afinal o dado de 3°C como o valor mais provável do aquecimento da atmosfera neste século.

Menos atenção recebeu da imprensa aquela modificação entre os dois relatórios que poderia ser entendida como uma *atenuação* das previsões, a da elevação do nível dos mares até o final deste século: da faixa de 9-88cm no TAR (2001) para a de 18-59cm no AR4 (2007). Na realidade, trata-se de um estreitamento do intervalo, em certa medida produto do acúmulo de dados (observações e simulações) desde a última avaliação do IPCC. Houve um avanço, um ganho de acuidade nos modelos de previsão, mas que poderia aparecer como uma diminuição do nível do alarme, daí talvez o menor destaque. Mas os jornalistas tinham também outra razão, mais aceitável, para dar menos projeção para esse dado: ainda há discussões em curso sobre a influência (peso e ritmo) da perda de geleiras, como a da Groenlândia, no nível dos oceanos. Alguns estudos que não chegaram a ser considerados

pelo AR4 por não estarem disponíveis na data-limite, como os trabalhos de Stefan Rahmstorf,² indicam a possibilidade de o nível do mar se elevar até 140cm por volta de 2100, quando o fator geleiras é computado integralmente.

Com todas essas limitações, o AR4 tem sido um retumbante sucesso de público e de crítica. O aquecimento global se tornou assunto de botequim e de passarelas de moda, de programas de TV e de rádio, do Congresso Nacional e da visita de George W. Bush ao Brasil, de crônicas de jornal e de um sem-número de colunistas

bem-pensantes, que até então viam tudo isso como conversa de eco-chato para boi dormir na ONU e na sua elefantina proliferação de agências e conferências. A mudança climática adquiriu o status de *mainstream*, assunto respeitável até para empresários, em geral atarefados com assuntos menos “poéticos” que a sobrevivência da humanidade no futuro

distante. Teve início, então, uma espécie de descompensação cultural, em que a indiferença anterior foi substituída pela superexposição do tema, em que não faltaram exageros – em particular, como seria de esperar, nas campanhas publicitárias oportunistas, em que o excesso de calor foi empregado para vender mais roupas da marca Diesel (presume-se que a grife tema por sua própria sustentabilidade, em razão da associação direta com um combustível fóssil e, doravante, vilão) e mais cerveja da marca Sol.

O aquecimento global se tornou assunto de botequim e de passarelas de moda, de programas de TV e de rádio, do Congresso Nacional e da visita de George W. Bush ao Brasil

² Conforme RAHMSTORF, S. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315(5810):368-370, 2007.

Nem tudo que ganhou destaque na esfera pública, porém, era movido a oportunismo. O Ministério do Meio Ambiente (MMA), por exemplo, comissionara já em 2004 uma série de estudos para começar a sondar as áreas virgens, no país, de impactos, adaptação e mitigação da mudança climática. Em 27 de fevereiro, menos de um mês após a apresentação do bombástico sumário do IPCC em Paris, um relatório coordenado por José A. Marengo, do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), foi apresentado em Brasília: *Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade*.³ Baseado em simulações numéricas do clima futuro na América do Sul produzidas pelo próprio INPE com base em premissas e resultados do TAR e não do AR4 (que ainda não estava disponível), o feixe de estudos compilava previsões suculentas para atrair a atenção da imprensa:

- impacto sobre até 42 milhões de habitantes do litoral brasileiro até o final deste século;

- temperatura média do país alcançando 28,9°C (cenário pessimista) ou 26,3°C (cenário otimista) em 2100, ou 4°C acima da média de 1961;

- até 8°C de aumento de temperatura na Amazônia, com grandes porções de floresta substituídas por uma vegetação do tipo savana;

- redução de chuvas na região leste da Amazônia;

- no Sudeste e no Centro-Oeste, possível aumento de “eventos extremos”, como ondas de calor e chuvas intensas.

O primeiro dado abria a reportagem “Avanço do mar ameaça 42 mi no Brasil”, que recebeu destaque na primeira página da *Folha de S. Paulo* (no jornal *O Globo*, esse contingente seria “afetado”, e não “deslocado”, como estava na *Folha*, pela elevação do nível do mar). A informação está obviamente superestimada, uma vez

que essa cifra representa aproximadamente um quarto da população brasileira e é inimaginável que tantas pessoas sejam afetadas – para não dizer obrigadas a mudar de domicílio – por um aumento de 40-50 cm no nível do mar, ou mesmo de 1,4 m, no prazo de um século. O dado se encontrava tanto no comunicado à imprensa distribuído pelo MMA⁴ quanto na página 74 do estudo *Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade*, que citava como fonte um relatório de 2006 da organização não-governamental Greenpeace⁵, que por sua vez o referenciava em uma obra didática do Ministério da Educação (MEC)⁶. Em outras palavras, INPE e MMA ofereceram ao público uma informação de terceira mão, em meio a uma imenso cabedal de dados e resultados de pesquisa científica séria, lançando sombra desnecessária sobre a credibilidade daquele esforço pioneiro, como denunciou o autor no jornal *Folha de S. Paulo*.⁷

Trata-se de um episódio isolado, não resta dúvida, que não chegou a prejudicar a disseminação de informações sobre o que mais interessa – a necessidade de que

³ http://www.mma.gov.br/estruturas/imprensa/_arquivos/livro%20completo.pdf, consultado em 31 de março de 2007.

⁴ <http://www.mma.gov.br/ascom/ultimas/indexsm.cfm?id=3150>, consultado em 31 de março de 2007.

⁵ *Mudanças de clima, mudanças de vida: como o aquecimento global já afeta o Brasil*. 64 pp. http://www.greenpeace.org.br/clima/pdf/catalogo_clima.pdf, consultado em 2 de abril de 2007.

⁶ MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. *O Mar no Espaço Geográfico Brasileiro*. Brasília: MEC, 2005.

⁷ “Desastre climático e midiático”, na coluna Ciência em Dia do caderno Mais de 4 de março de 2007 (<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe0403200705.htm>, consultado em 2 de abril de 2007). A denúncia, assim como comentários do Ombudsman da *Folha* (“O futuro sem exageros”, 4 de março de 2007) sobre cobertura jornalística do relatório do IPCC, recebeu resposta corajosa do INPE reconhecendo falhas e reafirmando a determinação de dar transparência ao que se produz no INPE (v. <http://www.jornaldaciencia.org.br/Detail.jsp?id=45067>, consultado em 2 de abril de 2007).

se iniciem no Brasil estudos mais aprofundados para subsidiar o planejamento de ações de adaptação à mudança climática inevitável. O país depende cada vez mais de seu produto agrícola para manter superávits na balança comercial, assim como da hidreletricidade na base de sua matriz energética incomumente limpa – para citar apenas dois aspectos da economia nacional que podem ser significativamente afetados, para pior ou para melhor, com o aquecimento global. Além da biodiversidade, obviamente, e da infra-estrutura. Neste capítulo, estávamos muito atrasados em fevereiro e março de 2007, quando os relatórios do IPCC e do INPE vieram a público, e é muito provável que ainda estejamos quando este número de *Ciência & Ambiente* entrar em circulação.

O problema não está somente na ausência de um órgão ou instância, na administração federal, designado para projetar e preparar o país para os impactos da mudança climática em sua economia e sua população. Bastaria, para isso, indicar o Ministério do Planejamento, ou a Casa Civil, para coordenar os trabalhos, mas para tanto seria preciso que o aquecimento global – a questão ambiental como um todo, de resto – adquirisse uma centralidade que nunca teve no governo federal. Mesmo a febre dos biocombustíveis que tomou o governo Lula na transição entre o primeiro e o segundo mandatos parece explicar-se mais pela oportunidade de negócios que se abre, ou até pela prometida componente social do programa de biodiesel, do que por seus benefícios ambientais com a substituição de combustíveis fósseis agravadores do efeito estufa.

*A omissão e a
desarticulação de setores
do Estado diante da
mudança climática vão
mais além do que os
horizontes estreitos
desta ou de outra
administração*

A omissão e a desarticulação de setores do Estado diante da mudança climática vão mais além do que os horizontes estreitos desta ou de outra administração. Um exemplo flagrante, no que toca a estudos sobre o comportamento e os efeitos do clima em transformação no Brasil, foi oferecido em reportagem de Rafael Garcia na *Folha de S. Paulo*⁸: no segundo relatório do IPCC, sobre impactos e adaptação, o Brasil aparece como um vazio de dados meteorológicos porque organizações de pesquisa como o INPE não conseguem acesso a séries históricas de dados gerados pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, ligado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, MAPA). Entre as razões está a cobrança dos dados pelo INMET, que segue determinação de portaria sucessivamente reeditada do governo federal na gestão de... Getúlio Vargas (1951-54), além do custo proibitivo de digitalização dos dados do século XX. Para os modelos climáticos do IPCC, a maior parte do Brasil está na mesma situação da África, em pobreza de informações.

A mesma descoordenação – quando não um maldisfarçado conflito – entre ministérios impede há anos a resolução de uma das questões mais sensíveis quanto ao papel do Brasil na mudança climática global: o fato de que algo entre 2/3 e 3/4 das emissões nacionais são produzidas pelo desmatamento, sobretudo na Amazônia, e não por atividades econômicas mais

⁸ “Restrição a dado faz país ter ‘buraco’ climático”, 2 de abril de 2007. <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/ciencia/fe0204200701.htm>, consultado na mesma data.

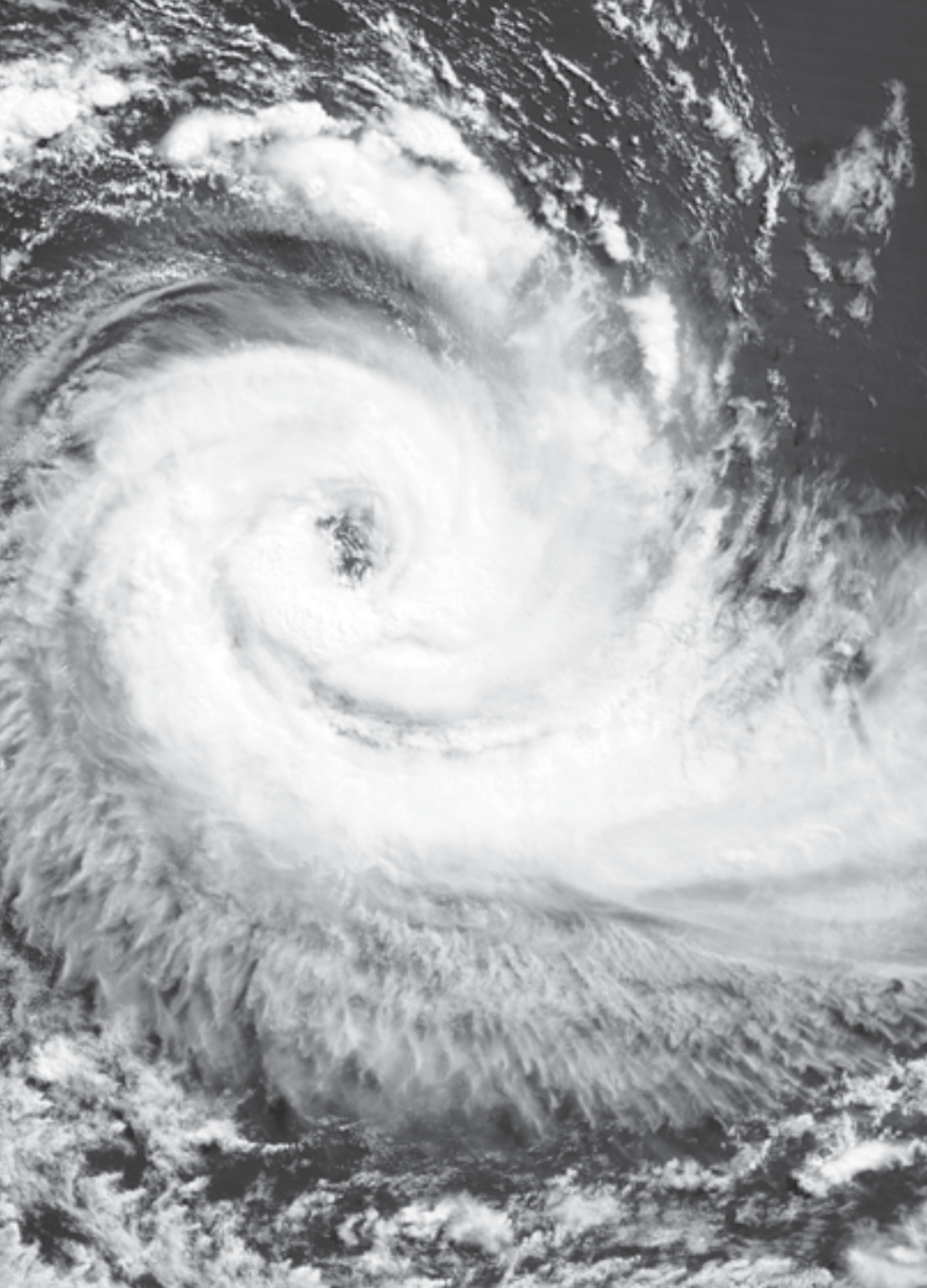
produtivas e geradoras de riqueza para a população em geral, como indústria, energia e transportes. Graças a taxas de desmatamento na casa de dezenas de milhares de quilômetros quadrados anuais, o Brasil ocupa a nada invejável posição de quarto ou quinto maior emissor do planeta. Embora tenha sido um dos propositores do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto, em 1997, o país sempre se bateu por excluir florestas naturais desse dispositivo de mercado que permite compensar emissões de gases do efeito estufa em países desenvolvidos com reduções menos custosas obtidas em países em desenvolvimento.

A orientação rigidamente mantida pelas delegações brasileiras nas negociações internacionais entre as partes da Conferência-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (1992), sob controle dos ministérios das Relações Exteriores (Itamaraty) e da Ciência e Tecnologia (MCT), não era inteiramente partilhada na pasta do Meio Ambiente. A muito custo, esta conseguiu mais recentemente abrir uma brecha no monolito com a proposta de criação de um fundo voluntário (mas sem mecanismos de mercado) em que países ricos depositariam recursos para apoiar projetos de desenvolvimento sustentável em países menos ricos que implicassem redução de taxas de desmatamento.

Persiste ainda uma restrição doutrinária – para não dizer ideológica – e nada pragmática contra a possibilidade de obter receita certa e calculável com a redução nas taxas de desmatamento, como aconteceu nos dois últimos anos. O Brasil faz a coisa certa para si e para a saúde do planeta, mas recusa voluntariamente o que poderia ganhar com isso num mercado de carbono sedento por créditos, além de um papel mais proeminente na negociação internacional sobre clima, por vagos temores associados com uma antiquada doutrina de soberania nacional e de internacionalização da Amazônia. Tal posição reativa e defensiva dificilmente conseguirá resistir ao rolo compressor que virá sobre países em desenvolvimento na negociação do segundo período do Protocolo de Kyoto (pós-2012).

Os relatórios de 2007 do IPCC criaram de fato uma nova atmosfera para a discussão da mudança climática no Brasil, sobretudo junto ao público. Não se sabe ainda se se trata de uma aragem ou de uma ventania, nem tampouco se poderá desfazer as nuvens que ainda obscurecem o tratamento dessa questão no interior do Estado. O único que se pode afirmar, claramente, é que o tempo está passando, e que as providências de adaptação e mitigação da mudança climática que precisariam ser tomadas hoje farão muita falta amanhã.

Marcelo Leite é jornalista, colunista da *Folha de S. Paulo*, responsável pelo blog *Ciência em Dia* (<http://cienciaemdia.zip.net>) e autor de *Promessas do Genoma* (Editora da Unesp, 2007)





BREVE HISTÓRIA DO CLIMA

Pascal Acot

Os primeiros seres vivos apareceram há cerca de 3,8 bilhões de anos, a partir de constituintes físico-químicos. Em 1953, um jovem cientista de 23 anos, Stanley Miller, realizou uma série de experiências extraordinárias. Teve a idéia de recriar as condições atmosféricas que poderiam ter sido as da Terra primitiva. Fabricou um aparelho que funcionava em circuito fechado, no qual introduziu água destilada, metano, amoníaco e hidrogênio; depois aqueceu essa mistura e, durante uma semana, submeteu os vapores produzidos a descargas elétricas de 60.000 volts. As faíscas simulavam as tempestades; a condensação do vapor, a chuva, etc. Os resultados o tornaram célebre: mais de 15% do carbono que compõem o metano (CH_4) permitiram produzir diversos aminoácidos, isto é, componentes de base das proteínas. Considera-se que no decurso de complexificações sucessivas, apareceram as moléculas complexas capazes de se reproduzirem, o que abriu caminho à emergência dos primeiros organismos vivos.

As mudanças climáticas “naturais”

Há cerca de 3,8 bilhões de anos, a quantidade daquilo que chamamos “gases de efeito estufa” era muito maior do que a dos dias atuais. E como esses gases retêm uma parte do calor recebido do Sol – sendo o resto reemitido pela Terra, em direção ao espaço profundo –, a temperatura média em nosso planeta era também superior. É graças aos gases de efeito estufa que a vida é possível na Terra, porque, sem eles, a temperatura média do planeta seria de -18°C , o que tornaria impossível a presença da água em estado líquido, logo, a vida em si. Vemos assim o caráter indissociável do par ser vivo-clima, desde suas origens, situação que perdura até hoje.

Os principais gases de efeito estufa são o vapor da água, o gás carbônico (CO_2), o óxido de carbono (CO) e o metano (CH_4). Quando do surgimento da vida, a atmosfera continha 100 vezes mais dióxido de carbono que agora e a temperatura da superfície atingia 60°C . Tal circunstância poderia ter arrastado nosso planeta numa espiral de aquecimento, à maneira do que aconteceu com Vênus, cuja temperatura do solo atinge mais de 450°C . Foi portanto necessário que a atmosfera terrestre esfriasse em consequência de processos que lhe reduziram gradualmente a taxa de dióxido de carbono. Atualmente, 78.000 bilhões de toneladas de carbono estão estocados nas rochas sedimentares do planeta.

Há 3,5 bilhões de anos, bactérias e algas azuis começaram a modificar a composição química da atmosfera pela redução de CO_2 , formando as conchas dos moluscos feitas de carbonato de cálcio (CaCO_3), por exemplo. Ao mesmo tempo, essa atividade metabólica fez aumentar a taxa de oxigênio (O_2) e, indiretamente, formar uma camada de ozônio (O_3) protetora contra os raios ultra-violeta, cuja ação nociva tornava até então impossível a colonização das terras emersas. Este último ponto foi crucial, significando que os seres vivos criaram as condições para a conquista dos continentes. Paralelamente, apreendemos as consequências climáticas desse fenômeno: a redução da taxa dos gases de efeito estufa pela estocagem do carbono atmosférico vai não só diminuir consideravelmente a temperatura média do planeta, como também tornar possíveis glaciações cataclísmicas!

A primeira glaciação pré-cambriana¹ ocorreu há 2,3 bilhões de anos, sob os efeitos conjugados de diversos fatores. Desde 1,2 bilhão de anos, os primeiros organismos começaram a se desenvolver por conta do carbono atmosférico, por fotossíntese. Este foi um primeiro fator de resfriamento. Por outro lado, a formação dos primeiros continentes

¹ O Pré-cambriano, que se estende desde a formação da Terra, há 4,6 bilhões de anos, até o começo do período paleozóico (era primária), durou 4 milhões de anos. Seu nome remete à região de Cambres, no País de Gales (Grã-Bretanha), onde formações muito antigas foram observadas pela primeira vez.

“continentalizou” os climas do planeta, com invernos mais frios e verões mais quentes. É igualmente possível que uma importante atividade vulcânica tenha obscurecido o céu. Também se formulou a hipótese de que uma nuvem estelar tenha cruzado o sistema solar – travessia que teria tido como consequência certa opacificação da atmosfera. Esse episódio glacial teria durado 300 milhões de anos (ma) antes de se reinstalar um clima quente. Porém, as incertezas de datação são da ordem de mais ou menos 50 ma.

Um segundo episódio glacial surge em fins do Pré-cambriano, há cerca de 1 bilhão de anos. Com uma duração de 400 ma, decompôs-se numa sucessão de três glaciações de cerca de 100 ma cada uma. Os fatores astronômicos estudados pelo matemático Serbe Milutin Milankovitch (1879-1958) viriam explicar tais pulsações. A idéia central dessa teoria é a de uma forçante cíclica resultante de três fatores astronômicos também cíclicos: as variações da excentricidade da órbita terrestre; as variações da obliquidade do eixo dos pólos em relação ao plano da eclíptica e, por fim, a precessão dos equinócios. Outros fatores, como a travessia de nuvens estelares, foram aventados para explicar as glaciações. Além disso, o fim do Pré-cambriano caracteriza-se como um intenso período de formação de montanhas. A altitude pôde favorecer o desenvolvimento de importantes geleiras. Mais ainda, o levantamento das montanhas sempre esteve ligado a movimentos de continentes; quando os continentes se aproximavam dos pólos, o fenômeno de glaciação pôde intensificar-se.

Conforme alguns autores, esse imenso período de 400 milhões de anos, em sua fase mais fria, teria sido testemunha de uma Terra inteiramente gelada. É a teoria da “Terra bola de neve”, formulada em 1992 por Joseph Kirschvink, especialista em geobiologia do *California Institute of Technology* (Pasadena). Trata-se de uma teoria controversa, mesmo que nenhum argumento decisivo tenha conseguido negá-la. Com efeito, segundo o geofísico russo Mikhail Ivanovitch Budyko, uma Terra inteiramente gelada teria tal poder refletor que ela jamais poderia readquirir condições menos extremas. Ao que Joseph Kirschvink se contrapôs, com o fato de que o vulcanismo nunca cessou, pois os rejeitos vulcânicos franquearam caminho através dos gelos: gases de alta temperatura teriam sido lançados na atmosfera, permitindo um aquecimento, pela intensificação do efeito estufa.

Alguns consideram que não é mais plausível sustentar a hipótese segundo a qual uma faixa oceânica equatorial teria escapado à glaciação. Essa hipótese sugere que a fauna

pré-cambriana poderia ter encontrado refúgio na zona intertropical, abrigada dos gelos, o que torna possível uma explicação racional da extraordinária eclosão da vida no cambriano. Porque é evidentemente a partir dos sobreviventes desse resfriamento que formas de vida mais exuberantes aparecem e se diversificam durante toda a era primária, continuando a interagir com o clima.

O resto da história longínqua do clima é mais conhecido: à era paleozóica, que se inicia há 540 ma, estão associadas a diversificação e a complexificação das formas primitivas de vida no quadro de grandes mudanças climáticas, quando invertebrados providos de conchas, corais, esponjas, ouriços do mar, náutilos, trilobites e vegetais se desenvolvem. O período sofrerá duas glaciações de 5 ma cada uma. As terras emersas serão animadas por grandes movimentos de dispersão: paleocontinentes, como a Laurásia e o Gondwana, ficarão separados por um mar, o Tétis. Depois, esses continentes se reunificarão num supercontinente denominado Pangea.

No Mesozóico (a partir de -225 ma) surgem os grandes répteis, que dominam o mundo animal. Os primeiros pássaros e répteis voadores povoam os ares, enquanto mamíferos arcaicos se desenvolvem discretamente. No Cenozóico, há 65 ma, os continentes ficarão nos seus lugares atuais e os mamíferos (placentários e marsupiais) ocuparão os nichos ecológicos deixados livres pelos grandes répteis. O gênero *Homo* (*Homo habilis*) despertará no leste da África.

Enfim, o sistema quaternário (de -1,75 ma até hoje) assiste ao surgimento do *Homo erectus* e, em seguida, do *Homo sapiens*, no quadro das grandes glaciações recentes (Günz, Mindel, Riss, assim como as quatro pulsações do Würm²), alternando com períodos bastante clementes.

Uma das características do gênero *Homo* é a artificialização de seu meio ambiente. Os refúgios melhorados, as choças, as vestimentas protegem os primeiros humanos dos rigores dos climas e contribuem gradualmente para limitar sua evolução biológica por seleção natural. No entanto, as condições ambientais, dentre elas o clima em primeiro lugar, continuam a pesar sobre os primeiros grupos humanos. Eis porque o papel do clima na história das sociedades humanas sempre preocupou os filósofos.

Os climas na história da humanidade

Veja-se, por exemplo, o que diz Aristóteles (384-322) no Livro VII de *A Política*: “Os habitantes das regiões frias são cheios de coragem e feitos para a liberdade. Aos asiáticos falta energia: por isso são feitos para o despotismo

² Nomes de afluentes do Danúbio, batizando regiões onde os vestígios dessas glaciações foram observados.

³ Citado por FEBVRE, Lucien. *La Terre et l'évolution humaine*. Paris: Albin Michel, 1949. [Première édition: 1922]. p. 111.

⁴ MONTESQUIEU, Charles-Louis. *De l'esprit des lois*. Livro XIV, capítulo II. Paris: Garnier Frères, 1961. [Première édition: 1748].

e a escravidão.”³ Já mais próximo de nós, Charles de Montesquieu (1689-1755) tenta estabelecer “relações necessárias” entre os fenômenos culturais (não somente a elaboração das leis) e as circunstâncias climáticas: “Nos países frios tem-se pouca tendência para os prazeres (...) É preciso esfolar um moscovita para dar-lhe sentimento.” Em contrapartida: “Com essa delicadeza de órgãos que se tem nos países quentes, a alma fica soberanamente emocionada por tudo aquilo que se relaciona com a união dos dois sexos: tudo conduz para tal objetivo.”⁴ Retrospectivamente, esses textos nos parecem ingênuos. Contudo, observam-se ressurgências, com certa regularidade, ainda que sob formas menos caricaturais, da supervalorização do papel dos climas nas sociedades humanas.

Aliás, o papel do clima – e mais amplamente o papel dos fatores físicos do meio ambiente – é controvertido, a ponto de hoje a tendência apresentar-se contrária ao sentido das influências: muitos dos climatologistas agora consideram que não é mais o clima que explica o homem, mas é o homem que explica o clima.

Assim, ao alvorecer do século XXI, estamos num período de reaquecimento por razões astronômicas (e contra isso nada podemos), mas também, segundo muitos especialistas, por causa de uma intensificação do efeito estufa provocado por atividades humanas (o que permanece duvidoso). Eis o que os entendidos nos prometem para o século XXI: um aumento de 1,8 a 4°C na temperatura média do globo (quarto relatório do IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*, fevereiro de 2007). Essa tendência não se apresentaria de maneira uniforme: o hemisfério norte seria mais afetado que o hemisfério sul, em razão da maior inércia térmica deste último, dominado pelos oceanos. No hemisfério norte, as regiões das altas latitudes européias seriam igualmente mais atingidas que as outras; o sul da Europa se tornaria mais seco e o norte mais úmido. De modo geral, o aquecimento seria mais pronunciado à noite que durante o dia, sobre os continentes mais que sob os oceanos, no inverno mais que no verão, nos pólos e nos trópicos mais que nas latitudes médias, e em altitude mais que no solo. Enfim, o nível dos mares poderia subir aproximadamente um metro. Cenários ainda mais catastróficos, nos quais as emissões antrópicas de gases de efeito estufa não estariam de modo algum limitadas, apresentariam 9°C de aumento médio e uma elevação de três metros do nível médio dos mares. Sabendo-se que 80% da humanidade vivem nas zonas costeiras, pode-se imaginar os impactos do fenômeno.

No quadro dessas hipóteses, a frequência e a intensidade dos episódios climáticos violentos (inundações, secas, canículas) certamente se multiplicariam. Incertezas permanecem no que se refere às geadas em latitudes da Europa – com a série de problemas agrícolas que poderiam advir, apesar da vantagem inicial que representaria uma concentração aumentada de carbono atmosférico (crescimento mais rápido, aumento do porte das plantas cultivadas). As perturbações das correntes oceânicas termohalinas⁵, responsáveis pelos fenômenos de elevação do nível das águas carregadas de sais minerais que fertilizam as águas superficiais, também devem ser consideradas. Elas poderiam ter profundas repercussões nas quantidades de plâncton vegetal produzidas, estendendo-se portanto à pesca, já gravemente comprometida pela superexploração. E no que concerne às grandes correntes oceânicas, perturbações importantes poderiam ter conseqüências catastróficas. Assim, um clima comparável ao do Quebec ameaçaria a Europa ocidental se a Corrente do Golfo (*Gulf Stream*) viesse a enfraquecer-se ou a desaparecer. Nesse caso, o aquecimento climático global apresentaria, num primeiro momento, efeitos de resfriamento na Europa!

Enfim, numerosas conseqüências, indiretas, poderiam ainda ocorrer. Seriam ligadas às modificações do regime das precipitações, a eventuais incrementos da população de insetos devastadores ou vetores de doenças parasitárias (paludismo, dengue, febre amarela) pela extensão das zonas geográficas e dos períodos de reprodução dos insetos vetores; conseqüências nefastas também poderiam ser causadas pelo desenvolvimento de microorganismos patógenos, por mudanças importantes de regimes alimentares, por migrações em massa com o intuito de escapar à elevação do nível dos oceanos (em Bangladesh⁶ e nas ilhas do Oceano Índico notadamente), pela falta de água potável na América do Sul sob o efeito do recuo das geleiras, pela evolução possível do El Niño etc. Tudo isso deve ser analisado de maneira mais detalhada em função das regiões biogeográficas e do grau de desenvolvimento das sociedades humanas (os países menos avançados e as populações mais pobres dos países avançados são inevitavelmente mais vulneráveis que os outros). De modo geral, deve-se temer uma diminuição da biodiversidade e uma séria degradação da segurança alimentar.

A situação fica mais séria se considerarmos que, no caso de serem adotadas e aplicadas as boas decisões (o que está longe de acontecer), as formidáveis inércias ecológicas em escala planetária impediriam que os primeiros resultados se fizessem sentir antes que muito tempo tivesse

⁵ *Termohalinas*, do grego *thermos*, quente, e *hals*, *halos*, mar. As variações de densidade das águas, ligadas à temperatura e à salinidade, causam correntes verticais conhecidas como termohalinas.

⁶ 30% de Bangladesh poderiam ser cobertos pelas águas até o fim do século XXI.

decorrido: a temperatura média do globo continuaria a aumentar durante vários séculos e o nível dos mares subiria durante um milênio.

Nessas condições, a questão que convém primeiramente colocar, é a do impacto real dessa mudança climática sobre as sociedades humanas: será ela tão importante como se propala? E quanto às controvérsias a respeito? O modo como podemos reagir depende em grande parte das respostas que podemos dar a tais perguntas. Por outro lado, as implicações filosóficas do debate parecem embaraçosas: se o clima determinasse a evolução das sociedades, ou seja, sua história, como se definiria a liberdade humana? Como suprimir a contradição entre o fato de o clima ter representado um papel fundamental na história das sociedades e a tendência dos historiadores modernos de relativizar essa importância?

A neolitização do mundo a partir de 6.000 anos antes de nossa era foi manifestamente favorecida por um aquecimento climático global. Há cerca de 8.000 anos, o Oriente próximo cobriu-se de gramíneas selvagens – ancestrais do trigo, da cevada, do centeio e do milho principalmente. Tal circunstância climática teve repercussões incalculáveis: em alguns milênios, os grupos nômades de caçadores-colhedores que povoavam a região tornaram-se sedentários, construíram vilas, cultivaram a terra e domesticaram animais. E se a população mundial é avaliada pelos historiadores da demografia em 5 milhões de habitantes no ano 10.000 aproximadamente antes de nossa era, eles também estimam que essa população atingiu 150 milhões em cerca de -3.000, ou seja, somente 7.000 anos mais tarde! O crescimento explosivo é revelador da eficácia de uma nova relação dos seres humanos com a natureza: produzir o alimento é bem mais fecundo que colher, coletar, caçar e pescar.

Um dos traços mais notáveis e emocionantes do fenômeno neolítico é a sua universalidade. Em todos os lugares do globo, e quase no mesmo momento, acontece o processo que associa domesticação de vegetais e animais, sedentarização de grupos humanos e produção de cerâmica. O processo ocorre tanto na Europa quanto no continente americano, o que dá crédito à idéia de um reaquecimento não apenas regional, mas global.

Do mesmo modo, condições climáticas clementes tornam possíveis os grandes desmatamentos do período medieval, entre os séculos X e XIV, bem como a colonização da Groenlândia, sobre a qual convém refletir, porque nos ensina sobre situações cambiantes em matéria de determinismo climático.

O reaquecimento do clima a partir do século X vai não só permitir a penetração da Escandinávia, como também criar condições para uma ocupação durável do sul da Groenlândia. Noruegueses, vindos da Islândia, ali se estabelecem e permanecerão até o século XIV. Durante esse período, auxiliados pelas correntes, groenlandeses chegam até a América – em Terra Nova, no sudoeste do Labrador e na Nova Escócia.

E é com certeza por causa de múltiplas conseqüências econômicas e sociais de uma deterioração progressiva do clima, a partir do século XIV, que os estabelecimentos vikings do sudoeste da Groenlândia desaparecem. Essas colônias não tinham tanta importância e, num meio ambiente difícil, não eram vantajosas. O resfriamento faz refluir primeiramente muitos inuits⁷ em direção ao sul da Groenlândia, para as boas terras ocupadas pelos colonos. Essa lenta migração começa durante os anos 1350 e continua no mínimo durante um século. A concorrência, vital, instala-se então: como os vikings, os inuits caçam a foca e o ovibo (*Ovibos moschatbus*). E a economia de pecuária dos colonos também se fragiliza pela diminuição da superfície das pastagens. Como as condições climáticas ficam mais rigorosas, os gelos que delas decorrem deslizam para o sul, tornando ainda mais perigosa uma navegação já bastante difícil na região.

As comunicações com o continente norte-americano e sobretudo com a Islândia tornam-se problemáticas, mais raras e depois cessam. Os vikings daí em diante serão privados de numerosos recursos, principalmente metálicos: ferramentas, armas, ferragens. A madeira, de construção e especialmente para lenha, passa a faltar. O frio e a umidade instalam-se e, com isso, as doenças bronco-pulmonares. Em 1350, a colônia do oeste é abandonada. A do leste, pouco mais próxima da Islândia, viria a subsistir até cerca de 1450.

Assim, o fenômeno neolítico, os grandes desmatamentos medievais, a conquista da Groenlândia e depois o desaparecimento das colônias vikings confirmam a tese de um verdadeiro determinismo climático na história das sociedades humanas. Todavia, apenas alguns decênios após o desaparecimento dos vikings e com a deterioração progressiva das condições climáticas, o comércio transoceânico entre as grandes potências marítimas da Europa e da América começa a desenvolver-se. Os progressos tecnológicos permitirão, durante o que se chamou de “pequena era glacial”, um florescimento espetacular do comércio, notadamente durante a última pulsação fria, entre 1800 e 1850. Por esse quadro vê-se bem que o peso do clima nas sociedades humanas depende do desenvolvimento destas e de seu potencial de progresso.

⁷ *Inuit* é o nome genérico para grupos humanos culturalmente relacionados, que habitam o Ártico. Suas características físicas os ajudam a sobreviver no frio: são baixos e robustos, com cílios pesados para proteger os olhos do brilho do sol refletido no gelo. N. T.

Os flagelos da fome são exemplares a esse respeito, reputados por serem causados por circunstâncias climáticas que afetam a produção agrícola e, por conseqüência, de maneira dramática, a alimentação dos seres humanos. Isso pode ser verdade algumas vezes, mormente na época medieval, mas revela-se falso com muito mais freqüência. É estranho, para um ocidental que não possui a mínima cultura da fome, constatar que, por vezes, as mortes não são necessariamente e nem diretamente causadas pela falta de alimentos. A questão foi evidenciada pelo professor Amartya Sen, ganhador do prêmio Nobel de economia em 1998 por seus trabalhos sobre o assunto.

Em 1942, uma série de furacões prejudicaram gravemente a colheita de arroz em Bangladesh. Os japoneses estavam conquistando a Birmânia, o que privava a Índia, portanto Bengala, de fontes de abastecimento suplementares em caso de necessidade. Por outro lado, os estoques de arroz tinham sido transportados para fora de Bengala para que não caíssem nas mãos do inimigo em caso de invasão. Paralelamente, inundações alarmavam a população, o que desencadeava o apetite dos especuladores – o preço do arroz foi multiplicado por 6! O próprio Amartya Sen nos conta o resto:

A lembrança da fome em Bengala no ano de 1943, quando morreram dois a três milhões de pessoas, e da qual fui testemunha em Santiniketan, ainda permanece viva em meu espírito. Fiquei impressionado por seu absoluto caráter de classe. Não conheci ninguém na minha escola ou entre meus amigos e minhas relações cuja família tenha encontrado o mínimo problema durante todo o flagelo; foi uma epidemia que não afetou nem mesmo as camadas de classe média mais modestas e sim as pessoas situadas na mais baixa escala social, como os trabalhadores agrícolas sem terra (...).

Amartya Sen mostrou, aliás, que em 1943, o abastecimento foi somente 5% menor que a média dos cinco anos precedentes, a qual chegou mesmo a ultrapassar em 13% a de 1941 – ano em que não houve fome alguma. Pior: no ano da fome, a disponibilidade de alimentos por habitante era 9% superior à de 1941.

A climatologia política

A idéia de um certo relativismo em matéria de clima projeta uma luz inesperada e inquietante sobre o problema da mudança climática. A primeira questão que se coloca é a da realidade que recobre a expressão “catástrofe climática”. Percebemos de modo inequívoco que tal expressão não

tem sentido em si, mas somente quando se reporta à humanidade. As mudanças climáticas ocorridas no passado longínquo podem ser classificadas de “catástrofes” unicamente em relação a nossos próprios valores: consideramos “catastrófica” a extinção em massa do Permiano-Triássico, porque sabemos que se a vida tivesse desaparecido há 248 milhões de anos a espécie humana jamais teria vindo à luz. Em contrapartida, uma mudança climática, lenta ou brutal, torna-se uma catástrofe – ou não – em determinadas condições sociais: uma inundação não apresenta o mesmo caráter na Europa e em Bangladesh, ainda que represente um drama para as vítimas em todos os casos.

Tais pontos são importantes no que diz respeito às nossas inquietações sobre a mudança climática, tanto mais quando somos confrontados com fenômenos imprevisíveis. No mais das vezes, é muito tarde quando esses sobrevêm: as devidas providências jamais são tomadas a tempo. Com efeito, sabemos prever o tempo que fará em 5 dias e o clima que reinará daqui a 70.000 anos; entre os dois extremos, apenas conjecturas são possíveis.

O fato tem conseqüências maiores para nossas preocupações atuais: imaginemos que as previsões do IPCC se verifiquem e ganhem unanimidade. Nesse caso, o desenvolvimento econômico e humano das sociedades mais frágeis do planeta deveria ter, desde hoje, ao menos a mesma importância, dentre as preocupações do público e dos políticos, que a redução das emissões dos gases de efeito estufa. Entretanto, o desenvolvimento dos países menos avançados não se apresenta como um objetivo “ecológico”, mesmo que muitos especialistas do IPCC estejam conscientes dessa necessidade e o digam. Ao contrário, tal desenvolvimento é temido, principalmente por causa dos rejeitos de gases de efeito estufa que o acompanhariam. E os relatórios do IPCC fazem jus a esse temor.

O IPCC foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUE), por iniciativa do grupo dos 7 países mais ricos do mundo, o G7.⁸ Compreende três grupos de trabalho encarregados de avaliar as produções científicas sobre a mudança climática. O primeiro consagra-se aos trabalhos relativos à climatologia científica. O segundo dedica-se às pesquisas realizadas sobre a vulnerabilidade da biosfera e dos sistemas socioeconômicos do planeta, em sua relação com a evolução do clima. O terceiro ocupa-se dos meios para *limitar* a mudança climática. Uma “força tarefa” consagrada ao estudo do problema das emissões *nacionais*

⁸ Estados Unidos, Japão, Alemanha, França, Grã-Bretanha, Canadá, Itália e, recentemente, a presidência da comissão européia.

de gases de efeito estufa foi implementada, em estreita colaboração com a OCDE (Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico) e a Agência Internacional de Energia. A existência dessa “força-tarefa” despertou meu interesse pela OCDE sob o ângulo ambiental. E fiquei muito surpreso ao constatar que, sobre a questão do aquecimento climático, essa organização considera que

*já é muito tarde para ir contra certas modificações do clima causadas pelas atividades humanas. Em outras palavras, os políticos que visam reduzir as emissões de gases de efeito estufa deverão tomar outras medidas que nos auxiliem a adaptar-nos aos efeitos da mudança climática, tais como o aumento da frequência dos fenômenos meteorológicos extremos e a elevação do nível dos mares.*⁹

⁹ LORENTSEN, Lorents. (diretor do meio ambiente). *Stratégie de l'environnement de l'OCDE: La voie à suivre*. L'OCDE L'Observateur, abril 2004.

Ou seja, a OCDE financia uma “força-tarefa” cujo objetivo é o de avaliar, país por país, as emissões de gases de efeito estufa, para estimulá-los a reduzir tais emissões; porém, a mesma organização afirma que já é muito tarde para isso. Qual é o sentido de tal contradição? Trata-se de fato de enraizar no público a idéia da necessidade de se diminuir produção e consumo energéticos de origem fóssil, e de uma necessária regulação mundial dessa produção e desse consumo. Tudo com medidas ecológicas habitualmente preconizadas em matéria de energia nos países desenvolvidos: redução das emissões de gases de efeito estufa (o nuclear ganha muito terreno neste momento), desenvolvimento das energias alternativas e das soluções individuais (arquitetura do tipo “alta qualidade ambiental”, por exemplo). Mas, com uma desconfiança crescente quanto ao desenvolvimento dos países do terceiro mundo: deseja-se muito que se desenvolvessem, mas não utilizando em demasia combustíveis fósseis.

Existe contudo uma relação necessária entre desenvolvimento do terceiro mundo e preocupação com o meio ambiente. Os habitantes do Nepal precisam de madeira comercializável e de combustível. Por isso abatem suas florestas. Na época da monção, ocorrem precipitações muito abundantes e violentas. As águas destroem as encostas que a cobertura florestal empobrecida retém pouco. As águas do Ganges e também do Brahmaputra inundam, de modo às vezes catastrófico, o delta que forma o sul de Bangladesh, com os dramas que já se conhecem: colheitas arrasadas, falta de água potável, cólera.

Entretanto, se os habitantes do Nepal já dispusessem de eletricidade em quantidade suficiente, não precisariam de madeira combustível e, por conseguinte, destruiriam menos

suas florestas. Da mesma forma, as inundações de Bangladesh não apresentariam a dimensão catastrófica evocada. Correlativamente, maior quantidade de carbono atmosférico seria estocada, pois somente se retiraria da floresta a madeira comercializável; e assim menos carbono seria lançado na atmosfera, visto que a madeira deixaria de ser queimada.

Com isso se compreende que a maior ameaça para o planeta está ligada, sem dúvida, menos ao aquecimento climático em si do que à questão de suas conseqüências nas sociedades humanas mais frágeis. Pelo fato de este problema permanecer no nível das meras palavras e não se integrar efetivamente a toda reflexão sobre a mudança climática e o efeito estufa adicional de origem antrópica, condenamos essas sociedades à estagnação, na melhor das hipóteses, e na pior delas, a novos desastres.

Do ponto de vista da produção e do intercâmbio de riquezas, a máquina econômica atual pode parecer eficaz e racional, porque gera lucros. Para nos convenceremos disso, basta acompanhar o volume de transferência de valores negociados quotidianamente nas bolsas, que somadas, ultrapassam a cifra de 1,6 trilhão de dólares americanos por dia. Trata-se, contudo, de uma ilusão, pois tal sistema não pode ser evidentemente durável: o jogo do lucro especulativo contra a criação de riquezas verdadeiras acaba inevitavelmente em crises que os mais humildes sempre pagam. Os economistas sabem disso e ainda assim continuam a apostar no mesmo engodo: o surgimento de mecanismos espontâneos de auto-regulação da economia mundial. Como se pode imaginar que uma regulação racional dos investimentos industriais seja capaz de surgir de mecanismos de bolsas de valores, visto que o objetivo dos especuladores não é produzir riquezas, mas garantir benefícios? E assim, todos os dias, as transferências especulativas de divisas representam 50 vezes o valor das transferências de mercadorias.

A questão crucial das relações entre os seres humanos e seu ambiente, que engloba o problema dos efeitos da mudança climática, está portanto estreitamente ligada à questão das relações entre os próprios seres humanos. Se esses relacionamentos forem brutais e destruidores, se a rapacidade, a opressão e a exploração dominarem, teremos aquilo a que assistimos hoje: a miséria para a maioria, a pilhagem e a comercialização da natureza. Inversamente, é permitido imaginar que num mundo onde prevaleçam relações sociais mais justas, alegres e harmoniosas, possam ser criadas condições para uma gestão racional e durável das riquezas do planeta.

Pascal Acot é filósofo, doutor em Letras e historiador da Ciência do Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), França.

acot@univ-paris1.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.



MODELOS CLIMÁTICOS LIMITES DE UM INSTRUMENTO INDISPENSÁVEL

Hervé Le Treut

O caráter inelutável de uma mudança climática associada ao aumento dos gases de efeito estufa constitui hoje um risco cuja realidade é amplamente aceita. As transformações da própria modificação química do planeta estão claras e demonstradas. A unanimidade do mundo científico sobre os perigos que essa evolução continuada poderia acarretar, foi constatada por grupos internacionais, tais como o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), ou por numerosas academias nacionais. Apesar disso, vários dados alimentam desconfianças mais ou menos explícitas, que vêm à tona periodicamente, em debates ou questionamentos públicos. Um desses dados é, por óbvio, a dimensão das conseqüências de tal diagnóstico: o problema do efeito estufa coloca em cheque nosso modo de produção de energia e, portanto, o conjunto de nossos modelos de transporte, de habitação e de consumo. Não é de surpreender que uma questão dessa magnitude suscite suspeitas de toda sorte, e que seja discutida por muitos, sob o prisma de inquietações muito diferentes: temor de uma progressão nuclear, preocupação de se manter a atividade industrial nos setores que consomem energia – por exemplo os transportes. Mas a tudo isso junta-se uma insegurança sobre o conteúdo do dossiê científico que está ligado ao lugar preponderante que representam, no prognóstico das mudanças, os modelos numéricos, os quais nem sempre compreendemos o que são, nem o que trazem em seu bojo.

Modelos climáticos

Os modelos numéricos são indispensáveis, porque o ambiente global de nosso planeta constitui um sistema de grande complexidade, ligando elementos de comportamentos muito diferentes: fluidos atmosféricos e oceânicos, geleiras, solos continentais. Esses diferentes componentes permutam continuamente matéria, energia ou quantidade de movimento, através de processos que podem ser físicos, químicos ou biológicos.

A utilização de modelos numéricos que descrevem esse sistema (que chamaremos a partir de agora de sistema climático) tornou-se imprescindível para um grande número de aplicações e, em particular, para prever a curto prazo o comportamento das mesmas. Mas a modelização numérica representa também instrumento obrigatório para a estimativa das variações climáticas futuras. Tal instrumento é necessariamente imperfeito, contendo numerosas incertezas ou imprecisões. Não obstante esses limites, os modelos permitiram à comunidade científica tomar posição quase unânime sobre a realidade do perigo que representam as transformações climáticas, porque, a despeito de sua incapacidade de realizar previsões quantitativas precisas, constituem um meio excepcional que possibilita organizar a produção científica e conduzir um debate bem argumentado. Apesar do seu uso amplamente partilhado e de sua grande visibilidade na mídia, os procedimentos subentendidos na concepção dos modelos nem sempre são bem compreendidos fora do mundo científico, o que nutre uma desconfiança difusa e leva a questionar periodicamente o justo fundamento dos alertas da comunidade científica.

Uma pergunta freqüentemente dirigida aos autores de modelos climáticos ilustra em parte essa incompreensão: “que tipo de dados vocês consideram em seus modelos?” A idéia amplamente difundida é que os modelos climáticos têm a função de armazenar em computador um inventário de dados do passado para deles obter uma extrapolação futura; daí os debates apaixonados e muitas vezes fora do assunto para saber qual é o papel possível das variações da radiação solar nas recentes mudanças do clima – debates que deixam subentender erroneamente que, da resposta a essa questão, depende a qualidade da previsão dos modelos para o clima futuro.

De fato, se a observação da Terra representou um papel importante para o estabelecimento dos modelos, estes não se baseiam em dados, mas sim em princípios físicos.

Tem-se um método que caminha de certa forma na contracorrente do método científico tradicional, o qual consiste, na maioria das vezes, em reduzir a complexidade do mundo real para isolar dele as leis mais universais possíveis. A constituição dos modelos, ao contrário, baseia-se numa tentativa de recriar a complexidade do mundo real a partir das equações da física, e daí criar um planeta numérico – tão próximo quanto possível de nosso “verdadeiro” planeta – sobre o qual é mais fácil ou mais rápido conduzir experimentações variadas. Assim, os “dados” principais que integram um modelo climático – além de uma descrição do planeta (relevo, distribuição dos tipos de solo, velocidade de rotação...) e das forçantes às quais ele é submetido (insolação) – são as constantes da física: aceleração do campo gravitacional, constante dos gases perfeitos etc.. É claro que isso não é o bastante; outras informações são também necessárias, como veremos, porque a resolução espacial dos modelos é ainda insuficiente e porque seu desenvolvimento não está concluído: a composição química da atmosfera, por exemplo, permanece freqüentemente especificada, porém não calculada. Mas o procedimento requer a criação de um instrumento que se apóie em leis fundamentais, e possa ser utilizado sem modificação para descrever climas diferentes uns dos outros: período atual, máximo glaciário, período quente de 6.000 anos atrás. Logo, os modelos não são facilmente “ajustáveis”; melhorá-los demanda afinar ou completar a representação de processos físicos muitas vezes complexos.

Por outro lado, seria falso e perigoso pensar que a climatologia dinâmica, ou numérica, consiste em integrar leis e equações de toda sorte, em poderosos computadores, confiando cegamente no resultado. As ocorrências atmosféricas e oceânicas são caracterizadas por um grande número de processos que se situam com freqüência em grande escala: organização das circulações tropicais em “células” gigantes de vários milhares de quilômetros, depressão das latitudes médias, monções, grande “correia de transmissão oceânica” que transporta águas quentes e salgadas desde o hemisfério sul até o Atlântico norte, anéis da Corrente do Golfo (*Gulf Stream*), ou oscilações tropicais do tipo El Niño ligando a atmosfera e o oceano. É a existência de circulações organizadas em grande escala que torna a previsão numérica possível. É também a compreensão desses processos que permite consolidar a qualidade e a pertinência dos modelos.

Mas em que consistem precisamente os modelos?

Os modelos levam em conta duas grandes categorias de processos: os intercâmbios de energia, em particular sob forma de radiação eletromagnética, entre a terra, o oceano, a atmosfera e o espaço; e a dinâmica das ocorrências atmosférica e oceânica. As equações correspondentes adquirem caráter discreto a partir dos nós da malha que cobre o conjunto do globo, isto é, são resolvidas tendo como referência cada um dos milhares de pontos dessa malha.

O componente atmosférico, por exemplo, calcula para cada conjunto de centenas de quilômetros, a evolução de parâmetros como o vento, a temperatura, a umidade, a nebulosidade, as precipitações, a água do solo – para citar somente as variáveis principais. O componente oceânico opera cálculos semelhantes numa grade frequentemente mais fina. A escolha dessas grades de resolução depende, em primeiro lugar, da capacidade de cálculo, e portanto da potência dos computadores utilizados, que constituem, assim, o primeiro fator de progresso no campo da modelização numérica. Mesmo que esta se baseie em princípios físicos testados já há muitas décadas, a multiplicação da potência dos computadores por um fator considerável (da ordem do milhão em 15 ou 20 anos) permitiu um progresso contínuo em qualidade e uma abertura considerável dos campos de aplicação dos modelos.

Concretamente, um primeiro conjunto de equações descreve como a energia recebida do sol é compensada por uma energia emitida pelo sistema terra-oceano-atmosfera. A temperatura de superfície do sol é de aproximadamente 6.000°C, e o comprimento de onda dos raios solares estende-se do ultravioleta ao infravermelho próximo, isto é, cerca de 0,3 a 5 micrômetros. O valor da insolação no ponto mais alto da atmosfera (por volta de 1.370 W/m²) foi estimado no último século a partir dos observatórios localizados em grandes altitudes; hoje ela é medida por satélite. Essa energia solar não é absorvida na sua totalidade pela Terra: cerca de 30% são refletidos para o espaço, 50% atravessam a atmosfera e esquentam o solo ou os oceanos, 20% aquecem diretamente a atmosfera. Para devolver ao espaço a energia que recebe do Sol, também a Terra emite radiação eletromagnética, no campo infravermelho, ou seja, numa gama espectral que vai de 5 a 100 micrômetros. A emissão provém da superfície do planeta, mas também de certos gases minoritários da atmosfera – ditos “gases de efeito estufa” – e das nuvens.

O estudo da transferência radioativa na atmosfera constitui um problema físico bem conhecido, mesmo que incertezas ainda subsistam – por exemplo, na presença de nuvens, para as geometrias complexas. O cálculo das equações de transferência radioativa é feito por meio de sistemas de equações simplificadas, os quais se baseiam em cálculos detalhados levando em conta todos os raios espectrais dos diferentes componentes da atmosfera. Essas equações também desempenham um papel central na observação do planeta a partir dos satélites, e são por conseguinte testadas também nesse quadro.

A segunda classe de processos descrita explicitamente pelos modelos diz respeito à circulação em grande escala da atmosfera e do oceano, que decorre sobretudo da rotação do planeta. Apóia-se nas equações da dinâmica dos fluidos, em particular as equações de Navier-Stokes, que descrevem a aceleração de um elemento de fluido submetido a pressões diversas, internas ou externas.

Já há vários anos a combinação dos modelos atmosféricos e oceânicos, que permitem descrever as interações entre a evolução desses dois fluidos, tornou-se uma realidade relativamente bem administrada em grande número de laboratórios. Completar os modelos significa também integrar os outros componentes do sistema climático: granizo, geada, neve, gelo do mar, solos continentais – com a vegetação que estes apresentam e a sua hidrologia associada –, além dos ciclos de elementos que condicionam a composição química da atmosfera, como o carbono ou o nitrogênio. Aproximamo-nos assim de modelos cada vez mais complexos, que se denominam “modelos do sistema Terra”.

Os modelos são utilizados em múltiplos contextos, em que são testados para comprovar sua pertinência. A previsão meteorológica – e agora a previsão oceânica, praticada mais recentemente na França, no quadro do projeto Mercator – experimentou progressos contínuos desde o início dos anos 70, ganhando muitos dias de prazo. A modelização climática consiste em ultrapassar este prazo, deixando o modelo evoluir por um período muito mais longo: o valor do modelo não está agora no seu caráter de previsão, mas na sua capacidade de construir pouco a pouco uma climatologia, ou seja, uma estatística de ocorrências meteorológicas ou oceânicas simuladas. A qualidade dos modelos é o reflexo da qualidade dessa climatologia, que se foi ampliando no correr dos anos: os modelos de hoje representam com muita fidelidade as grandes características das ocorrências atmosféricas e oceânicas, como também

suas flutuações sazonais ou interanuais (o que constitui um primeiro teste importante para os modelos – de todas as mudanças climáticas, as estações são as mais rápidas e as que podem ser melhor observadas). Os modelos numéricos são também utilizados com sucesso para simular condições climáticas passadas, ou ainda ocorrências atmosféricas em outros planetas, tais que Marte ou Vênus.

Enfim, dispomos de modelos que apresentam forte base física e que concentram um considerável conjunto de conhecimentos. Entretanto, é preciso ter em mente certo número de limitações e incertezas que vamos detalhar a seguir.

Pode-se identificar três famílias de problemas

A primeira é intrínseca ao próprio sistema climático e não se apresenta simplesmente como um sistema inteiramente previsível. Essa característica está associada a uma propriedade matemática das equações, que não são lineares, e misturam as escalas de tempo e espaço. É, aliás, por isso que não podem ser resolvidas de maneira analítica, e que o recurso ao computador é indispensável. Há assim um limite de previsão particularmente curto para o componente atmosférico: ao cabo de um prazo de dez dias aproximadamente, a evolução meteorológica não pode mais ser prognosticada, porque o caráter instável das ocorrências já fez repercutir no conjunto do globo um pequeno erro inicial. Trata-se de efeito muito conhecido, descoberto por Edward Lorenz em 1963, popularizado pelo nome de “efeito das asas de borboleta” e significando que toda perturbação, por mínima que seja, modifica irreversivelmente a história da atmosfera. Certos componentes do sistema climático, tais como a vegetação, apresentam igualmente uma complexidade intrínseca que resulta sobretudo da diversidade dos processos que entram em competição; assim, é impossível prever com segurança a evolução de todas as essências de um maciço florestal e seu conseqüente impacto climático. Mas tais incertezas não significam que nenhuma informação sobre a evolução do clima possa ser obtida. Diversos processos guiam também os movimentos da atmosfera ou da vegetação, e organizam seu comportamento. Alguns são externos ao sistema climático, como as flutuações da radiação solar que incidem, por exemplo, em escala sazonal, ou as emissões de gases de efeito estufa pelas atividades humanas. Outros são internos e correspondem aos componentes lentos do sistema climático, como o oceano ou as grandes

geleiras, que organizam sua evolução em escalas que vão de alguns anos (para as combinações do oceano tropical com a atmosfera) a alguns milhares de anos.

Esse comportamento parcialmente caótico do sistema climático é inteiramente assumido pela comunidade científica como uma limitação que afeta a maneira pela qual são conduzidas e interpretadas as experimentações numéricas. Menos do que uma tentativa de previsão, o que a modelização propõe é mais um estudo de risco, que consiste em submeter o pequeno planeta numérico ao mesmo aumento de gases de efeito estufa que começa a afetar o planeta real, e prosseguindo ou repetindo a experiência pelo tempo que for necessário, chegar a estabelecer uma estatística dos efeitos induzidos. Tal experiência exige que seja repetida numerosas vezes para se conseguir vislumbrar o leque das consequências possíveis. Essa variabilidade do sistema climático, que faz com que se apreenda a sua evolução apenas de maneira estatística, complica a relação entre modelos e dados ou a própria interpretação dos dados. Se é cada vez mais difícil explicar o aquecimento global das últimas décadas de outra forma que não seja a de uma resposta à ação dos gases de efeito estufa, o nível de certeza em relação a este diagnóstico aumenta regularmente, mas jamais será total. Do mesmo modo, é ainda impossível associar por relação causal acontecimentos que permanecem isolados, como a canícula do verão de 2003 à mudança climática em curso. Porém, inversamente, a variabilidade interna de nosso sistema climático apresenta uma tal amplitude que, no dia em que estivermos aptos a fornecer uma prova estatística da realidade da mudança climática, os efeitos desta já serão consideráveis.

Uma segunda fonte de incertezas corresponde às simplificações inevitáveis que ocorrem na construção dos modelos, particularmente por causa do espaçamento muito grande dos nós da já referida malha. A dificuldade de representação das nuvens é um exemplo: elas são originadas de movimentos do ar de pequena escala, que vão de algumas centenas de metros a alguns quilômetros, movimentos cuja representação explícita nos modelos está fora de cogitação; elas constituem o lugar de um desprendimento de calor latente intenso, que resulta da condensação da água, perturbando a radiação solar e a radiação infravermelha de uma forma que depende muito do tamanho das gotas de água ou dos cristais de gelo. Diante de tanta complexidade – haveria outros exemplos, relativos aos gelos do mar, à vegetação ou à hidrologia continental – a modelização é necessariamente

simplificadora. Isso não quer dizer que ela seja simplista, mesmo porque a representação das nuvens nos modelos foi objeto de muito trabalho (incluindo medições por avião ou satélite) para servir de base a uma descrição estatística dos processos de formação das gotas de água, dos movimentos do ar úmido, ou da precipitação. Porém, as nuvens representam um dos fatores capazes de acelerar ou refrear a evolução do clima, e da complexidade desses processos resulta uma certeza cuja importância pode ser avaliada comparando-se o desempenho dos modelos que foram implementados de maneira independente em diferentes instituições científicas do mundo inteiro. Os resultados, em resposta a um desdobramento do CO₂ atmosférico, por exemplo, situam-se numa faixa que vai de 1,5 a 5°C de aquecimento global, por razões que remetem exclusivamente à construção dos modelos, e que não são minoradas com o passar dos anos, apesar do aperfeiçoamento do seu conteúdo físico. Do mesmo modo, apesar de grandes tendências bem estabelecidas – como o fato de o aquecimento de superfície ser mais intenso nas altas latitudes e no inverno, ou o fato de as variações do ciclo hidrológico serem mais intensas nas regiões tropicais –, os modelos não chegam a fornecer uma informação local coerente. No presente caso, a complexidade dos mesmos remete à do mundo real, e suas fraquezas persistentes são o reflexo dessa imprevisibilidade parcial do mundo real assinalada acima. Vários indícios mostram contudo que a gama dos modelos desenvolvidos em nível mundial permite, sem dúvida, que se obtenha de modo conveniente uma amostragem do conjunto dos climas possíveis, e em particular o fato de que em todos os exercícios verificáveis a média dos modelos seja o melhor dos modelos. Por outro lado, se nossa capacidade de validá-los ao término de um processo sensível não é ainda completamente utilizada, essa capacidade aumenta sem cessar com a disponibilidade de novos dados obtidos por satélites.

Um terceiro fator vem limitar o alcance prático dos modelos: foi só recentemente que permitiram uma descrição do sistema climático completo. Os modelos, com frequência, são ainda físicos, negligenciando os componentes biológicos ou químicos do sistema, cujo papel essencial aparece cada vez mais claramente. Os aerossóis sulfurosos, por exemplo, foram reconhecidos como um dos fatores importantes capazes de mascarar, ao menos no hemisfério norte, as manifestações iniciais do efeito estufa. O teor atmosférico em CO₂ depende também de um ciclo complexo no qual

intervêm ao mesmo tempo a formação do fitoplâncton ou do zooplâncton nos oceanos, e a fotossíntese ou a respiração da vegetação continental. Sabe-se que apenas a metade do CO₂ emitido pelas atividades humanas permanece na atmosfera, sendo o resto retomado pelos oceanos ou pela biosfera continental. Os primeiros ensaios sobre o modelo do IPSL (*Institut Pierre-Simon Laplace*) na França ou do *Hadley Center*, na Grã-Bretanha, mostraram que essa parte podia evoluir com o clima. A consideração desse fator (potencialmente agravante para o aquecimento do planeta) requer o emprego de modelos muito mais complexos, combinando representação do clima e do ciclo do carbono. A química do metano, do ozônio, constitui também um conjunto de processos complexos que integra pouco a pouco os modelos, para formar o que se chamou de modelos do sistema Terra.

A acumulação desses fatores de incerteza torna sem dúvida ilusória, no momento, a previsão detalhada de uma evolução do clima futuro. Poder-se-ia mesmo dizer, forçando a expressão, que quanto mais a pesquisa avança, tanto mais se revela a enorme complexidade dos processos que participam da evolução do nosso meio ambiente, e mais se afasta a possibilidade de prever em detalhe a evolução futura do clima. Mas, ao mesmo tempo e de maneira aparentemente contraditória, a capacidade de conhecimento face a esse sistema aumentou consideravelmente, e o nível de certeza quanto à realidade do aquecimento futuro tornou-se muito maior. Em todos os debates em curso, os modelos serviram como um instrumento que permitiu estudar as propostas de mecanismos estabilizadores no seio do sistema climático, e apreciar a eventual importância das mesmas. A variedade dos processos cujo papel foi avaliado qualitativamente, é hoje ainda maior. Assim, constitui uma indicação poderosa o fato de que os modelos sempre mais numerosos e sofisticados informam sem exceção sobre um aumento importante de temperatura no futuro. A despeito da complexidade do sistema estudado, da diversidade dos países e instituições engajadas na pesquisa do clima, da diversidade dos modelos, do efeito da enorme publicidade vinculada a um trabalho de tal monta, ninguém conseguiu realizar uma experiência numérica confiável, capaz de levar o sistema climático a não se aquecer como resposta ao aumento dos gases de efeito estufa. Isso não tem valor de prova absoluta, mas faz recair o ônus da prova sobre aqueles que afirmam que o clima não pode mudar por causa das atividades humanas.

O papel da modelização climática também se deslocou. Apesar das limitações de sua capacidade de previsão, os modelos constituem instrumentos muito especializados que permitem aumentar o debate público, e fazer face a novas questões. Como se pode comparar o papel dos diferentes gases e das diferentes emissões dos mesmos? Em que velocidade a observação das modificações em curso poderá reduzir as incertezas? Nesse contexto, é muito importante preservar uma diversidade suficiente de modelos construídos e gerenciados de maneira independente, isso porque, em nível científico, a dispersão dos resultados obtidos representa uma das poucas medidas da incerteza dos resultados, e também porque o fato de se dispor de modelos confiáveis torna-se um trunfo estratégico em todas as negociações internacionais.

O painel que acabamos de esboçar apresenta-se cheio de contrastes. A unanimidade qualitativa dos resultados obtidos pelos modelos relativamente ao aquecimento futuro é real, convincente, mas continua acompanhada de dificuldades para traçar um perfil preciso das mudanças que estão por vir, dificuldades que poderão ser reduzidas, mas jamais eliminadas, pois refletem a grande complexidade do mundo real. Devemos tirar as conclusões justas dessa situação. Por um lado, os modelos numéricos constituem o único instrumento capaz de organizar toda a informação disponível, e portanto os debates científicos e políticos, num quadro rigoroso, que leve em conta as pressões das leis da física (assim como o conjunto dos processos químicos ou biológicos que participam das evoluções em curso). Por outro lado, é preciso reconhecer e admitir que estamos confrontados com um problema de gestão global de nosso ambiente, onde o fator climático não pode ser isolado de outros problemas que são também planetários: recursos hídricos, acesso às diferentes formas de energia, especialmente nuclear, proteção da biodiversidade, contrastes Norte-Sul, preocupação de se equilibrar uma solidariedade imediata com uma solidariedade entre gerações. Todos esses problemas estão intrinsecamente ligados e sua avaliação é, em cada caso, tributária de formas de incerteza ou de desconhecimento freqüentemente muito diferentes. A ciência sozinha, sem o auxílio de uma reflexão ética, filosófica, política, sem um verdadeiro debate cidadão sobre essas questões, não poderá arbitrar entre as diversas escolhas possíveis que dizem respeito ao nosso futuro.

Hervé Le Treut é doutor em Ciências e pesquisador do Laboratoire de Météorologie Dynamique do Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), França.

Herve.LeTreut@imd.jussieu.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.



O AQUECIMENTO CONTEMPORÂNEO ENTRE CERTEZA, CONTROVÉRSIA E DÚVIDA

Martine Tabeaud

Do ciclone Katrina às tempestades de 1999 na Europa, todo fato meteorológico excepcional é hoje em dia vinculado à mudança “global”, ou melhor, seria prova desta. Contudo, a mudança climática, frequentemente apresentada como um fenômeno indubitável, continua objeto de controvérsia. Alguns especialistas recusam o alarmismo associado ao aquecimento, outros contestam os resultados dos modelos, os céticos quase não se fazem escutar, seus propósitos são às vezes caricaturados. Para Diderot, entretanto, “a dúvida é o primeiro passo em direção à ciência ou à verdade; aquele que não discute nada não se certifica de nada; aquele que não duvida de nada não descobre nada”. Tentemos, portanto, resumir as posições dos céticos, numerosos na comunidade dos geógrafos, da qual eu faço parte.

I

Uma questão central: a temperatura da atmosfera planetária

1. A medição e o recuo no tempo

A meteorologia científica surgiu há três séculos com a invenção do termômetro. Logo, trabalhar com a temperatura na escala de milhares de anos pressupõe reconstituir as temperaturas de lugares precisos, variados, a fim de deduzir uma média planetária. Para recuar no tempo para além dos registros dos aparelhos de medição, buscaram-se marcas deixadas nos sólidos: os sedimentos e as formas de relevo que herdamos, os anéis de crescimento das madeiras, os gases aprisionados nos gelos, a densidade óssea dos esqueletos ou sua riqueza em isótopos. Esses indicadores possibilitam reconstituir o meio no qual se formaram. Os conhecimentos sobre a radioatividade aplicada a constituintes como o C_{14} , K_{40} , Ar_{40} , C_{137} , O_{18} , permitem até datá-los. Na escala dos tempos históricos, as temperaturas são reconstituídas a partir de fontes indiretas: biomarcadores, documentos escritos, pinturas, gravuras etc. Mas os traços são espacializados (escala da parcela) e territorializados (papel dos agentes). Além disso, os marcadores biológicos só refletem a mudança climática com um deslocamento temporal, em função de sua mobilidade peculiar, de seu modo de reprodução etc. Somente a sucessão de todas as estações meteorológicas pode definir um clima. As informações mais frequentes remetem apenas a uma estação, ou mesmo a uma ocorrência excepcional. Nos arquivos, por exemplo, mais que o fato aleatório, é o risco que se menciona. Ora, a vulnerabilidade de uma sociedade muda conforme o lugar, e de uma época para outra. Muitos indícios localizados e coincidentes são necessários para reconstituir um ambiente climático que extrapole a escala local, e é inegável que a imprecisão cresce quando se remonta ao passado.

Os primeiros termômetros começam a se difundir no século XVII; uma rede européia de estações meteorológicas é construída em 1780, contudo, em meados do século XIX, a rede francesa, por exemplo, conta com 24 estações apenas. É com o progresso da aviação militar e depois civil que as estações se multiplicam nos aeroportos. Hoje existem oito vezes mais. Porém, a rede não é tão densa em alguns países pobres ou pouco povoados. Por outro lado, quase $\frac{3}{4}$ do planeta são cobertos por oceanos, onde as bóias fixas são raras e as medições realizadas pelos navios mercantes

localizam-se nas rotas marítimas. As imagens obtidas por satélite, que surgiram por volta de 1960, proporcionam um complemento apreciável, mas não permitem investigações sobre períodos mais longos. Por conseguinte, existem algumas poucas séries longas remontando a um passado mais longínquo (Pádua, Paris...). Além disso, as estações apresentam um problema quanto ao ambiente que as cerca. Em fins do século XIX, ainda eram rodeadas por espaços não construídos. As temperaturas assinaladas eram bem pouco influenciadas pelas ilhas de calor urbano, enquanto que hoje estas se localizam no coração das aglomerações. Em Paris Montsouris, se as máximas são estáveis, as mínimas mostram um aumento contínuo, atingindo até +1,1°C numa comparação com as médias de 1931-60 e 1971-2000. A diferença centro-periferia é de 1 a 2°C em média. Para o IPCC¹, a contribuição do efeito das múltiplas ilhas de calor urbano para o aumento planetário da temperatura é fraca, da ordem de 0,05°C. Contudo, não se pode negar que a partir do fim da Pequena Era Glacial, desde a metade do século XIX, a expansão urbana só fez amplificar a elevação térmica. Assim, o papel da urbanização na elevação geral da temperatura é sem dúvida minimizado.

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. HOUGHTON, J. T. *et al.* (eds.). *IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2001.

2. Uma variabilidade com múltiplas causas

O sistema climático não é e nunca foi isento de variações. O clima atual representa apenas uma situação provisória, expressão de um equilíbrio dinâmico ao mesmo tempo frágil e bastante complexo. Os componentes desse sistema interagem a velocidades por vezes muito diferentes: por exemplo, às mudanças atmosféricas rápidas corresponde uma circulação oceânica lenta, dotada de uma forte inércia.

Muitas causas encontram-se na origem das mudanças climáticas. É comum distinguir, entre elas, as qualificadas de internas – específicas do planeta Terra, como a deriva dos continentes, que define a repartição das terras e dos mares, o levantamento das cadeias de montanhas, as erupções vulcânicas, a atividade da biosfera marinha e continental – e as denominadas externas – tributárias da emissão solar ou da radiação recebida pelo planeta.

O planeta sofre, portanto, variações naturais de temperatura, periódicas ou não. Sua temperatura média oscila naturalmente entre +10 e +16°C. Desde o surgimento da vida na Terra, sua temperatura permaneceu bastante estável, e próxima da temperatura atual de 14°C. Na escala de milhares de anos, as altas e as baixas deveram-se aos ciclos orbitais de Milankovic, isto é, à posição da Terra em relação

ao Sol. A insolação recebida durante os 400.000 últimos anos explica as quatro alternâncias glaciária/interglaciária. Os ciclos permitem afirmar também que a próxima glaciação começará dentro de 40.000 anos. As variações plurisseculares das manchas solares que modificam a intensidade da emissão podem igualmente explicar a Pequena Era Glacial dos séculos XV ao XIX (mínimo de Maunder). Em relação aos dois ou três séculos de temperaturas brandas que a precederam, caracteriza-se por um claro resfriamento de 1,5°C no verão da Europa, e por uma pluviometria constante. O frio parece ter conhecido duas máximas, uma no século XVII durante o reinado do Rei Sol, e outra no começo do século XIX. Na América do Norte, a segunda foi mais marcada que a primeira. Certos glaciares alpinos recuaram a partir de 1820, mas os verões permanecem úmidos (com flagelos de fome na Irlanda, de 1846 a 1851). A partir de 1880, o clima esquenta em todos os lugares: é o término da Pequena Era Glacial. Ademais, cada grande período não é uniforme. Por exemplo, na Europa, a cada trinta anos, de maneira cíclica, os invernos apresentam características que modificam as médias anuais. Ora os invernos são dominados pelo frio rigoroso e pela escassez de precipitações (como nos anos 1950), ora pelo caráter ameno associado ao vento e à chuva (como nos anos 1990). Causas naturais, como as erupções vulcânicas, podem modificar durante alguns meses o clima de uma zona, e mesmo de um hemisfério. O “ano sem verão” que se seguiu à explosão do vulcão Tambora (Indonésia), em 1815, foi caracterizado na Europa por chuvas continuadas. A essas causas naturais, em escalas finas, juntam-se os efeitos das construções urbanas, dos desmatamentos, das drenagens...

Na realidade, todos os fatores interagem incessantemente, mas com um peso relativo que depende da escala espaço-temporal adotada na análise. Nessa conjugação de escalas, o recorte temporal opera-se conforme as durações extremamente diferentes que se podem escalonar, desde a década até dezenas de milhões de anos. Em resumo, a abordagem em múltiplas escalas é indispensável para desenredar o complexo novelo do sistema climático.

3. Uma incontestável elevação da temperatura global desde há um século

Apesar das dificuldades inerentes aos aperfeiçoamentos sucessivos dos aparelhos de medição e à repartição desigual das estações de medição nos diferentes continentes, os métodos estatísticos de homogeneização dos dados

evidenciam uma elevação das temperaturas de todo o planeta que data do último século. O aumento é estimado em $0,6^{\circ}\text{C}$ e resulta principalmente de uma elevação das mínimas noturnas. Esse aumento é regular no hemisfério austral e só aparece no hemisfério boreal a partir dos anos 1920. A década de 1990-1999 foi a mais quente desde o começo do período dotado de instrumentos de medição e talvez a mais quente desde o *optimum* medieval. Os anos recentes apresentaram-se como os mais quentes desde 1860, e isso apesar do efeito de resfriamento causado pela erupção vulcânica do Pinatubo (Filipinas), em 1991.

O período atual distingue-se incontestavelmente por um aquecimento que deveria confirmar-se nos próximos cinquenta anos. No entanto, o aquecimento recente não excede por enquanto a variabilidade “natural” do Holoceno, numa faixa de $+2^{\circ}\text{C}$ a -1°C . Logo, a origem da elevação constatada nos últimos 150 anos é discutível: será ela totalmente dependente da atividade solar, ou em parte associada às atividades humanas? Assim, não é o aquecimento contemporâneo que está em debate, é a sua origem. Em outras palavras, será tal elevação de temperatura um fenômeno sem precedente e portanto anormal?

4. Uma questão de norma?

Com base em que período de duração aconselha-se calcular as médias das temperaturas para definir valores de referência? A série de dados deve ser plurianual, a fim de anular os valores excepcionais, mas deve também levar em consideração a evolução permanente do clima. A OMM (Organização Meteorológica Mundial) definiu então períodos de 30 anos como suficientes e satisfatórios. O valor médio de toda grandeza referente a tal período é chamado “normal climatológica”, nesse lugar específico, para o dito período. A OMM recomenda escolher períodos como 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990, 1991-2020, que definem a sucessão das normais climatológicas padrões para efetuar comparações entre estações de medição, entre regiões e entre períodos trintenários. Assim, o termo “normal” se presta a confusão, pois não possui o mesmo sentido que o da linguagem comum. Sua significação em climatologia não prejudica em nada a distribuição normal ou gaussiana da grandeza considerada.

O período de 30 anos que serve de cálculo às normais aplica-se às escalas espaciais locais, e mesmo regionais. Essas normais são definidas para permitir avaliar a evolução do clima. Portanto, duas médias sucessivas para a mesma

grandeza num mesmo local são diferentes. Na perspectiva da longa duração, qual é a mais pertinente? Isso porque o clima de uma zona, ou de uma porção de continente mostra variabilidades pluridecenais, plurisseculares etc. que influenciam nas médias. As diferenças em relação à normal definida para toda a série, ou para um período trintenário como 1961-90, ou para um outro período de trinta anos, apresentam-se modificadas em alguns décimos de °C.

As curvas plurisseculares, como a de Mann², que figura no relatório do IPCC, são contestadas por seu perfil dito “em bastão de hóquey” e pelo caráter quase estacionário do clima anterior ao da época atual. A variabilidade das temperaturas anteriores ao século XX é muito fraca. Se a Pequena Era Glacial apresenta-se com menos de 0,5°C de diferença em relação ao presente, o *optimum* medieval afasta-se muito pouco dessa marca. Tal constatação não deixa de ser estranha. Von Storch³, por exemplo, utilizou regressões para reconstituir uma curva de temperatura sobre 1.000 anos, a partir de medições e reconstituições em sítios bem documentados pela paleoclimatologia. Os resultados mostram que a curva de Mann subestima em muito a variabilidade a médio e longo prazos e que dessa forma ela apaga a variabilidade dos séculos passados para superestimar a do presente.

O relatório do IPCC de 1995 indica que “um feixe de elementos sugere que existe uma influência perceptível do homem sobre o clima global”. Assim, para o conjunto de pesquisadores que assinam o relatório, a elevação da temperatura é considerada fora da norma.

II

Uma relação determinante: o efeito estufa e a temperatura

1. Os gases de efeito estufa em proporções desiguais

Se a atmosfera é transparente à radiação do sol, certos gases ditos “de efeito estufa” têm a propriedade de absorver a radiação infravermelha reemitida pelo solo. Esse efeito estufa é benéfico: aumenta em 32°C (+14 ao invés de -18°C) a temperatura média da atmosfera planetária. Os principais gases de efeito estufa são o vapor d’água, o dióxido de carbono (CO₂), o metano, o óxido nitroso e os clorofluorcarbonos. Nem todos possuem a mesma capacidade de absorção dos raios infravermelhos nem a mesma duração de vida na atmosfera. Sua eficácia quanto ao processo de

² MANN, M. E.; BRADLEY, R. S. & HUGHES, M. K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 392, 779-787, 1998.

MANN, M. E.; BRADLEY, R. S. & HUGHES, M. K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties and limitations. *Geophysical Research Letters*, 26, 759-762, 1999.

MANN, M. E. & JONES, P. D. Global surface temperature over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2003 Glo 17814.

³ VON STORCH, H. *et al.* Reconstructing past climate from noisy data. *Science*, 306, 679-682, 2004.

efeito estufa é variável. É o vapor d'água o maior responsável pelo efeito estufa, representando 3 a 4% dos gases atmosféricos. O teor desse vapor na atmosfera depende principalmente da eficácia do ciclo da água, ela própria comandada pela temperatura. Quando o planeta está quente, os oceanos são mais vastos e a evaporação aumenta, tendo em vista que o ar quente armazena mais vapor d'água. Na segunda posição dos gases de efeito estufa se encontra o CO_2 , representando apenas cerca de 0,03% dos gases atmosféricos, ou seja, 100 vezes menos que o primeiro. Contudo, a modelização do clima futuro é efetuada com o CO_2 e não com o vapor d'água, muito mais complexo para ser computado.

2. A correlação CO_2 /temperatura planetária

A partir de testemunhos de gelos da *inlandsis*⁴ antártica extraídos das amostras de Vostok⁵, glaciologistas constataram que, desde 400.000 anos atrás, existe uma correlação estreita entre as temperaturas médias deduzidas dos isótopos estáveis de O_2 e os teores de gases de efeito estufa. Nessa escala de tempo, a covariação dos períodos glaciários/interglaciários ficou estabelecida.

Ora, no século XIX, sábios como Tyndall e principalmente Arrhenius tinham calculado que, se o CO_2 desaparecesse da atmosfera, a temperatura diminuiria em 21°C e que, ao contrário, se a concentração dobrasse, a temperatura aumentaria em 4°C . Isso parecia então uma solução técnica para postergar a próxima era glaciária.

Em 1957-58, por ocasião do terceiro ano geofísico internacional, o americano Charles Keeling mede no Havaí, pela primeira vez, o teor de CO_2 do ar. O Havaí é uma região de forte atividade vulcânica e o CO_2 figura entre os três principais gases emitidos nas erupções (com H_2O e o anidrido sulfuroso), o que torna suspeita a representatividade planetária desse sítio. Mas a idéia da relação entre CO_2 e temperatura do planeta permaneceu. O teor de CO_2 foi reconstituído a partir de bolhas de ar retidas nas amostras de gelo para o período anterior a 1958. Segundo essa curva, antes do século XIX o CO_2 era estável em cerca de 3%, considerando-se um teor de volume de 0,028%, ou seja, 280 ppmv.

Em 1958, as concentrações medidas são de 315 ppmv; elevam-se a 330 ppmv em 1974, e a 360 ppmv em 1995. É a prova de que localmente o teor de CO_2 aumenta. Esse gás que, segundo o IPCC, “contribui em 64% para o efeito estufa”⁶, explicaria a elevação térmica concomitante.

⁴ *Inlandsis*: termo escandinavo que designa extensões continentais de gelo, como a *inlandsis* da Groenlândia e a *inlandsis* antártica. N. T.

⁵ A estação russa de Vostok localiza-se no setor leste do continente Antártico, a uma altitude de 3.488 metros acima do nível do mar, onde a temperatura média anual é de -55°C . Em 1957, ano internacional da geofísica, os soviéticos ali se estabeleceram para estudar, entre outras coisas, o quadro evolutivo das temperaturas globais, a partir de amostras provenientes de testemunhos de gelo obtidos por meio de perfurações profundas. No início dos anos 70, em tempos de guerra fria, os americanos realizaram a perfuração de Byrd, que atingiu 2.138 metros de profundidade. De qualquer modo, o pioneirismo científico de Vostok foi responsável pelo primeiro registro de variação de temperaturas globais cobrindo 150.000 anos e pelas importantes descobertas que vieram depois. N. T.

⁶ 64% dos gases de efeito estufa, excluindo o vapor d'água.

Os gases de efeito estufa, desde o início da era industrial, teriam aumentado a energia recebida pelo planeta em 2,45 W/m². A covariação torna-se rapidamente lei de causa e efeito, visto que, em 1972, no fim do período de crescimento conhecido como os “Trinta gloriosos”⁷, a curva de Keeling é divulgada pela primeira vez, pelo relatório Meadows (*Os limites do crescimento*), comandado pelo Clube de Roma.

⁷ “Trente glorieuses” (années): “trinta gloriosos” (anos); expressão cunhada pelo sociólogo Jean Fourastier para designar o período de modernização e de crescimento econômico sem precedência, vivido pela França a partir do pós-guerra (1945-1975). N. T.

3. A virada de 1850: o fim da Pequena Era Glacial e a Revolução Industrial

Por volta de 1850 instaura-se um período-chave: é o começo das medições de temperatura, o fim da Pequena Era Glacial, o início da elevação térmica planetária, o aumento dos gases de efeito estufa e a Revolução Industrial na Europa. O sincronismo entre esses fatos teve grande influência na afirmação da relação entre a liberação de gases oriundos da combustão das energias fósseis e a elevação das temperaturas.

Em meados do século XIX, o carvão é o combustível mais utilizado para a indústria, os transportes e o aquecimento. A produção é de 100 milhões de toneladas em 1865, cresce até 1913 para declinar em seguida, pois a invenção do motor elétrico põe fim ao uso industrial do carvão. Ora, 1 tonelada de petróleo produz apenas 76% do CO₂ produzido por 1 tonelada de carvão. O consumo europeu é de 75% em 1872, de 50% em 1900. As cidades industriais localizam-se unicamente na Europa e nos Estados Unidos, portanto no hemisfério norte. Concentram muitas vezes sítios de caldeiras que as tornam célebres por seu “smog” local. A difusão da poluição abrange poucas distâncias. A partir daí, fica difícil imaginar que imediatamente após a Revolução Industrial toda a troposfera tenha podido modificar-se tão depressa, inclusive para além do equador meteorológico até o Antártico, o que pressupõe intervalos improváveis em razão dos ventos sinóticos.

4. A temperatura determinando os teores dos gases de efeito estufa?

A experiência banal de abertura de uma garrafa de água gaseificada (gaseificação produzida pela adição de CO₂) sob diversas temperaturas, mostra bem a instabilidade da reação química CO₂ + H₂O = > H₂CO₃ (ácido carbônico). O CO₂ será tanto menos solúvel quanto maior for a temperatura, e inversamente para a pressão. Não poderíamos

imaginar que o aquecimento pós-glaciário tivesse como consequência uma liberação de gás aprisionado, o que foi observado após cada glaciação. Daí decorre que a temperatura controla a composição química da atmosfera. Isso permite explicar porque os teores dos gases de efeito estufa eram 4 vezes mais elevados há 100 milhões de anos, porque eram constantes durante o *optimum* medieval ou a Pequena Era Glacial, e porque os períodos de recessão econômica do século XX não podiam ser lidos pela curva do CO₂.

O teor atual “inédito” de CO₂ deveria continuar a subir, tendo em vista que esse gás possui uma duração de vida de 100 anos na atmosfera, para estabilizar-se no coração do período interglaciário em que vivemos. Quanto aos modelos dos físicos, baseiam-se em vários níveis de emissões e projetam concentrações ao redor de 500 ppmv para 2050-2060, podendo atingir 950 ppmv em 2.100. Ao mesmo tempo, dentro de 100 anos, o aumento de CO₂ cessará pela vontade de não mais se consumirem energias fósseis ou pela carência de matéria-prima (esgotamento das reservas avaliadas em 40 anos para o petróleo, 60 anos para o gás...). Portanto, é possível que a taxa de CO₂ diminua novamente dentro de alguns séculos.

III

Uma comunicação em sentido único: interrogar-se ou caricaturar?

O aquecimento climático, mudança inédita ou não, encontra-se no centro dos problemas que nossas sociedades terão de enfrentar em termos de meio ambiente nas próximas décadas. Isso confere ao fenômeno climático uma dimensão socioeconômica e política inegável.

1. A idéia de uma mudança

Sugerir que hoje as atividades humanas começam a ter influência sobre o clima coloca o homem e os grupos sociais numa posição inédita face à questão climática. Se desde o início da história da humanidade eles apenas vinham sofrendo as consequências do clima, agora se tornaram seus agentes, mesmo que involuntariamente. A visão ocidental do homem todo poderoso perpetua de uma outra maneira as ideologias marxistas, constituindo elas próprias resultado da filosofia iluminista. Conforme escreve Boia⁸,

não há nenhum segredo no fato de que o cataclisma climático seja hoje anunciado por aqueles que não crêem nas virtudes da civilização tecnológica. E contestado

⁸ BOIA, L. *L'homme face au climat*. Paris: Les Belles Lettres, 2004.

não menos vigorosamente pelos partidários desse tipo de civilização. Ecologistas contra liberais: uns e outros manipulam os mesmos dados, mas colocados a serviço de ideologias opostas. Seus cenários se inscrevem... em esquemas históricos... que não foram inventados hoje: de um lado, o Progresso..., de outro, o espectro da decadência...

Após a Conferência do Rio, que se seguiu ao desastre de Chernobyl, o debate científico sobre a origem do aquecimento saiu do campo dos embates acadêmicos para tornar-se uma questão política, estratégica. O parágrafo inicial da introdução ao relatório do IPCC esclarece o seu posicionamento:

⁹ WMO: World Meteorological Organization.
UNEP: United Nations Environment Programme.

O IPCC foi estabelecido pela WMO e pelo UNEP⁹ em 1988. O objetivo era, e continua sendo, proporcionar o acesso à compreensão de todos os aspectos da mudança climática, incluindo o modo como as atividades humanas podem causar tais mudanças e sofrer o impacto das mesmas. Tornou-se de amplo conhecimento público que as emissões de gases de efeito estufa provocadas pelo homem têm o poder de alterar o sistema climático...

2. Um empreendimento de comunicação científica sem precedência

A divulgação de todo saber a respeito da mudança climática tem sido objeto de uma preocupação sem equivalência, e talvez sem precedência na pesquisa científica. O que não pode ser explicado tão só pelo caráter planetário do risco. Em primeiro lugar, o IPCC produz a cada cinco anos uma síntese do estado dos conhecimentos – a mais recente, em três enormes volumes, foi publicada pela Cambridge University Press, em 2001 (*The scientific basis*, 881 p., *Impacts, adaptation, and vulnerability*, 1.032 p., *Mitigation*, 762 p.). Os relatórios podem ser acessados via Internet, bem como os resumos de uma centena de páginas. Além disso, milhares de sites resumem, expõem, discutem as sínteses do IPCC em várias línguas: inglês, francês, espanhol, chinês, russo, japonês... De trinta anos para cá, artigos divulgados em revistas de climatologia e livros sobre a mudança climática representam provavelmente milhares de páginas. Revistas foram criadas especialmente para veicular o “novo saber” (*Climate Change*, por exemplo, que se define como *An Interdisciplinary, International Journal Devoted to the Description, Causes and Implications of Climatic Change*, publicada em 1977 pela Springer Verlag; e em língua francesa, *La Lettre “Changement Global”*, produzida pelo

¹⁰ CNFCG: Comité National Français du Changement Global

¹¹ GES: gaz à effet de serre (gases de efeito estufa). N. T.

CNFCG¹⁰, em 1994, ou *L'Usine à GES*¹¹ em 2004, entre outras). No que diz respeito aos livros, pelo menos quatro ou cinco “grandes” títulos são lançados a cada ano pelas principais editoras francesas.

Falar assim da mudança climática denota um empreendimento bem concertado, permitindo que se possa organizar uma transferência de conhecimentos dos especialistas no assunto para a sociedade civil.

3. *Um optimum de conseqüências somente negativas?*

A imagem positiva do aquecimento do clima deteriorou-se rapidamente no decurso dos últimos vinte anos. Entre as obras mais recentes, numerosos são os títulos que falam por si: *Terre, fin de partie* (2005), *Le climat est-il devenu fou?* (2002), *Climat: chronique d'un bouleversement annoncé* (2004), *Climat ça va chauffer!* (2004), *Le climat: jeu dangereux* (2004), *Le grand dérèglement du climat* (2005) etc.¹² Contudo, no passado, os períodos quentes eram chamados de *optimum*.

Os estudos mostram que durante os períodos quentes as sociedades ultrapassam seus limites. A amenização da temperatura ocorrida no período pós-glaciário, no Oriente Médio, e sem dúvida também em outros lugares, permitiu a passagem à agricultura. Com a domesticação das plantas e dos animais, os mesmos territórios puderam alimentar populações mais numerosas. Na Europa, registrou-se uma revolução tecnológica, com a idade do bronze e o desenvolvimento do uso da escrita. Da mesma forma, do século X ao XIII, na Europa, o *optimum* medieval possibilitou a conquista de novos espaços (a Groenlândia tantas vezes lembrada); o progresso das trocas e o nascimento de sociedades de mercadores e banqueiros; os grandes desmatamentos para fins agrícolas dando lugar às rotações de cultura e limitando cada vez mais o descanso da terra; a expansão urbana e o movimento das comunas. “Três séculos, de 1000 a 1300 aproximadamente, tornaram-se um dos períodos mais otimistas, prósperos e progressistas da história europeia”, segundo C. Van Doren¹³. Esse período “quente” e de fausto é atestado na Rússia, com a colonização agrícola em direção ao norte; na Ásia, com a migração para a Mandchúria, o vale do Amor e as ilhas setentrionais do Japão. Na América, as populações indígenas ampliam suas áreas de cultura em direção ao norte, bordando o Mississipi, o Missouri e o Illinois. No final do século XIII, porém, crises sacodem as sociedades e a inovação desacelera. A Pequena

¹² *Terra: fim de partida* (2005), *O clima ficou louco?* (2002), *Clima: crônica de uma desordem anunciada* (2004), *O clima vai esquentar!* (2004), *Clima: jogo perigoso* (2004), *O grande desarranjo do clima* (2005). N. T.

¹³ VAN DOREN, C. *A History of Knowledge: past, present and future*. New York: Ballantine Books, 1991.

Era Glacial conduzirá a um isolamento maior, à fome recorrente, a muito menos inovações. Será preciso aguardar até meados do século XIX para que a Revolução Industrial transforme radicalmente as sociedades.

Convém desconfiar das afirmações peremptórias sobre esses elos deterministas, mas, por outro lado, nenhuma razão maior permite afirmar que o aquecimento contemporâneo terá conseqüências principalmente negativas para o conjunto da humanidade.

¹⁴ “Façamos depressa, está esquentando!”. N. T.

Bibliografia consultada

ACOT, P. *Histoire du climat*. Paris: Perrin Tempus, 2004.

AMMERMAN, A. J. & CAVALLI-SFORZA, L. L. *The Neolithic Transition and the Genetics of Populations in Europe*. Princeton: Princeton University Press, 1984.

CLAIBORNE, R. *Climate, Man and History*. New York: W. W. Norton, 1970.

DELAND, A. *Fielding's Far East*. New York: Fielding Travel Books, 1987.

ESPER, J.; COOK, E. R. & SCHWEINGRUBER, F. H. Low frequency signals in long tre-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 295, 2250-2253, 2002.

LAMB, H. *Climatic, History in the Future*. Princeton: Princeton University Press, 1982.

LAMB, H. *Climate, History and Modern World*. New York: Methuen, 1982.

LOMBORG, B. *L'écologiste sceptique*. Paris: Le Cherche Midi, 2004.

MAASCH, K. A. et al. A 2000-year context for modern climate change. *Geografiska Annaler*, 87a, 7-15, 2005.

McNEIL, H. *The rise of the Human Community*. Chicago: The University Chicago Press, 1963.

NESMES-RIBES, E. & THUILLIER, G. *Histoire solaire et climatique*. Paris: Belin, 2000.

PIRENNE, H. *Economic and Social History of Medieval Europe*. New York: Harcourt, Brace and Co., 1938.

4. Computar as incertezas e as margens de erro?

O discurso transmitido pela imprensa, pela televisão, pela publicidade (*Faisons vite, ça chauffe!*¹⁴) é bastante afirmativo. As fontes de incertezas são entretanto numerosas: desde os erros quantificados nas medições de temperatura, nas reconstituições de dados, até as projeções duvidosas sobre o funcionamento do sistema.

A margem de erro tolerada pela OMM na calibragem do termômetro é de 0,2°C; os termômetros de máximas são, por exemplo, graduados em cerca de 0,5°C, sendo que a margem de erro de um termógrafo deve permanecer inferior a 1°C. Portanto, a elevação secular de 0,6°C deveria acompanhar-se sempre de uma incerteza de mais + ou - 0,2°C, ou seja, uma margem de erro igual a 2/3 do valor estimado da elevação secular.

Por outro lado, a técnica de modelização atual também introduz a incerteza, que advém:

– primeiramente, das hipóteses de partida discutíveis referentes ao crescimento demográfico e econômico, aos progressos tecnológicos e ao abastecimento energético;

– segundo, da simplificação do funcionamento físico planetário, em relação aos conhecimentos do momento (erro de medição não levando em consideração nuvens e aerossóis, por exemplo);

– em terceiro lugar, dos elementos do sistema não integrados ao modelo (as “surpresas” ou ocorrências breves, por exemplo).

Quanto maior for a margem de erro, mais difícil será definir precisamente a realidade. O terceiro relatório do IPCC propõe uma avaliação do aquecimento no horizonte de 2100 entre +1,4°C e +5,8°C. Para o oeste da Europa, o limite é mais amplo, ou seja, um aquecimento de +2 a +6°C e um resfriamento de -4°C, se a deriva do continente atlântico norte não mais atingir o litoral nessas latitudes. Tais incertezas deveriam conduzir à modéstia, pois pouco revelam sobre as variabilidades térmicas do Quaternário!

Conclusão

O princípio da responsabilidade aplica-se seguramente ao aquecimento contemporâneo. É inegável que a industrialização fez-se a grandes golpes de poluição, segundo uma filosofia desprovida de respeito aos recursos naturais do planeta, visão de um mundo a ser conquistado ignorando-se limites. Agora, não é o caso de se empreender ação qualquer, mas, sim, de refletir coletiva e individualmente sobre as conseqüências de nossos atos. A variabilidade do clima deve ser levada em conta pelas sociedades. Mas os conhecimentos técnicos contemporâneos permitem pensar que as sociedades poderão, melhor que em outros tempos, enfrentar a mudança e até mesmo tirar proveito dela. As revoluções agrícolas ou industriais nasceram de inovações que modificaram radicalmente os modos de produção e aumentaram sensivelmente a esperança de vida. Por que o mesmo não seria válido para o século XXI? A História nunca foi escrita antes de ter acontecido. Resta-nos refutar o catastrofismo ambiental.

Martine Tabeaud é geógrafa, professora da Université Paris 1 – Panthéon Sorbonne e pesquisadora do Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) na área de *Espaços, natureza e culturas*.

martine.tabeaud@univ-paris1.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.



O FUTURO DA CORRENTE DO GOLFO MECANISMOS E CONSEQÜÊNCIAS DE UMA PERTURBAÇÃO DA CIRCULAÇÃO TERMOHALINA NUM CLIMA QUE SE AQUECE

Didier Swingedouw

A Corrente do Golfo (*Gulf Stream*) é a corrente oceânica quente que se encontra a leste da Flórida e sobe em direção às altas latitudes da Europa, atravessando todo o oceano Atlântico. Transporta uma energia colossal, cerca de 1 trilhão de watts, ou seja, mil vezes a produção mundial de energia. Esse transporte de calor para as altas latitudes influencia o clima que margeia o Atlântico Norte e faz com que dois pontos localizados na mesma latitude e, portanto, recebendo aproximadamente a mesma energia solar, um à margem oeste do Atlântico, outro à margem oeste do Pacífico, tenham temperaturas muito diferentes no inverno. Por exemplo, Bodö (67°N, Noruega) caracteriza-se por uma temperatura média de -2°C em janeiro, enquanto que Nomsk (65°N, Alaska) sofre com invernos bem mais rigorosos, com os termômetros apresentando a média de -15°C no mesmo mês. O aquecimento climático irá modificar as condições na superfície do oceano, o que poderá alterar a dinâmica da Corrente do Golfo e a maneira com que redistribui o calor para as latitudes médias do norte.

A Corrente do Golfo e a circulação termohalina

O relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), datado de 2001¹, examinou a possibilidade de uma diminuição da Corrente do Golfo, sem conseguir obter consenso probatório sobre a questão. Muito trabalho foi feito depois, tendo progredido significativamente a avaliação da probabilidade, no futuro, de uma estagnação dessa corrente e das conseqüências climáticas associadas ao fato.

A Corrente do Golfo foi descoberta em 1513 pelo navegador Ponce de Leon. Entretanto, foi preciso esperar até 1777 para que Benjamin Franklin realizasse um estudo mais detalhado e traçasse o mapa da trajetória dessa corrente. Será apenas em meados do século XX que ficará esclarecida a sua origem física. Modelos simplificados de oceano mostram que a forçante do oceano sob a pressão do vento de superfície conduz a uma circulação superficial formada por várias células em rotação, de alguns milhares de quilômetros de diâmetro, chamadas de *giros*. Esses giros são assimétricos, por causa da força de Coriolis, ligada à rotação da Terra. Assim, no Atlântico, encontram-se um giro dito subtropical entre cerca de 15°N e 45°N, e um giro subpolar mais ao norte. O intercâmbio de massa e de calor entre esses dois giros é influenciado pelo que se denominou *circulação termohalina* (THC). Tal circulação, ligando superfície e profundidade, caracteriza a circulação oceânica de grande escala, que se encontra no conjunto do globo terrestre. Saliçada pelo americano Wallace Broecker², ele a compara a uma gigantesca esteira rolante tridimensional (figura 1). O nome de termohalina faz referência às forçantes térmica e halina (ligada à salinidade), que geram diferenças de densidade no oceano e que participam da dinâmica dessa circulação. A distribuição espacial da THC, com um transporte de calor em direção ao pólo no Atlântico Norte, em sentido contrário ao do Pacífico, é determinada pelos chamados pontos de convecção, que se encontram atualmente nos mares nórdicos e do Labrador e são caracterizados pela ocorrência do fenômeno de convecção hibernal devido ao resfriamento do oceano pela atmosfera. Tal convecção forma as águas densas que cobrem o fundo dos oceanos e que sobem graças à difusão em profundidade. Esse fenômeno de convecção é seguido de mergulhos das águas profundas que são formados sobre o declive oceânico, gerando, para a conservação do volume, uma atração das águas de superfície que compensam o transporte das águas de profundidade. Daí resulta, na superfície, um transporte de calor que aquece o clima das altas latitudes norte.

¹ CUBASH, U. *et al.* Third assessment of climate change. Chapter 8. In: IPCC. *Climate Change 2001*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

² BROECKER, W. The great conveyor belt. *Oceanography*, 4, 79-89, 1991.

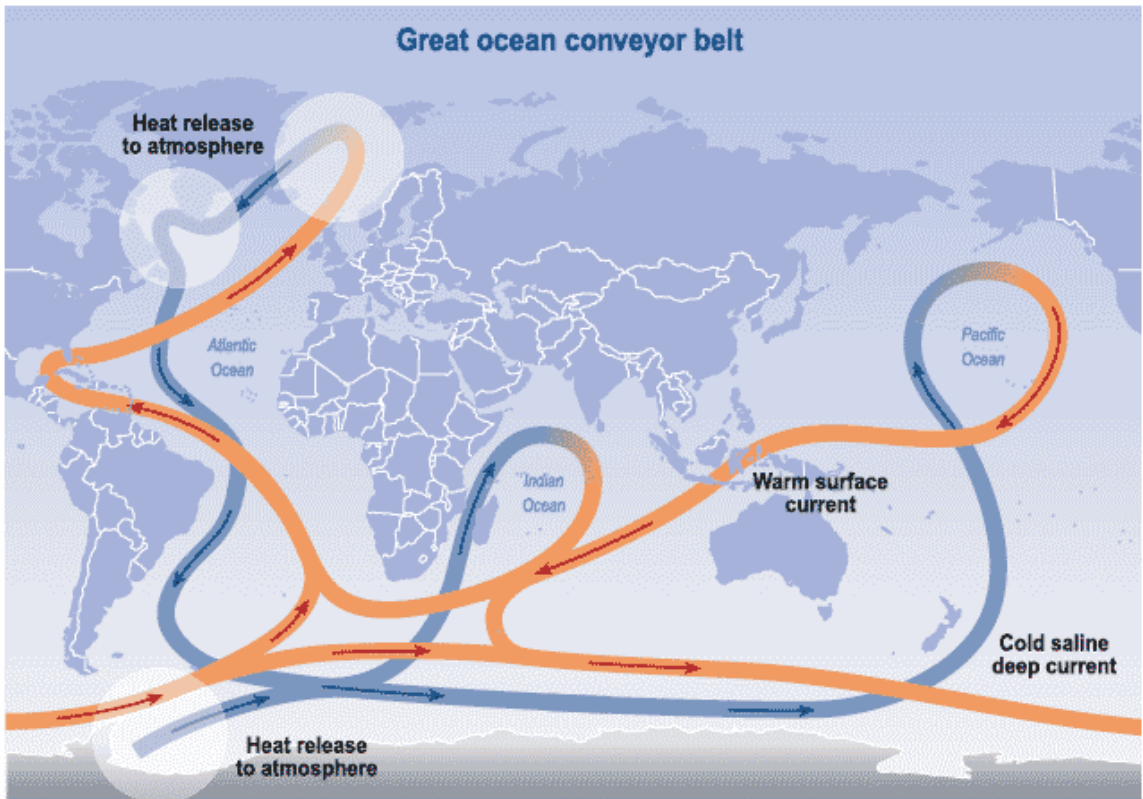


Figura 1: Esquema simplificado da circulação termohalina, comparada a uma enorme esteira rolante (IPCC, 2001). As correntes quentes de superfície estão representadas em laranja, as correntes frias de profundidade aparecem em azul. Uma importante quantidade de calor é liberada pelo oceano em direção à atmosfera, no nível dos pontos de convecção (configurados pelos círculos), situados no Atlântico Norte e no mar de Weddel.

³ WUNSCH, C. What is the thermohaline circulation? *Science*, 298, 1179-1181, 2002.

Entretanto, como observou Carl Wunsch³, oceanógrafo americano de renome, a expressão termohalina pode prestar-se a confusão: não se trata de um motor térmico, o que significa que não é o gradiente de densidade que alimenta a circulação. O motor da THC é antes a difusão no oceano profundo, “puxando” as ondas de águas profundas que sobem e fazem funcionar a esteira rolante. Essa difusão é causada pela maré associada à forçante lunar, e pela turbulência ligada à forçante eólica, principalmente no nível dos “ventos rugidores” do paralelo 40 (*quarantième rugissants*) e dos “ventos uivantes” do paralelo 50 (*cinquantième hurlants*) no hemisfério sul. Assim, parece que o trabalho de 10^{12} W fornecido ao oceano sob estas duas formas resulta de um transporte de calor em direção ao norte, a 30°N , de ao menos 10^{15} W, o que demonstra a temível eficácia dessa máquina térmica. Mas, é preciso compreender bem

que tais argumentos energéticos se aplicam ao que se chama de “regime permanente”, no sentido de que se considera que o tempo não intervém, e que a circulação termohalina teve todo o tempo para se manter em estado de equilíbrio. Quando se sabe que no oceano o tempo de ajustamento para atingir esse equilíbrio é de 1.000 anos, compreende-se que o regime transitório, adequando-se a escalas temporais mais curtas, é mais pertinente para as causas humanas. Além disso, a distribuição espacial da THC, com um transporte de calor transequatorial em direção ao norte no oceano Atlântico, em sentido contrário ao do oceano Pacífico, está diretamente vinculada à presença de pontos de convecção nos mares nórdicos, em sentido contrário ao do Pacífico Norte.⁴

⁴ STOMMEL, H. & ARONS, A. B. On the Abyssal Circulation of the World Ocean. 2. An Idealized Model of the Circulation Pattern and Amplitude in Oceanic Basins. *Deep-Sea Research*, 6, 217-233, 1960.

A distribuição espacial da THC e sua variabilidade entre decenal e secular, dependem assim da convecção nos mares nórdicos. Ora, esse fenômeno de convecção pode ser bastante afetado pela diminuição de densidade na superfície, associada a mudanças de temperatura e salinidade. Com efeito, um aumento de temperatura ou uma diminuição de salinidade atenuaria a densidade de superfície e poderia provocar uma parada da convecção e, portanto, do transporte de calor em direção às altas latitudes do Atlântico. A fim de melhor avaliar a possibilidade de tais mudanças, é conveniente analisar as variações da THC desde o passado e compreender melhor sua dinâmica.

O passado da Corrente do Golfo

A circulação termohalina pode ser reconstruída em climas do passado graças a marcadores radioativos. Historicamente, é a medição do carbono 13 em sedimentos que constituiu o primeiro marcador de intensidade da THC. As amostras marinhas obtidas por escavações no oceano Atlântico permitem conseguir informações sobre a intensidade da circulação oceânica no passado. A medição do carbono 13 nessas amostras evidencia que a THC sofreu numerosas variações.⁵ Tais avaliações foram confirmadas pelo par protactínio-tório, que se pode medir nas referidas amostras e que fornece dados mais precisos e quantitativos das variações passadas da THC. Assim, as diferentes medições mostraram que as numerosas oscilações climáticas observadas no último milhão de anos parecem estar claramente correlacionadas com variações da THC. Por exemplo, as ocorrências frias, ditas de Heinrich, parecem associadas a um desmoronamento de geleiras que poderia ter freado a THC,

⁵ DUPLESSY, J. C. Global ocean circulation and its past variations. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 657-666, 2004.

tornando-a mais lenta. Mais particularmente há 14.700 anos, houve o período chamado Dryas Recente. O clima saía de um período frio, conhecido como glaciário, tendo ocorrido a seguir um aquecimento de 10 graus em algumas dezenas de anos, o que levou as enormes geleiras que se encontravam então na América do Norte a se derreterem, derramando uma quantidade colossal de água doce no oceano Atlântico.⁶ Assim, a THC parece ter sofrido uma lentidão importante, entre 12.800 e 11.600 anos atrás, o que teria gerado um resfriamento da Europa.⁷ Este episódio traz portanto à luz o vínculo existente entre THC e clima, mostrando que o elo não é só teórico, mas que pôde ser verdadeiramente observado no passado.

A duração do Dryas Recente foi de 1.200 anos. Quanto à duração do comportamento da THC, não existe a mesma clareza, mas a escala temporal sustenta ter havido uma inércia provisória da THC, que teria em seguida recuperado sua normalidade. A THC ainda não havia sido observada devidamente, quando o oceanógrafo americano Henry Stommel (1920-1992) demonstrou, com um modelo analítico bastante simples, que essa circulação estava submetida a intensas ocorrências não-lineares, associadas ao efeito da salinidade sobre a densidade. Desse modo, provou que, para uma mesma forçante em água doce de superfície, poderiam existir dois momentos estáveis da THC, o primeiro com um transporte de calor em direção ao norte, o segundo sem este. Tal resultado teórico esteve em pauta no mundo científico desde que os modelos numéricos do oceano evidenciaram um fenômeno similar, com a possibilidade de numerosos estados estáveis sob determinadas condições de forçante em água doce. Recentemente, o climatólogo alemão Stefan Rahmstorf constatou, com modelos numéricos relativamente avançados, que esse fenômeno era bem consistente e aparecia na maior parte dos modelos que analisava.⁸ Uma integração de vários milênios é necessária para observar tais equilíbrios múltiplos, o que faz com que os modelos mais aperfeiçoados não possam participar da análise de Rahmstorf. No entanto, parece que alguns modelos mais complexos, levando em conta mais fenômenos associando oceano, atmosfera e gelos marinhos, com uma resolução espacial correta, não possuem equilíbrios múltiplos. Existem na verdade processos estabilizadores, frequentemente ligados à dinâmica atmosférica tropical⁹ ou às geleiras marinhas¹⁰, que permitem atenuar as diminuições da THC. Esse fato mostra a necessidade de modelos que abranjam todos esses elementos, o que não é o caso dos utilizados

⁶ BOND, G. *et al.* Correlations between climate records from north Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365, 143-147, 1993.

⁷ McMANUS, J. F.; FRANÇOIS, R.; GHERARDI, J. M.; KEIGWIN, L. D. & BROWN-LEGER, S. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature*, 428, 834-837, 2004.

⁸ RAHMSTORF, S. *et al.* Thermohaline circulation hysteresis: a model inter-comparison. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.

⁹ LATIF, M.; ROECKNER, E.; MIKOLAJEWICZ, U. & VOSS, R. Tropical stabilization of the thermohaline circulation in a greenhouse warming simulation. *Journal of Climate*, 13, 1809-1813, 2000.

¹⁰ HU, A. X.; MEEHL, G. A.; WASHINGTON, W. M. & DAI, A. G. Response of the Atlantic thermohaline circulation to increased atmospheric CO₂ in a coupled model. *Journal of Climate*, 17, 4267-4279, 2004.

por Rahmstorf. Há, portanto, em torno do tema, um debate que diz respeito à estabilidade da THC e que pressupõe questionamentos a longo prazo. Pergunta-se enfim se uma parada brutal da THC causada pela mudança climática seria quase irreversível. Para tentar responder à questão, um projeto de comparação de diferentes modelos, tendo por base o par oceano-atmosfera, correspondendo ao estado da arte no assunto, começou a ser elaborado recentemente.¹¹ O protocolo experimental consiste em impor uma perturbação em água doce, no Atlântico Norte, simulando um desabamento de geleiras por um período de 100 anos, interromper depois essa perturbação e observar se a THC retoma seu estado inicial ou faz perdurar um novo estado. Isso com o propósito de avaliar se a THC atual possui ou não dois estados estáveis, um ativo e outro inativo. Os resultados indicam que a maior parte dos modelos, não todos, recupera sua intensidade de origem. Logo, é preciso raciocinar em termos de probabilidades, para concluir que a THC atual parece ter pouca chance de ser portadora de dois equilíbrios estáveis no momento.

O futuro da THC

O novo exercício do IPCC expirará em 2007, mas os novos resultados já publicados, obtidos com os modelos associados de alta resolução evocados acima, trazem elementos para respostas quanto ao futuro da THC.

Primeiramente, todos os modelos apresentam uma diminuição da THC com diferenças apreciáveis referentes à amplitude dessa diminuição. Esta corresponderia em média a 25% somente, e nenhum dos modelos mostra estagnação total da THC em 2100.¹² Um outro resultado interessante reside no fato de que o maior fator de diminuição da THC seria o aquecimento climático direto, que, aumentando a temperatura dos oceanos, diminuiria a densidade em superfície das zonas de convecção, afetando os mergulhos já referidos. Embora esses modelos não levem em consideração o derretimento das geleiras, parece que estamos relativamente longe da ficção anunciada no filme *O dia depois de amanhã*. Também o impacto climático será bem mais modesto que o observado no filme hollywoodiano. O resultado principal que se depreende, tendo em vista que a diminuição da THC não provocará o resfriamento da Europa, é que seu efeito seria mais fraco que o aquecimento causado pelos gases de efeito estufa, podendo antes atenuar localmente, ao redor da bacia atlântica, o aquecimento global.

¹¹ STOUFFER, R. J. *et al.* Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *Journal of Climate*, 19, 1365-1387, 2006.

¹² SCHMITTNER, A.; LATIF, M. & SCHNEIDER, B. Model projections of the North Atlantic thermohaline circulation for the 21st century assessed by observations. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.

O esforço de observação do sistema Terra permite validar os modelos climáticos e referendar suas previsões. Observações sobre a salinidade no Atlântico Norte foram implementadas há meio século, apontando uma clara tendência à baixa e assim legitimando o que predizem os modelos. A THC, por outro lado, revela-se muito complexa ao ser estudada, em razão de sua ramificação profunda. Foi preciso esperar até a última década para se estruturar um sistema de medições confiável. Há 40 anos houve algumas medições isoladas, mas a falta de resolução temporal limita as conclusões que se podem obter quanto a uma tendência de desaceleração da THC. Por conseguinte, será necessário aguardar ainda um pouco mais para saber se a THC já está começando a diminuir, como pretendeu talvez um tanto apressadamente Harry Bryden¹³. O oceanógrafo inglês mostrou, através de um jogo de medições muito curtas para realmente permitir conclusões, que a THC havia diminuído em 30% nos últimos anos. Ora, os modelos não apresentam no momento tal diminuição, que seria possível constatar apenas dentro de algumas décadas. Duas hipóteses podem explicar esse desacordo: 1) a amostra temporal de observações é efetivamente muito curta, e o que Bryden viu seria apenas uma oscilação interna do sistema cujo período de oscilação é da ordem da década; 2) os modelos não apresentam adequadamente certos processos amplificadores, ao nível da dinâmica oceânica ou então ao nível das forçantes oceânicas de superfície. A favor da segunda hipótese está o fato de que poucos modelos que participam do IPCC-2007 não computam o derretimento das geleiras. Entretanto, o descongelamento atual não é significativo para explicar por si só uma diminuição da THC. Por outro lado, existe o risco de o mesmo desempenhar um papel cada vez mais importante na medida em que o clima es quente ainda mais.

Com efeito, juntamente com uma equipe de pesquisadores franceses do LSCE (*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement* – CNRS), mostramos que o derretimento das geleiras poderá ter grande influência na diminuição da THC nos anos vindouros.¹⁴ Nossos resultados também indicaram que esse derretimento poderia levar o modelo a transpor um limite crítico e conduzir a THC a uma inércia total ao menos por 500 anos. Entretanto, nesse modelo, a suspensão do descongelamento da Groenlândia permitiria à THC retomar seu vigor de outrora, confirmando a análise precedente sobre a dupla estabilidade da THC. A perturbação antrópica, neste caso, teria um efeito inferior ao milenar, referente à THC. Mas as implicações de

¹³ BRYDEN, H. L.; LONGWORTH, H. R. & CUNNINGHAM, S. A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25 degrees N. *Nature*, 438, 655-657, 2005.

¹⁴ SWINGEDOUW, D.; BRACONNOT, P. & MARTI, O. Sensitivity of the Atlantic Meridional Overturning Circulation to the melting from northern glaciers in climate change experiments. *Geophysical Research Letters*, 33, 2006.

uma estagnação da THC seriam importantes do ponto de vista climático, criando uma diferença de temperatura próxima de 10 kelvin ao redor do mar de Barents, afetando assim o clima no nível das altas latitudes do norte.

Conclusão

O futuro da THC sempre se apresenta como matéria de controvérsia, embora o aperfeiçoamento dos modelos tenha permitido limitar um pouco as incertezas. As observações a que foi submetida essa corrente marinha de grande escala também progrediram bastante nos últimos anos, porém, será preciso esperar ainda algum tempo para se obter resultados estatisticamente significativos. O futuro da THC tem gerado muitas inquietações, por sua acentuada não-linearidade e pela existência de um limiar preciso que conduz essa circulação a um freamento. Saber se a mudança climática pressionará a THC a ultrapassar esse limite é uma questão em aberto. Em caso afirmativo, as conseqüências seriam bastante complexas. A supressão da THC acarretaria o resfriamento da Europa, mas como o conjunto do mundo se aqueceria com rapidez, parece que o efeito acumulado desses processos antagonistas seria, mesmo em escala local, ligeiramente a favor dos gases de efeito estufa. Portanto, não se deve cair no catastrofismo exacerbado; a desaceleração da THC poderia de certo modo atenuar o aquecimento climático no Atlântico Norte. Contudo, perturbar os grandes equilíbrios climáticos vinculados ao oceano é um jogo perigoso que pode reservar surpresas. Uma mudança da THC poderia na verdade influenciar os trópicos, modificando o lugar das precipitações, o que traria prejuízos para os países implicados, em termos de abastecimento de água. Além disso, uma parada da THC teria conseqüências na bioquímica do oceano que afetariam suas frágeis cadeias tróficas.

Melhorar as previsões sobre o futuro da THC e analisar com precisão os riscos associados a uma diminuição dessa circulação oceânica constituem os desafios dos próximos anos, a fim de que nos preparemos melhor para a complexidade das transformações que estão por vir.

Didier Swingedouw é PhD em Ciências do Clima e do Meio Ambiente e pesquisador do Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître da Université Catholique de Louvain, Bélgica.

Swingedouw@astr.ucl.ac.be

Tradução de Zília Mara Scarpari.



EL CIRCUITO TERMOHALINO EN EL OCÉANO ATLÁNTICO CERTEZAS E INCERTIDUMBRES

Antón Uriarte

Desde hace unas cuantas décadas se sabe que la estructura de las corrientes marinas a escala global es tridimensional, con movimientos horizontales, en los que el viento juega un importante papel, y con movimientos verticales, en los que la salinidad y las temperaturas son las fuerzas impulsoras. Las corrientes superficiales, observadas y estudiadas desde hace siglos, están por lo tanto ligadas, por movimientos convectivos de agua, a corrientes profundas de características mucho menos conocidas, pero cuyo estudio en los últimos años ha recibido un fuerte impulso debido a su importancia oceánica y climática. La incorporación del análisis de las corrientes termohalinas a las investigaciones sobre los cambios climáticos es hoy en día imprescindible. Su intervención parece decisiva pero todavía estamos lejos de saber cómo ha sido su comportamiento en las últimas décadas, con hipótesis contradictorias, unas que indican su intensificación y otras su debilitamiento. Trátase aquí de ordenar, que no de resolver, algunas de esas incertidumbres.

Hasta hace poco tiempo, los libros de texto escolares solían simplificar el tema de las corrientes marinas y solamente tenían en cuenta el estudio de las corrientes superficiales. De esta forma se ha solido enseñar que en el Atlántico Norte las corrientes principales forman circuitos de aguas cálidas y frías, cuyo principal giro, que bordea al anticiclón de las Bermudas/Azores, está compuesto por el trío de la corriente del Golfo (*Gulf Stream*), la corriente de Portugal y Canarias, y la deriva Norecuatorial, que lo cierra al llegar al Caribe. Sin embargo, si añadimos al sistema de corrientes superficiales del Atlántico Norte el caudal aportado por la corriente del Norte de Brasil nos encontramos con una primera complicación, ya que no existe una corriente semejante en superficie que devuelva todo ese caudal al Atlántico Sur. Existe así un transporte neto superficial de agua desde el Atlántico Sur al Atlántico Norte que indica que esos circuitos cerrados superficiales son insuficientes para explicar el sistema.

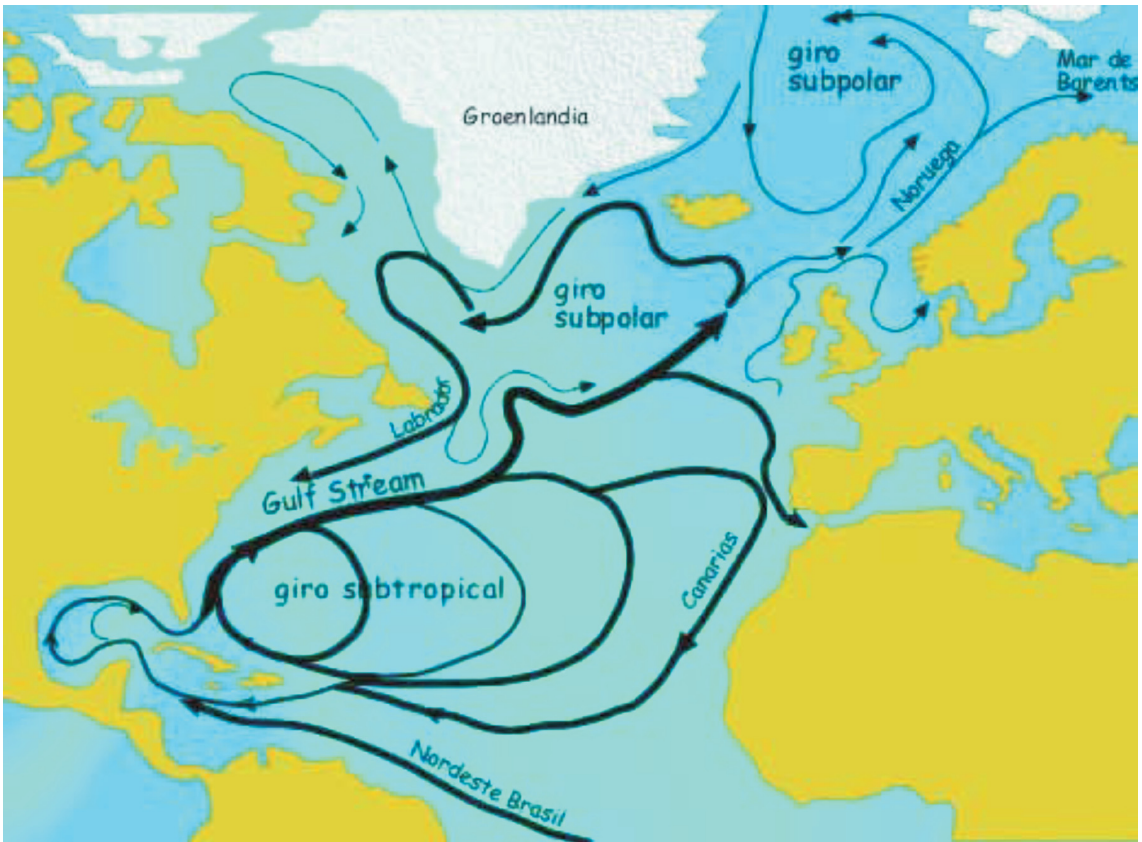


Figura 1: Corrientes superficiales en el Atlántico Norte.

¹ No consideramos en el balance la ganancia de agua que entra al Artico desde el Pacífico a través del estrecho de Bering y que luego pasa al Atlántico a través del estrecho de Fram (entre Groenlandia y las Svalbard) y por los estrechos del archipiélago canadiense (estrecho de Nares, entre la isla de Ellesmere y Groenlandia, especialmente). Tampoco tenemos en cuenta la pérdida de agua por el exceso de la evaporación sobre la precipitación y la escorrentía de los ríos en el Atlántico Norte. Estos flujos, de ganancia y pérdida respectivamente, son inferiores a 1 Sv y más o menos se compensan.

La corriente del Norte de Brasil, alimentada por la corriente Surecuatorial, es una corriente importante, que no ha recibido en la explicación de las corrientes marinas la consideración que se merece. Los anillos de giro anticiclónico que se forman en ella y que cruzan el Ecuador frente al nordeste brasileño, aportan un considerable caudal neto al Atlántico Norte, de unos 15 Sv aproximadamente (estas mediciones son muy aproximadas; algunas medidas dan un caudal superior: 9 Sv en Marzo y 36 Sv en Julio), es decir, el equivalente a unas 100 veces o más el caudal del Amazonas en su desembocadura (1 Sverdrup es un caudal de 1 millón de metros cúbicos por segundo). Este flujo llegado del hemisferio sur al hemisferio norte se junta con un flujo tropical difuso de otros 15 Sv que llega al Caribe proveniente del este y del nordeste, alimentado en parte por la corriente de Canarias, con lo que el caudal total de la Corriente del Golfo que inicia su recorrido al norte de Cuba suma unos 30 Sv.

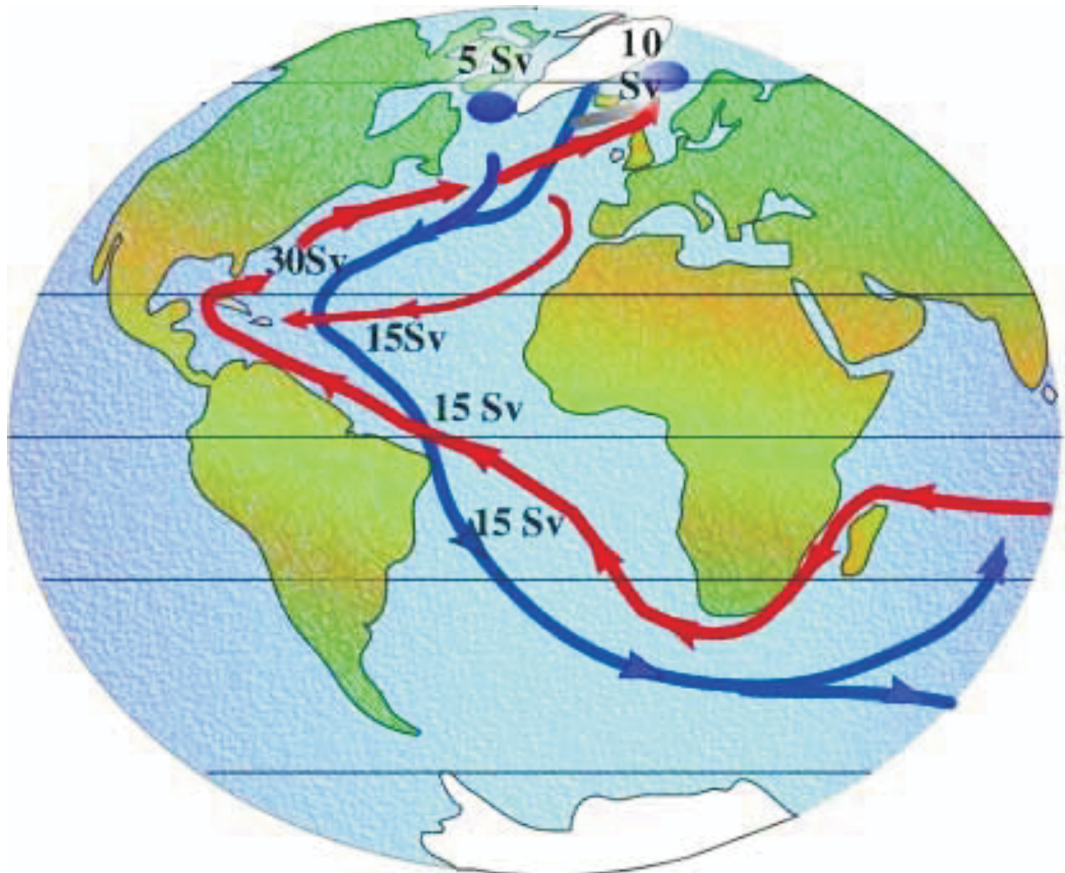


Figura 2: Esquema de la circulación termohalina en el Atlántico. No se representa en la figura el hundimiento de agua en algunas zonas próximas a la Antártida (Mar de Wedell y Ross)¹.

¿Pero qué ocurre con el agua excedentaria que ha llegado del sur al Atlántico Norte? Pues que la Corriente del Golfo la transporta hacia el nordeste, y al llegar al extremo septentrional del Atlántico, a los Mares Nórdicos, aumenta su densidad por enfriamiento y se hunde. Desde allí, por niveles profundos e intermedios, vuelve hacia el hemisferio sur. Se forma así en el Atlántico una especie de cinta rodante (*conveyor belt*), con un flujo neto positivo hacia el norte en superficie y con un flujo neto positivo hacia el sur en las profundidades.

Esta circulación (llamada también *MOC*, *meridional overturning circulation*, circulación meridiana volteante) funciona de forma continua. Su rodillo impulsor se encuentra en los Mares Nórdicos y en el Mar de Labrador. Los Mares Nórdicos – nombre de reciente acuñación (a no confundir con el Mar del Norte) – se encuentran en la zona subpolar del Atlántico, al norte del paralelo que pasa por Groenlandia-Islandia-Noruega. Por eso a veces se les llama también (con un poco de humor etílico) mares *GIN* (*Greenland-Iceland-Norway*). Por otra parte, el Mar de Labrador, que es también una zona de hundimiento, se ubica al sur de Groenlandia y al este de la Península de Labrador.

Mecanismos de hundimiento: la importancia de la salinidad y de la temperatura

La salinidad y la temperatura del agua juegan un papel crucial en el funcionamiento de esta cinta rodante. Cuando las aguas transportadas por la Corriente del Golfo llegan a los Mares Nórdicos, su temperatura media, que era de 10°C en el paralelo 50°N, pasa a ser solamente de unos 3°C en el paralelo 65°N. Por enfriamiento y contracción térmica, adquieren una densidad alta y acaban hundiéndose, dejando espacio para la llegada desde el sur de nuevas masas de agua.

El fenómeno de hundimiento por convección que se produce en aquellos mares septentrionales se intensifica al comienzo del invierno por el aumento de la salinidad. Ocurre que cada otoño-invierno, durante la formación de los hielos marinos en áreas subárticas, hay una suelta de sal y se forma, bajo la banquisa de hielo, una masa de agua fría y muy salada que se hunde y contribuye a la formación del agua profunda del Atlántico Norte.

¿Por qué el fenómeno es especialmente significativo en el Atlántico? Ocurre que el Atlántico Norte es bastante más cálido y salado que el Pacífico Norte. Así, en la franja

latitudinal 45°N-60°N, el Atlántico Norte tiene una temperatura media superficial de 10°C y una salinidad de 34,9%, mientras que el Pacífico Norte tiene una temperatura de 6,7°C y una salinidad de 32,8%.

La alta salinidad del Atlántico se explica porque el volumen de agua evaporada supera ampliamente al volumen de agua aportado por las precipitaciones y las escorrentías de los ríos que desembocan en ese océano. Por el contrario, en el Pacífico, los sistemas montañosos del oeste americano provocan lluvias abundantes y hacen de barrera a la penetración de la humedad en el continente. El agua evaporada del Pacífico que los vientos del oeste llevan hacia Norteamérica, produce copiosas lluvias costeras y vuelve a ese océano sin apenas penetrar en el continente americano. Por el contrario, en Europa no existen esas barreras topográficas y gran parte de la humedad atlántica acarreada por vientos del oeste pasa de largo y se aleja hacia Asia, sin ser recuperada por el océano Atlántico.

Además, otro motivo de la mayor salinidad del Atlántico Norte es que el agua evaporada en la región anticiclónica subtropical, que se extiende de las Bermudas a las Azores, es traspasado en gran medida al Pacífico, llevado por los vientos alisios tropicales que atraviesan el istmo de Panamá. La evaporación en el Atlántico y el trasvase atmosférico del vapor hacia el Pacífico, hace que aumente la salinidad de las aguas tropicales atlánticas.

El transporte de calor

Las corrientes marinas – en especial la Corriente del Golfo (*Gulf Stream*) – juegan un papel muy importante en la distribución latitudinal del calor. Gran parte del calor excedentario que se recibe en el Trópico – radiación solar entrante menos radiación infrarroja saliente – es transportado hacia otras latitudes deficitarias. Gracias a la corriente marina, el aire seco y frío que sale del continente americano impulsado por los vientos del oeste se carga de humedad y calor a su paso por el Atlántico Norte y llega templado y húmedo a las tierras de Europa.

En 1991, un modelo climático de Manabe y colaboradores, en el que se jugaba con un sistema acoplado atmósfera-océano, predijo que un cambio en la circulación oceánica del Atlántico Norte podía provocar un enfriamiento de Europa². La hipótesis original, retomada más tarde por otros modelistas, era que por un *feedback* negativo, consistente esencialmente en un frenado de la Corriente del Golfo, se

² MANABE, S. *et al.* Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. *J. Climate*, 4, 785-818, 1991.

produciría el enfriamiento en el continente. Esto ocurriría porque el calentamiento provocado por el efecto invernadero haría que aumentase el transporte aéreo de agua desde las latitudes tropicales a las latitudes medias y altas. Así, aumentarían las precipitaciones septentrionales y la escorrentía de los ríos que desembocan en el Atlántico Norte, con lo cual, los aportes fluviales de agua dulce harían perder salinidad a las aguas marinas y harían menos eficiente el proceso de hundimiento del agua superficial que tiene lugar en los Mares Nórdicos. Finalmente, el sistema termohalino de corrientes se debilitaría, disminuiría la fuerza de la Corriente del Golfo y serían más fríos los inviernos en las latitudes medias y altas del continente euroasiático.

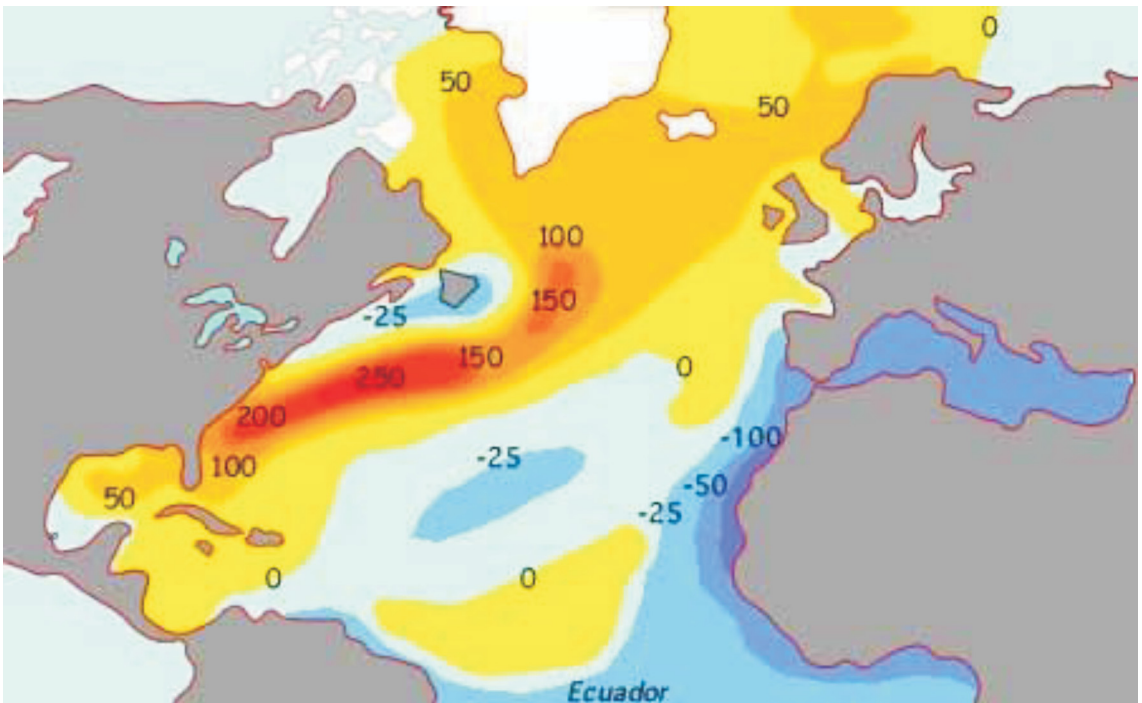


Figura 3: Transferencia media anual de calor en el Atlántico Norte del mar a la atmósfera (en vatios/metros cuadrados).

Pero es aún difícil cuantificar y comparar este calor transportado hacia Europa vía marítima con el calor que transportan las corrientes de aire. Aunque es cierto que el clima europeo, especialmente en invierno, sería más frío sin la Corriente del Golfo, no hay que exagerar, pues las corrientes de aire que llegan a la costa de Europa lo hacen predominantemente desde el suroeste, tras cruzar el Atlántico por latitudes bastante bajas, y por esta razón llegan bastante

templadas. Esta dirección del suroeste es debida a la onda que las Montañas Rocosas imprimen en los vientos del oeste antes de que crucen el Atlántico. El profesor Richard Seager, de la Universidad de Columbia, ha llamado la atención recientemente sobre la importancia de este meandro producido por las Rocosas en el clima europeo y ha criticado la exageración de considerar a la corriente del Golfo como la única responsable del clima benigno del noroeste de Europa (en comparación, por ejemplo, con el clima muy frío de Alaska).³

³ SEAGER, R. Gulf Stream, el fin de un mito. *Mundo Científico*, 244, 52-57, 2003.

Todavía es motivo de discusión y de incertidumbre las proporciones en que se reparte ese calor que llega a las costas de Europa, vía aérea o vía marítima. Según el profesor Harry Bryden una tercera parte correspondería a la Corriente del Golfo, otra tercera parte al calor sensible del aire transportado por los vientos del suroeste – que soplan sobre todo en la parte oriental de las borrascas atlánticas – y otra tercera y última parte sería debida al calor latente que libera el vapor de agua al condensarse y que es también transportado hacia el norte por esos vientos del suroeste. Hay que señalar aquí la importancia secundaria climática de este vapor procedente de la región subtropical atlántica, que no sólo es fuente de calor, sino también de nieve y que, además, va a aportar agua dulce al norte del Atlántico, rebajando la salinidad de la superficie marina y repercutiendo así en la intensidad del hundimiento del agua en los Mares Nórdicos.⁴

⁴ BRYDEN, H. *et al.* Ocean heat transport. In: SIEDLER, G. *et al.* (Eds.) *Ocean Circulation and Climate*. London: Academic Press, 2001, p. 455-474.

Las corrientes profundas

El volumen de la masa de agua profunda que se produce en el Mar de Labrador y en los Mares Nórdicos, que suele ser denominada con el acrónimo *NADW* (*North Atlantic Deep Water*, agua profunda del Atlántico Norte) es enorme. Su caudal, o ritmo de producción, es de unos 15 Sv.⁵ Dentro de la *NADW* puede distinguirse una *NADW* inferior, más profunda, originada esencialmente en los Mares Nórdicos e inicialmente muy fría, y otra superior, en aguas intermedias, proveniente del Mar de Labrador y sur de Groenlandia, algo más cálida.⁶

⁵ GANACHAUD, A. & WUNSCH, C. Improved estimates of global ocean circulation, heat transport and mixing from hydrographic data. *Nature*, 408, 453-457, 2000.

⁶ ORSI, A. *et al.* Cooling and ventilating the Abyssal ocean. *Geophysical Research Letters*, 28, 15, 2923-2926, 2001.

El caudal principal de esta corriente profunda avanza hacia el sur por la zona occidental del océano Atlántico y cruza el Ecuador hasta llegar a la Antártida. Desde allí penetra en el Indico y posteriormente se extiende por las profundidades del inmenso Pacífico. Para una molécula de agua que realice el viaje completo antes de aflorar en superficie la travesía puede durar mil años.

También se forma agua profunda, más fría que la del hemisferio norte, en los mares de la plataforma de la Antártida, especialmente bajo las banquisas del mar de Wedell y del mar de Ross. Todos los inviernos, los fuertes vientos catabáticos que salen del continente empujan mar adentro a los hielos que se van formando en la costa. De esta manera, en las zonas costeras que quedan temporalmente libres de hielo, llamadas *polynyas*, se renueva continuamente un proceso de congelación, lo que permite que al final de cada temporada la suma del hielo formado en esos lugares haya sido superior a los 10 metros, frente a solamente 1 metro mar adentro.⁷ La sal rechazada saliniza el agua muy fría de la costa, la densifica, y forma una masa de agua profunda todavía más densa que la *NADW*. Es la llamada *AABW* (*Antarctic Bottom Water*), agua de fondo de la Antártida, que en su traslación por las profundidades hacia el norte llega hasta una latitud de unos 40°N, y lo hace metiéndose en cuña por debajo de la *NADW*, procedente del norte.

⁷ GRIGG, S. & HOLBROOK N. The impact of polynyas on the stability of the thermohaline circulation as simulated in a coupled ocean-atmosphere-sea ice box model. *Geophysical Research Letters*, 28, 5, 767-770, 2001.

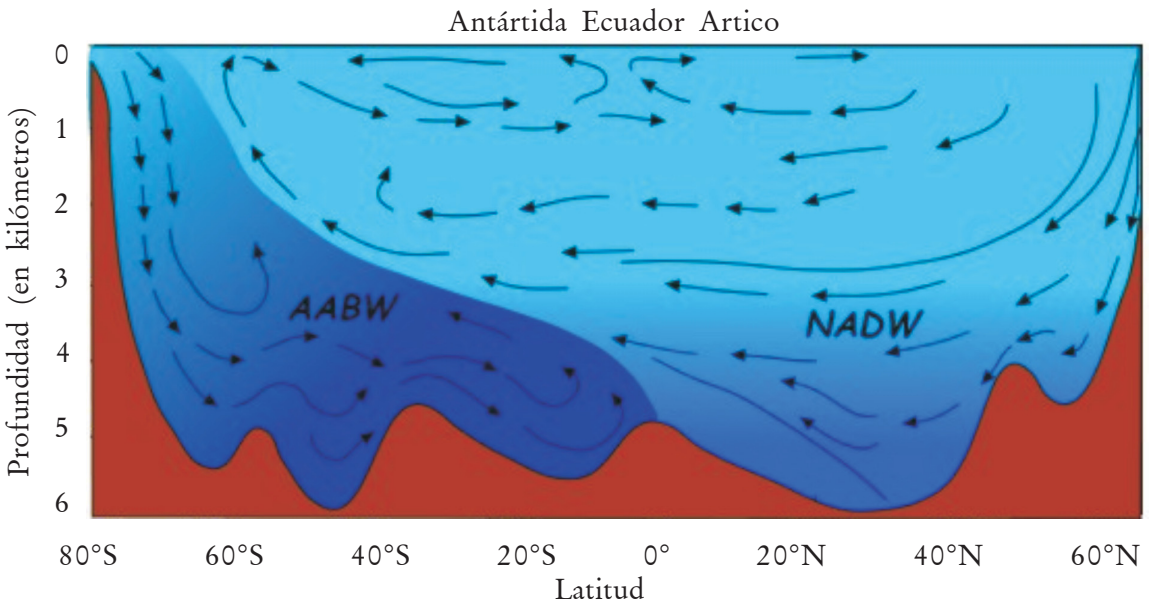


Figura 4: Corte vertical esquemático de las aguas y corrientes profundas en el Atlántico en la actualidad.

⁸ BROECKER, W. *et al.* Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation?. *Nature*, 315, 21-26, 1985. BROECKER, W. S. *et al.* Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode. *Nature*, 341, 318-321, 1989.

Las estimaciones del caudal de la *AABW* varían entre 2 Sv y 9 Sv, si bien en épocas más frías podía llegar hasta los 15 Sv. Según Broecker⁸ existe una conexión entre la producción de *NADW* en los Mares Nórdicos y la producción de *AABW* en la Antártida, de tal forma que cuando una aumenta, la otra disminuye, y viceversa. De todas formas este esquema de la circulación oceánica es aún más

complicado, porque, aparte de estas masas de aguas, *NADW* y *AABW*, existen otras corrientes de aguas intermedias que también pueden formar sus propios circuitos y jugar un papel importante en los cambios climáticos. Tal es el caso de la *AAIW* (*Agua Intermedia Antártica*) que se forma especialmente frente a la costa occidental de América del Sur y que parece jugar un papel relevante en la distribución de calor y sal en el Pacífico. Sus variaciones parecen estar ligadas además, en escalas multiseculares, a las variaciones bien estudiadas del Atlántico Norte.⁹

⁹ PAHNKE, K. & ZAHN, R. Southern Hemisphere water mass conversion linked with North Atlantic climate variability. *Science*, 307, 1741-1746, 2005.

Así como existen zonas en donde el agua superficial se hunde, existen también, aunque se localizan de forma más difusa, zonas de afloramiento (*upwelling*) de aguas profundas. Estas se sitúan en zonas de divergencia de aguas superficiales, que suelen ser reemplazadas por aguas ascendentes más profundas. Una extensa zona de *upwelling* es la franja ecuatorial del Pacífico Oriental, en donde el agua superficial, movida por los alisios, tiende a diverger hacia el norte y hacia el sur, dejando un hueco que es rellenado por aguas ascendentes. También se producen afloramientos en las costas en donde las aguas superficiales, por efecto de los vientos y de la rotación terrestre, tienden a alejarse mar adentro. Ocurre esto especialmente en los cuatro márgenes orientales de las cuencas oceánicas del Atlántico (norte y sur) y del Pacífico (norte y sur). A lo largo de estas costas los afloramientos dan lugar a la aparición de corrientes de aguas frías (Canarias y Benguela, en el Atlántico; California y Humboldt, en el Pacífico). Algunos análisis de sedimentos oceánicos muestran que estos afloramientos se intensificaron a comienzos del Pleistoceno, cuando el cierre del istmo de Panamá reorganizó las corrientes oceánicas, lo que quizás tuvo influencia en el enfriamiento cuaternario.¹⁰

¹⁰ MARLOW, J. R. *et al.* Upwelling intensification as part of the Pliocene-Pleistocene climate transition. *Science*, 290, 2288-2291, 2001.

¿Está variando la circulación atlántica?

Así como los ciclos de ocurrencia del Niño afectan, sobre todo, a la parte superior del océano, es también posible que existan ciclos seculares o milenarios que afecten a las corrientes profundas, especialmente a las del Atlántico.

El oceanógrafo Wallace Broecker cree que la formación del agua profunda atlántica, que se produce en los Mares Nórdicos y en los mares meridionales que circundan la Antártida, particularmente en el mar de Wedell, varía cíclicamente, aumentando alternativamente el caudal de una u otra fuente (norte o sur). Broecker cree que durante el siglo XX la producción de agua profunda en los Mares del

Sur ha disminuído considerablemente, lo que históricamente debe corresponderse con un aumento de la producción de agua profunda en el norte del Atlántico. Esto provocaría un mayor empuje de la Corriente del Golfo y, por lo tanto, un calentamiento del Atlántico Norte. De confirmarse el fenómeno, el calentamiento del hemisferio norte se explicaría más por este ciclo oceánico que por el aumento de los gases invernadero.¹¹

Recientemente, sin embargo, se ha barajado la hipótesis contraria, que la circulación termohalina ha perdido fuerza,¹² que casa bien con la disminución de la salinidad de las zonas septentrionales del Atlántico Norte.¹³ Quizás el signo positivo del índice atmosférico NAO (*North Atlantic Oscillation*) durante la década de los 90 y principios de este siglo haya contribuido a una dulcificación de las aguas profundas del mar de Labrador y de los Mares Nórdicos. Ocurre que un índice NAO o AO (*Arctic Oscillation*) positivo se corresponde con unos vientos del oeste más intensos, que a su vez causan una mayor exportación de hielo desde el Artico hacia los Mares Nórdicos a través del estrecho de Fram. Como el hielo es agua dulce, su fusión ocasiona una desalinización del agua superficial marina y un debilitamiento del hundimiento y de la circulación termohalina. Algunas estimaciones indican que entre 1965 y 1995 un flujo extra equivalente a 19.000 kilómetros cúbicos de agua dulce llegó a los Mares Nórdicos procedente del hielo del Artico.¹⁴

Aunque algunos autores recientemente lo han puesto en duda, también parece existir un ciclo térmico de calentamiento y enfriamiento en las aguas superficiales del Atlántico Norte, entre 0 y 70°N, denominado AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*), con un período de 65/80 años y una amplitud de unos 0,5°C. Esta oscilación parece estar relacionada con las variaciones en la intensidad de la circulación termohalina.¹⁵ También hay estudios estadísticos que muestran que las temperaturas del norte del Atlántico están correlacionadas con la intensidad de los vientos alisios que recorren el Atlántico tropical. Estudios detallados de las varvas sedimentarias de la cuenca de Cariaco, en Venezuela, que permiten determinar los años en los que los alisios son más intensos (mayor *upwelling* y abundancia de *Globigerina bulloides*), indican una alta correlación con las anomalías térmicas en el Atlántico Norte. Cuando los vientos alisios en Atlántico tropical son más intensos, las temperaturas marinas en el norte del Atlántico decrecen. Existe así, probablemente, una relación entre lo que ocurre en el Atlántico Tropical y la variabilidad climática en el Atlántico Norte.¹⁶

¹¹ BROECKER, W. *et al.* A possible 20th-Century slowdown of southern ocean deep water formation. *Science*, 286, 1132-1135, 1999.

¹² BRYDEN, H. *et al.* Slowing of the Atlantic meridional overturning at 25N. *Nature*, 438, 655-657, 2005.

¹³ RHINES, P. Sub-Arctic oceans and global climate. *Weather*, 61, 109-118, 2006.

¹⁴ CURRY, R. & MAURITZEN, C. Dilution of the Northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science*, 308, 1772-1774, 2005.

¹⁵ KERR, R. A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, 288, 1984-1986, 2000.

KNIGHT J. *et al.* A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate. *Geophysical Research Letters*, 32, L20708, 2005.

¹⁶ BLACK, D. *et al.* Eight centuries of North Atlantic Ocean Atmosphere Variability. *Science*, 286, 1709-1713, 1999.

Hay que considerar también la posibilidad de que el propio sistema de corrientes termohalinas presente inestabilidades internas, y que responda a un cierto comportamiento caótico. Por ejemplo imaginemos un estado inicial en el que la corriente termohalina del Atlántico Norte funciona normalmente. El agua salada superficial avanza hacia el norte, se enfría al estancarse en los Mares Nórdicos y se hunde. Pues bien, en un momento posterior, podría ocurrir que, si la cinta alcanzase demasiada velocidad, el intervalo de tiempo que la masa de agua superficial tiene para evaporar agua sería menor. Disminuiría el total evaporado y, en consecuencia, disminuiría también la salinidad y densidad de la Corriente del Golfo, con lo que ya no sería tan eficiente el motor de hundimiento de agua en los Mares Nórdicos. La cinta transportadora atlántica perdería fuerza: quizás el agua superficial no llegase tan al norte y la zona de hundimiento se desplazase más al sur; o, quizás, no se llegase a formar agua profunda, sino únicamente intermedia. Sea como fuese, el sistema, por sí mismo, pasaría a funcionar de forma diferente, hasta que de nuevo, por un proceso inverso, se restableciese el movimiento inicial de las corrientes.

Antón Uriarte es geógrafo, climatólogo y profesor de la Universidad del País Vasco, España.
uriarte@mac.com



CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL EM 2100

José Marengo

Os modelos gerados a partir do terceiro e quarto relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) projetam o clima até o fim do século XXI. O terceiro relatório concluiu que a temperatura média da atmosfera em escala global poderá alcançar, até 2100, valores superiores aos atuais, entre 1,4 e 5,8°C, dependendo das emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o aquecimento chegaria a valores maiores, de até 6 a 8°C na Amazônia e no Pantanal, e de até 4 a 5°C no Nordeste e na Bacia do Prata. As projeções de anomalias de chuva para a América do Sul contêm mais incertezas, pois dos cinco modelos climáticos considerados, um deles mostra que o nordeste amazônico experimentará secas a partir de 2060, enquanto que outro modelo aponta chuvas acima do normal para a mesma região. A média dos cinco modelos prevê, para o norte e o centro da Amazônia, sensível redução de chuva, que entretanto será mais abundante no sul do país. Tais previsões ajustam-se com as simulações de vazão de rios, constantes do quarto relatório, no qual o Paraná e o Prata apresentaram aumentos de vazão, ao contrário do que sucederá no nordeste da Amazônia.

Introdução

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) concluiu, no seu terceiro relatório, em 2001, que a temperatura média da atmosfera aumentou entre 0,2 e 0,6°C durante o século XX. Os modelos climáticos do IPCC mostram ainda, a partir de 1900, que até 2.100 a temperatura global poderá subir entre 1,4 e 5,8°C, o que representa um aquecimento mais rápido do que aquele detectado no século XX e que, aparentemente, não possui precedentes durante, pelo menos, os últimos 10.000 anos. Além da variabilidade natural do clima, esse fenômeno é consequência também do aumento na concentração de gases de efeito estufa, que, por sua vez, derivam de atividades antropogênicas – como a indústria ou o uso da terra.

O aquecimento global recente traz consigo impactos ambientais intensos, como o derretimento das geleiras e calotas polares, impactos que se manifestam também em processos biológicos, como por exemplo as alterações de períodos de floração das plantas.

As ferramentas comumente adotadas para se obter e avaliar medições climáticas passadas e futuras são os modelos de clima, ou seja, os modelos globais atmosféricos (GCMs) ou os modelos globais acoplados oceano-atmosfera (AOGCMs), que são produtos de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos. Tais instrumentos podem simular climas futuros em nível global e regional, como resposta às mudanças na concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis derivados da indústria e da queima de combustível e da biomassa.

A habilidade dos AOGMs em simular climas regionais vai depender de sua escala horizontal (ou resolução); as respostas seriam mais restritas se fossem utilizados modelos globais com resolução da ordem de 300 a 400km em relação ao uso de modelos regionais, cuja resolução é da ordem de 10 a 50km. Ainda assim, podem oferecer informações sobre mudanças de clima de grande utilidade para a escala continental, e considerando a extensão do Brasil, certamente contribuem para detectar as características gerais do clima futuro.

Este artigo apresenta uma avaliação de projeções do clima para a América do Sul, servindo-se das saídas geradas por cinco modelos incluídos no terceiro relatório do IPCC para

¹ CARTER, T. & HULME, M. *Interim characterizations of Regional Climate Related Changes up to 2100 associated with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios*. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2000.

dois tipos de cenários: um de alta emissão de gases de efeito estufa ou “pessimista” (A2), outro de baixa emissão dos mesmos gases ou “otimista” (B2). Ambos os cenários são conhecidos como SRES (*Special Report Emission Scenarios*) e aparecem detalhados e explicados em Carter e Hulme¹. A análise, realizada em nível anual e sazonal para mudanças nos padrões continentais de precipitação e temperatura do ar, simulados por AOGCMs, não contempla a grande variedade de cenários, referindo-se apenas aos cenários ditos pessimistas e otimistas. Adicionalmente, são previstas tendências futuras de vazões de rios, considerando-se os modelos do IPCC que serviram para a preparação do seu quarto relatório de avaliação.

O clima do presente

Na década de 1990, registraram-se as mais altas temperaturas desde as primeiras medições feitas em meados do século XIX. Esse aumento de calor nas décadas recentes corresponde ao aumento no uso de combustível fóssil durante o período. Até finais do século XX, o ano de 1998 foi o mais quente desde o início das observações meteorológicas em 1861, com $+0,54^{\circ}\text{C}$ acima da média histórica de 1961 a 90. Já no século XXI, a temperatura do ar em âmbito global foi de $+0,48^{\circ}\text{C}$ acima da média, em 2005, ano avaliado como o segundo mais quente do período observado, como afirma a *Climate Research Unit* da Universidade de East Anglia, Reino Unido. Enfim, 2003 foi o terceiro mais quente ($+0,44^{\circ}\text{C}$ acima do normal) dentre os últimos 11 anos (1995 a 2004, com exceção de 1996), considerados os de maior calor no período instrumental (figura 1).

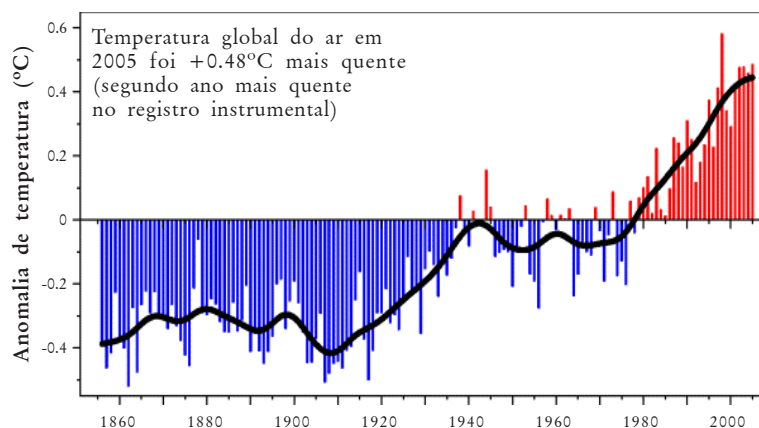


Figura 1: Anomalias de temperatura do ar global (em relação a 1961-90) desde o período industrial. A linha preta representa a média móvel de 10 anos (Fonte: Climate Research Unit, 2006).

Ao longo dos primeiros séculos da revolução industrial, de 1760 a 1960, os níveis de concentração de CO₂ cresceram de uma estimativa de 277 partes por milhão (ppm) para 317 ppm, portanto, um aumento de 40 ppm. Durante as recentes quatro décadas, de 1960 até 2001, as concentrações de CO₂ passaram de 317 ppm para 371 ppm. O aumento de quase 0,6°C durante o último século é pequeno, comparado às projeções de aquecimento para o próximo século, que poderá ficar entre os limites de 1,4 e 5,8°C em 2100.²

O que se espera dos modelos climáticos para projetar o clima do futuro

Os modelos climáticos globais dos centros mundiais de meteorologia da Europa, do Japão, da Austrália e América do Norte, utilizados na elaboração do terceiro relatório do IPCC, mostram que o aquecimento dos últimos 100 anos provavelmente não é devido apenas à variabilidade interna do clima. Avaliações baseadas em princípios físicos indicam que a forçante natural não pode explicar sozinho a mudança do clima observada na estrutura vertical da temperatura na atmosfera. Os resultados de estudos oriundos de modelos climáticos estão sujeitos a incertezas associadas: a) às emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis; b) à inclusão de efeitos diretos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas e do efeito do comportamento das mesmas no clima futuro; c) à sensibilidade do clima global e nos padrões regionais do clima futuro simulado pelos modelos. Tais incertezas se devem também às diferentes formas com que cada modelo representa os processos físicos e os mecanismos do sistema climático. Cada um simula um clima global e regional com algumas diferenças nos campos de temperatura do ar, chuva, nebulosidade e circulação atmosférica.

No passado, os primeiros experimentos de mudanças climáticas assumiram situações de desmatamento total na Amazônia e outras regiões tropicais, ou aumentos de concentração de CO₂ na ordem de 100%. Os resultados projetaram climas quentes e secos na América do Sul tropical e outras mudanças no resto do mundo. As respostas têm sido distintas e dependem do tipo de modelo utilizado.

Um sumário dos experimentos de desmatamento na Amazônia realizados desde meados de 1980³ sugere que, devido à erradicação das florestas na região, a temperatura aumentará, do mesmo modo que a evaporação, enquanto

² IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001a.

MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade, setembro de 2006.

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America. *Proceedings of 8 ICSHMO...* Foz do Iguaçu, Brazil: INPE, abril 24-28, 2006. p. 291-296.

³ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

⁴ COSTA, M. H. & FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13:18-34, 2002.

⁵ ZHANG, H.; HENDERSON-SELLERS, A. & MCGUFFIE, K. The compounding effects of tropical deforestation and greenhouse warming on climate. *Climatic Change*, 49:309-338, 2001.

⁶ MARENGO, J. A. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade* – Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI: CREAS (Cenários Regionalizados de Clima para América do Sul). Encontro dos coordenadores dos subprojetos apoiados pelo PROBIO, Brasília, DF, 27 a 29 de outubro de 2004.

⁷ MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

que a chuva e o escoamento superficial diminuirão. Por outro lado, a maioria desses experimentos não muda a concentração de gases de efeito estufa ou de aerossóis na atmosfera. Os realizados por Costa e Foley⁴ e Zhang *et alii*⁵ também usaram 2xCO₂ e desmatamento simultaneamente, gerando reduções de vazões e chuva na Amazônia, bem como um aquecimento que poderia chegar até +1,4°C.

Diante do exposto, a motivação deste artigo foi a avaliação dos cenários climáticos do futuro (até 2100) criados por cinco modelos citados no terceiro relatório e por 16 modelos descritos no quarto relatório do IPCC, para a América do Sul. A informação de mudanças de temperatura e de precipitação em nível anual e sazonal para cada fatia de tempo ou *time slice* – 2010-2040, 2041-2070 e 2070-2100 – é apresentada em forma de mapas continentais e séries de tempo. Muitas dessas avaliações de clima e hidrologia são baseadas no exame dos cenários extremos SRES A2 e B2 dos modelos globais do terceiro relatório em questão. Tais simulações são produtos dos projetos PROBIO, do Ministério do Meio Ambiente (Brasil)⁶ e do GOF-UK (Reino Unido)⁷. Outras análises consideraram resultados de pesquisas recentes, preparadas para elaborar o quarto relatório do IPCC para mudanças na hidrologia dos grandes rios do Brasil.

Modelos globais para projeções de clima no Brasil e na América do Sul

Uma análise das saídas dos modelos climáticos incluídos no terceiro relatório do IPCC para os cenários (SRES) A2 e B2, os quais serão avaliados para o Brasil, permitirá obter uma primeira aproximação do clima futuro para a totalidade do país, porém sem muito detalhamento regional. O estudo toma como referência os cinco modelos listados a seguir:

1. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra (HadCM3);
2. Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, da Austrália (CSIRO-Mk2);
3. Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, do Canadá (CCCMA);
4. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Geophysical Fluids Dynamic Laboratory, dos Estados Unidos (GFDL-CM2);
5. Center for Climatic Studies and Research (CCSR) National Institute for Environmental Studies (NIES), do Japão (CCSR-NIES).

A partir do exame da variabilidade dos modelos, poder-se-ia tentar reduzir as incertezas das previsões, considerando não só um, mas vários cenários de vários modelos. Os cenários climáticos definidos pelo IPCC, em 2001, fundamentam-se em quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para os anos vindouros e são utilizados para analisar o clima futuro em três fatias de tempo (*time slices*), centradas respectivamente em 2020, 2050 e 2080. Também servem de base para as projeções até 2100.

Os cenários utilizados neste artigo são A2 e B2, assim conceituados:

A2 (pessimista) é o cenário que descreve um mundo futuro muito heterogêneo, onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características seriam crescimento populacional alto e menor preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido.

*B2 (otimista) é o cenário que descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais, sustentabilidade econômica, social e ambiental. A mudança tecnológica apresenta-se mais diversa, com forte acento em iniciativas comunitárias e inovação social, em lugar de soluções globais.*⁸

⁸ Todos os cinco modelos e os dois cenários em questão são discutidos no relatório de MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI...* *Op. cit.* e no website do IPCC – Data Distribution Center DDCC (<http://www.ipcc-wg2.org/index.html>), sediados na University of East Anglia no Reino Unido e no Max Planck Institute for Meteorology da Alemanha.

Análises regionais de cenários climáticos do futuro para o Brasil

As séries temporais das anomalias de chuva e temperatura geradas por seis modelos do IPCC para o período 2000–2001, derivadas das observações de quatro regiões brasileiras de interesse (Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata) podem ser visualizadas nas figuras 2 e 3. As anomalias são calculadas em relação à média de 1961–90, sendo que as curvas mostradas representam a média móvel de 11 anos.

1. Amazônia

Em geral, as anomalias são maiores no cenário A2. O modelo GFDL prevê aumentos de chuva de até 2mm dia⁻¹ em 2100, simulando anomalias negativas de chuva de até 0,7mm dia⁻¹ a partir de 2060 (figura 2). No cenário A2, ligeiros aumentos de pluviosidade até o final do século XXI estão configurados no modelo CSIRO. Quanto aos modelos HadCM3 e GFDI, são talvez aqueles que apontam as maiores e mais contrastantes diferenças nos cenários A2 e B2.

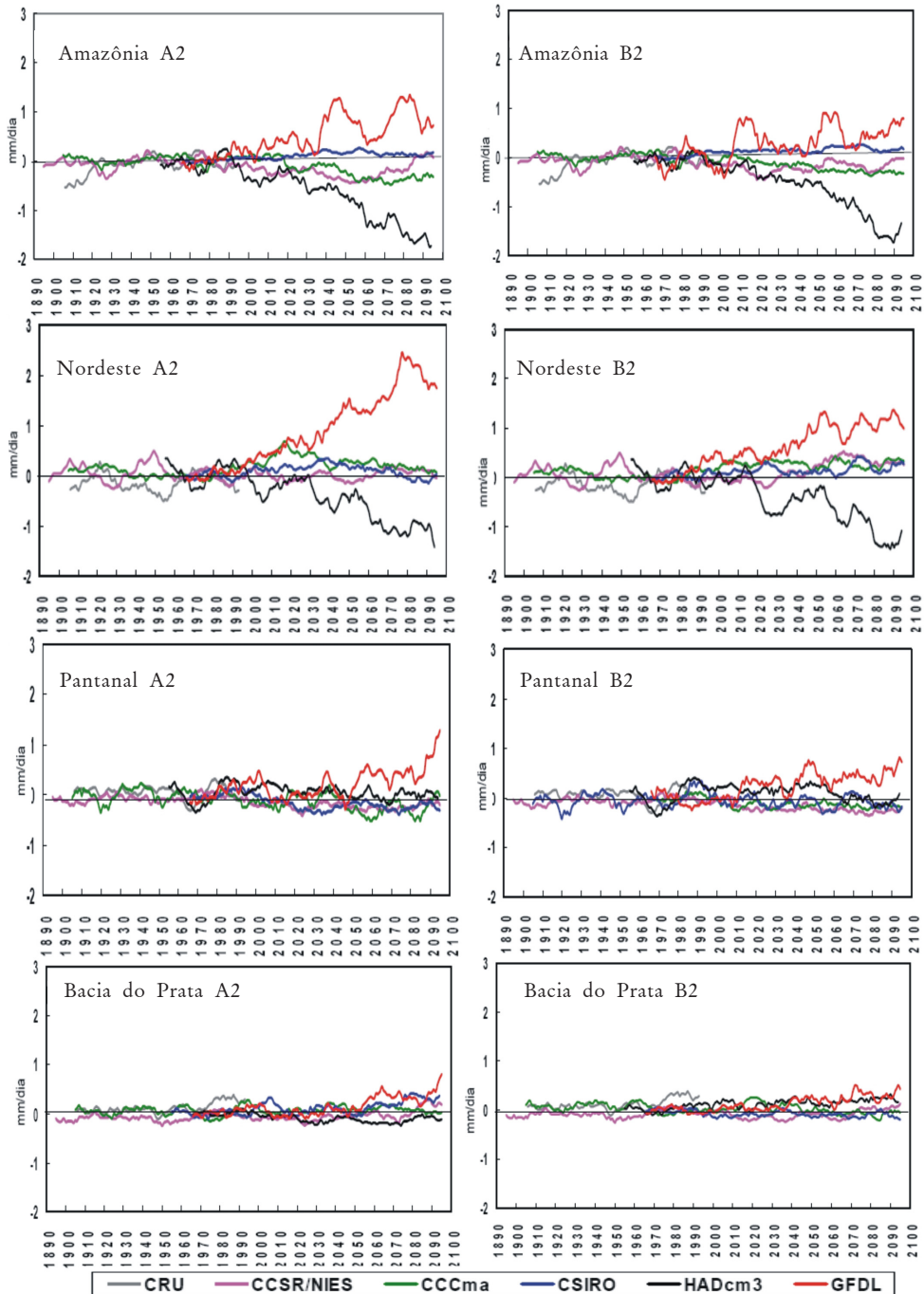


Figura 2: Séries de tempo de anomalias de chuva anual para a Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata, durante 2000-2100 geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera do terceiro relatório do IPCC – CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3. As anomalias foram calculadas em relação à climatologia de 1961-90 de cada modelo. As séries foram suavizadas usando uma média móvel de 11 anos. As observações são da Climate Research Unit (CRU).

Os modelos HadCM3 e GFDL simulam, no cenário B2, anomalias de chuva de -2 e $+1,5\text{mm dia}^{-1}$, respectivamente. A figura 3 ilustra as séries de tempo de anomalias de temperatura geradas pelos cinco modelos do IPCC para os dois cenários em exame. Todos os modelos atestam para 2100 um sensível aquecimento, que chegaria a $2-6^{\circ}\text{C}$ no cenário A2 e $2-5^{\circ}\text{C}$ no B2, mas variando entre modelos. O maior aquecimento é gerado pelo HadCM3, atingindo 8°C no A2 e 6°C no B2.

2. Nordeste

Para o cenário B2, os modelos CSIRO, GFDL, CCMA desde 2000, e o modelo CCSR-NIES desde 2060, mostram anomalias positivas de chuva, que chegam até 2mm dia^{-1} no GFDL para 2100. No cenário A2, o modelo CCSR-NIES apresenta anomalias positivas, porém menos intensas que no cenário B2. No A2, a maior diferença em relação ao B2 está no modelo GFDL, cujas tendências positivas de chuva vão até 2 a 3mm dia^{-1} em 2080 num cenário pessimista, em contraste com 2mm dia^{-1} num cenário otimista (figura 2). Nos dois cenários, o modelo HadCM3 contém anomalias de chuva negativas, chegando até $-1,5\text{mm dia}^{-1}$ em 2100. A figura 3 esclarece as séries de anomalias de temperatura geradas pelos cinco modelos. Todos prevêem aquecimento até 2100, entre 3 e $5,5^{\circ}\text{C}$ em cenário pessimista, e entre $1,5$ e $2,5^{\circ}\text{C}$ em cenário otimista, com variações entre os modelos.

3. Pantanal

Os modelos apresentam para o cenário A2 uma redução de precipitações da ordem de $-0,5\text{mm dia}^{-1}$, exceto o modelo GFDL, que antecipa um aumento de até 1mm dia^{-1} para o ano de 2100. No cenário B2, os modelos HadCM3 sustentam anomalias positivas de no máximo $0,5\text{mm dia}^{-1}$ até 2060, seguidas de anomalias negativas (figura 3). Na figura 4, percebe-se o aquecimento chegando a 6°C em 2100, no cenário A2 dos modelos NIES-CCSR e HadCM3, enquanto que no B2 este aquecimento alcança $4,5^{\circ}\text{C}$ em ambos os modelos. O aumento de temperatura entre modelos varia de 3 a 6°C em A2 e de 2 a $4,5^{\circ}\text{C}$ em B2.

4. Bacia do Prata

Os modelos HadCM3 e GFDL configuram no cenário B2 uma tendência positiva de precipitações pluviométricas, que chegam até $0,5\text{mm dia}^{-1}$ (figura 2). Os modelos CSIRO e CCSR-NEIS, registrando períodos relativamente chuvosos, com anomalias que ficam entre $+0,5\text{mm dia}^{-1}$ e

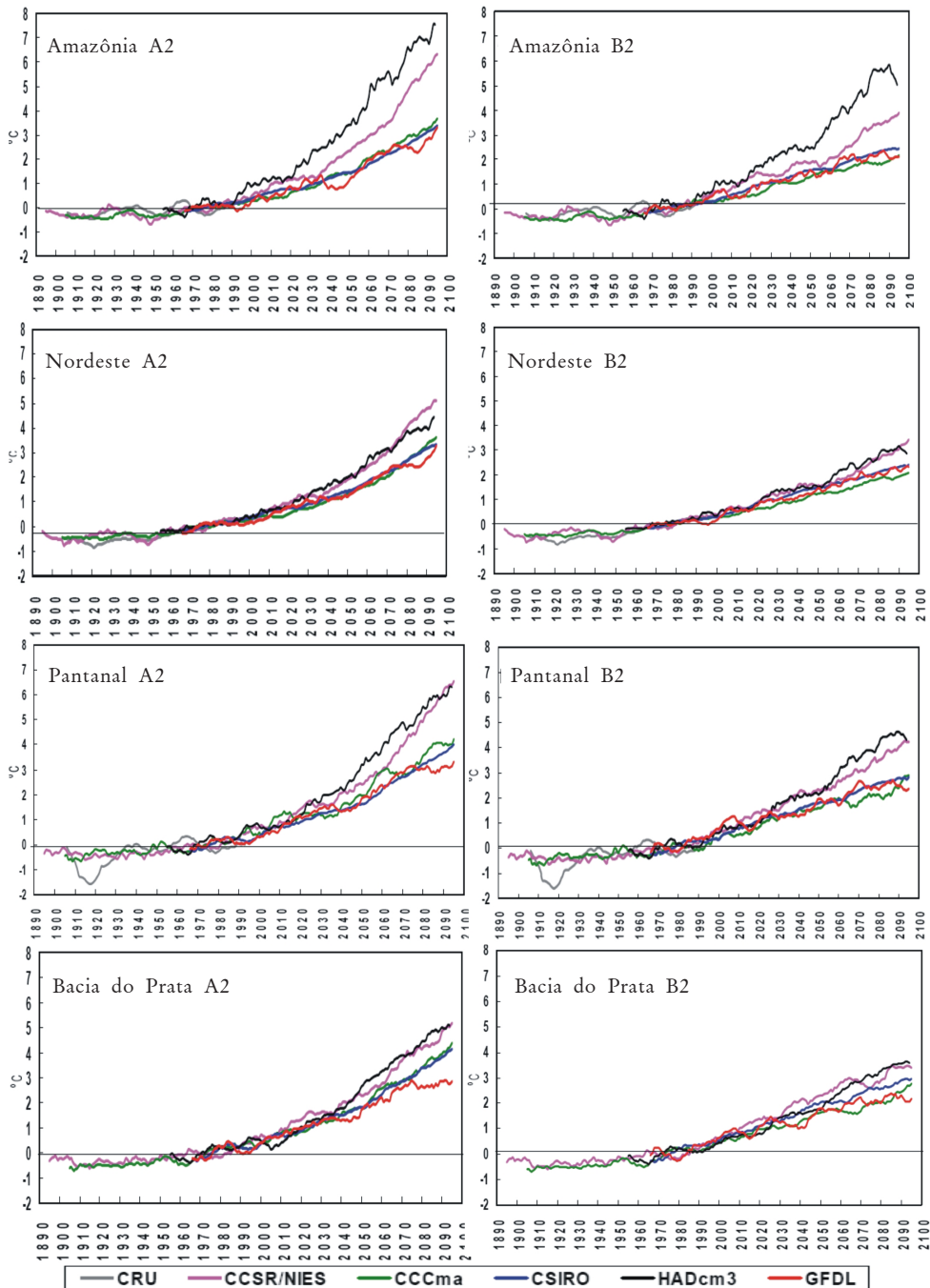


Figura 3: Séries de tempo de anomalias de temperatura anual para a Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata durante 2000-2100, geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera de IPCC-TAR CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3. As anomalias foram calculadas em relação à climatologia de 1961-90 de cada modelo. As séries foram suavizadas usando uma média móvel de 11 anos. As observações são da Climate Research Unit (CRU).

-0,5mm dia⁻¹, apontam uma variabilidade contrastante. O modelo CCSR-NIES apresenta anomalias positivas no cenário A2 entre 2060 e 2080, mas não ultrapassam 1mm dia⁻¹. A figura 4 mostra o maior aquecimento, de até 5°C no cenário A2, e de 3°C no cenário B2, com variações, entre os modelos, da ordem de 2 a 5°C no A2 e de 2 a 3°C no B2. Os modelos HadCM3 e CCSR-NIES registram, em 2100, anomalias positivas de até 5°C para o cenário pessimista, e de 3 a 4°C para o cenário otimista.

Cenários climáticos do futuro para a América do Sul

Uma revisão de alguns dos cenários climáticos previstos no terceiro relatório do IPCC para a América do Sul é apresentada a seguir, utilizando-se mapas de anomalias de chuva e temperatura do ar relativos ao período de 1960-90, e para os cenários extremos de alta emissão (A2) e de baixa emissão de gases de efeito estufa (B2) já referidos. A ênfase recairá na média dos cinco modelos (ou *multimodel ensemble*) utilizados até aqui, para os períodos (*time slices*) centrados em 2020, 2050 e 2080.⁹

1. Precipitação

Na análise do modelo HadCM3, o período DJF (Dezembro/Janeiro/Fevereiro) representa a estação chuvosa em boa parte das regiões sudeste e centro-oeste, assim como no sul da Amazônia, enquanto que o período MAM (Março/Abril/Maio) designa a estação chuvosa do norte da Amazônia e do nordeste brasileiro, onde as chuvas de verão aparecem reduzidas, porém mais fortes no cenário A2 que no cenário B2. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é mais intensa no cenário B2 durante o verão. Observa-se também que na região sul do Brasil registram-se aumentos na chuva sazonal e anual. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) aparece mais intensa e deslocada ao norte de sua posição climática durante DJF e MAM, causando anomalias de chuva no nordeste e norte-centro da Amazônia durante essas estações em 2020. Na primavera (SON – Setembro/Outubro/Novembro) e no inverno (JJA – Junho/Julho/Agosto), para a mesma fatia de tempo centrada em 2020, verifica-se, na Amazônia central, uma tendência à diminuição de chuva na primavera (SON), além de um possível adiantamento da estação chuvosa no sudeste do Brasil, conforme indicado pelas anomalias positivas de chuva (SON), talvez mostrando uma configuração tipo ZCAS, durante a primavera de 2020, no cenário A2.

⁹ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. Op. cit.

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. Op. cit.

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. Cap. 3. In: REBOUÇAS, B.; BRAGA, B & TUNDISI, J. (eds.). *Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo: Escrituras, 2006. p. 63-109.

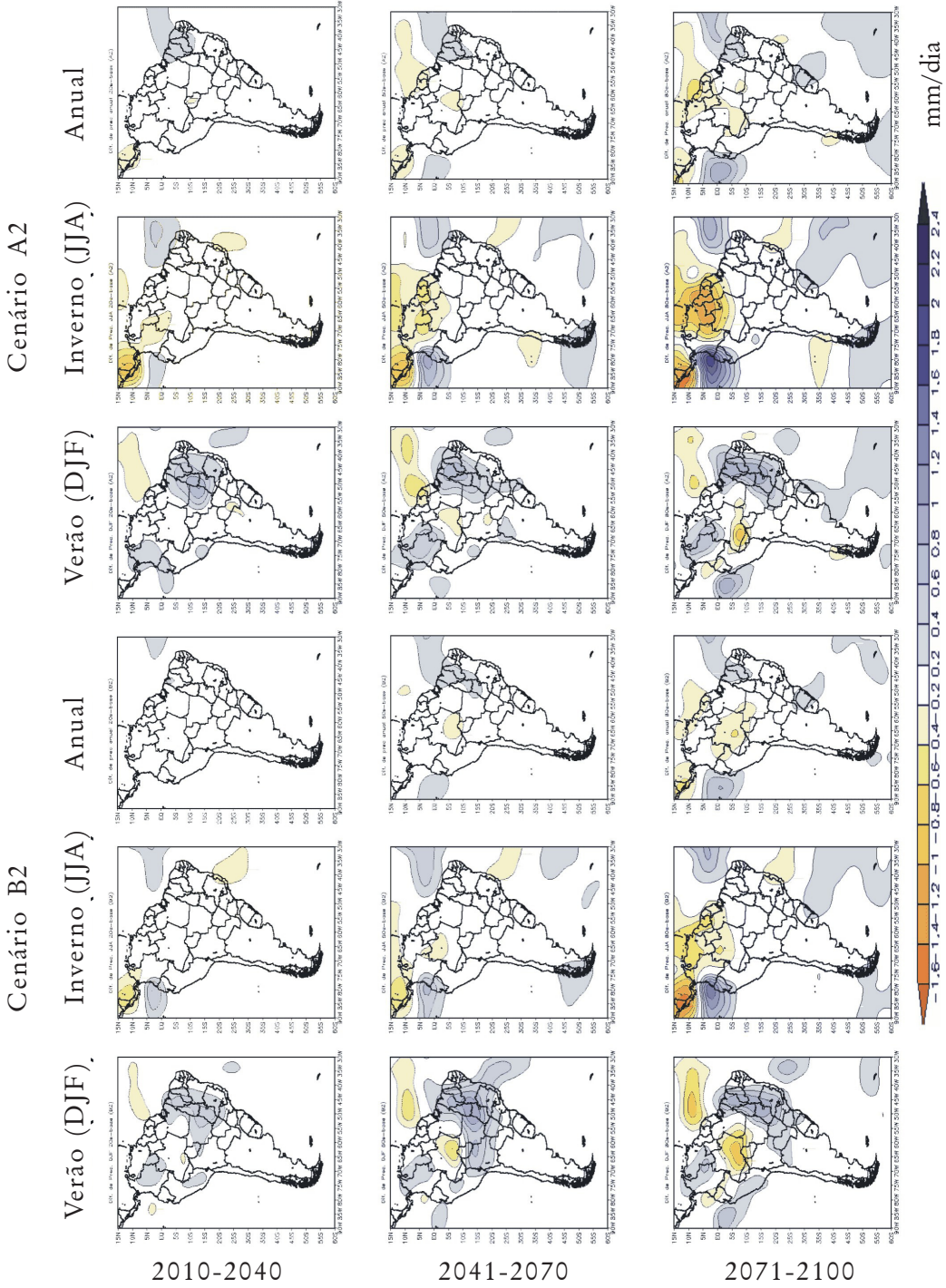


Figura 4: Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos 5 AGCMs para anomalias (em relação a 1961-90) de precipitação em cenários A2 e B2, dos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. As unidades estão em mm/dia.

No inverno (JJA), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) fica mais intensa, próxima a 5°C, no Pacífico e Atlântico tropical.

Na mesma análise, o modelo HadCM3 prevê mais chuva para a região sudeste-sul do Brasil e menos para o centro e norte da Amazônia, enquanto que todos os modelos apresentam diminuição de precipitações na Amazônia em geral. Paradoxalmente, na mesma estação e para esta mesma região, o modelo GFDL mostra anomalias positivas de chuva, mais intensa em B2 que em A2. Os outros modelos não oferecem padrão algum de mudança significativa de precipitação. O mesmo contraste entre estes dois modelos pode ser observado nos *time slices* de 2050 e 2080, especialmente durante o verão (DJF). Para os dois cenários, na Amazônia e no nordeste, existe diminuição de chuva, porém aumento no sudeste do Brasil e no norte do Peru e Equador, nos *time slices* centrados em 2050 e 2080. O cenário produzido pelo HadCM3 poderia ser comparado àquele de um fenômeno El Niño, juntamente com aquecimento no norte do Atlântico, como o de El Niño de 1998, com chuvas acima do normal ao norte do Peru, e uma ZCIT mais ao norte que o normal, gerando secas na Amazônia e, especialmente, no nordeste do Brasil durante o outono (MAM).

A figura 4 mostra a média dos cinco modelos para anomalias de precipitação relativas aos cenários A2 e B2, nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Percebe-se que essa média atesta grande variabilidade, podendo os mapas médios apresentar graus de incerteza. Na Amazônia central, os mapas registram para o verão (DJF) anomalias negativas de chuva que são maiores em 2071-2100, em comparação com 2010-2040, enquanto regiões como o nordeste, sudeste e sul do Brasil se caracterizam por precipitações acima do normal, nos dois cenários A2 e B2. No inverno (JJA), os cenários de 2071-2100 para o norte da Amazônia e da América do Sul sinalizam menos chuva que o normal.

2. Temperaturas do ar

Todos os modelos utilizados prevêem aquecimento na América do Sul, ainda que em diferentes magnitudes.¹⁰ Nos dois cenários, o aquecimento é maior na região tropical, durante a primavera (SON) e verão (DJF), na ordem de 2°C. Ao norte da Amazônia, a temperatura sobe até 3°C no verão (DJF), em cenário A2. A figura 5 mostra a média dos cinco modelos atmosféricos para anomalias de temperatura

¹⁰ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C. & NICOLINI, M. Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalysis. *Journal of Climate*, 17:2261-2280, 2004.

do ar nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. A diferença dos mapas que representam o conjunto de anomalias de precipitação e de temperatura do ar sugere um aquecimento maior durante o inverno, especialmente no cenário A2, para o período de 2071-2100. A região que mais aquece é a Amazônia, com até 3°C a mais no inverno, no cenário B2, considerando-se o período 2071-2100; no cenário A2, a temperatura subiria até 5°C.

As projeções de chuva e temperatura do ar (figuras 4 e 5) apresentam diferenças nos cenários futuros de chuva para a América do Sul, mostrando às vezes, entre os modelos, anomalias de sinais opostos, especialmente entre os modelos GFDL e HadCM3, o que gera anomalias próximas a zero, em média. Com relação à temperatura, os diferentes modelos sinalizam aquecimento para o sul do continente americano, o que tende a ser sempre maior no cenário A2, comparado ao cenário B2.

As chuvas mais intensas aparecem nas simulações dos modelos HadCM3, GFDL e CCSR-NIES.¹¹ No verão (DJF), os modelos HadCM3 e CCSR-NIES revelam anomalias positivas de chuva, que podem ser indicadores de intensificação da ZCAS sobre o sudeste do Brasil, estendendo-se até o oceano Atlântico, enquanto que o modelo GFDL mostra uma ZCAS mais continental. O modelo HadCM3 gera anomalias negativas de chuva na porção norte do nordeste brasileiro e na Amazônia, durante a estação chuvosa MAM (outono), enquanto aponta anomalias positivas de chuva mais intensas na costa do Peru e no Equador, bem como no sul do Brasil, similares ao padrão de anomalias de chuva registrado durante anos de El Niño intenso. Isso também pode ser observado nos mapas da figura 4.

As anomalias positivas de chuva no sul do Brasil, presentes nos vários modelos para 2080, especialmente no cenário A2, poderiam ser explicadas pelo aumento da convergência nessa região. Todos os modelos anunciam aquecimentos de até 2°C em 2080, especialmente na América do Sul subtropical. Nos três *time slices* e nos dois cenários, os modelos HadCM3 e CCSR-NIES prevêem aquecimento maior na região tropical, chegando a 6-8°C na Amazônia em 2080, que já apresenta uma redução de chuva de até 3 a 4mm dia⁻¹. É difícil estabelecer mudanças nos sistemas de circulação (intensidade dos ventos alísios do Atlântico tropical, do jato de baixos níveis, intensidade e frequência de frentes do sul ou na bacia do Chaco e noroeste da Argentina, bem como anticiclones subtropicais do Pacífico e Atlântico), que podem explicar o aumento das precipitações no

¹¹ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. *Op. cit.*

sul, nos cenários de 2080. Uma possível explicação para o fenômeno seria que o aquecimento maior do continente, em comparação com os oceanos adjacentes, alteraria a intensidade dos ventos alísios do Atlântico tropical, que poderiam ficar mais acelerados. Enquanto na Argentina o ar permanecesse mais seco, o transporte de umidade da Amazônia central e norte para o sul dessa mesma região, e para o sul do Brasil e Argentina seria menor. As altas temperaturas poderiam intensificar a baixa do noroeste da Argentina, motivando também uma aceleração do jato de baixos níveis, que no futuro poderiam ser mais frequentes e intensos, transportando ar mais seco que no clima atual. A convergência na saída do jato e a massa de ar transportada pelas frentes frias do sul (que no futuro talvez sejam igualmente mais intensas e frequentes) geram maior pluviosidade. Essa intensificação poderia ser explicada considerando o aquecimento da região subtropical da América nos próximos anos, bem como as anomalias de chuva observadas, em analogia com o clima do presente, que mostra tendências de redução da pluviosidade na região norte da Amazônia e no sul do Brasil, além de jatos intensificados e frequentes.¹²

Na primavera (SON), estação que acontece no início do período chuvoso na maior parte do Brasil, o modelo HadCM3 indica tendências de chuva no sul da Amazônia, sudeste do Brasil, além de monção na América do Sul, sugerindo também um possível adiantamento da estação chuvosa. No inverno, o mesmo modelo e, em menor grau, o CCSR-NIES prevêem chuva mais fraca no sudeste. Nessa estação, todos os modelos apresentam intensificação da ZCIT no Atlântico tropical do norte e Pacífico tropical do leste, anomalias de chuva no norte da Amazônia, na costa da Venezuela e no leste da Colômbia, com reduções intensas de chuvas no cenário A2. O aquecimento é maior no inverno e na primavera que no verão, e mais intenso no cenário A2.

Vazões de rios

Os rios São Francisco, Amazonas e Paraná-Prata são muito importantes pela sua contribuição ao potencial hidrelétrico do Brasil, assim como pelos aspectos ecológicos, sociais, econômicos e agrícolas. A bacia do Paraná-Prata, onde se localizam as cidades economicamente mais importantes do Brasil e do sudeste da América do Sul, representa uma das maiores contribuições ao Produto Interno Bruto (PIB) do país.

¹² MARENGO, J. A. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C. & NICOLINI, M. Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalysis. *Op. cit.*

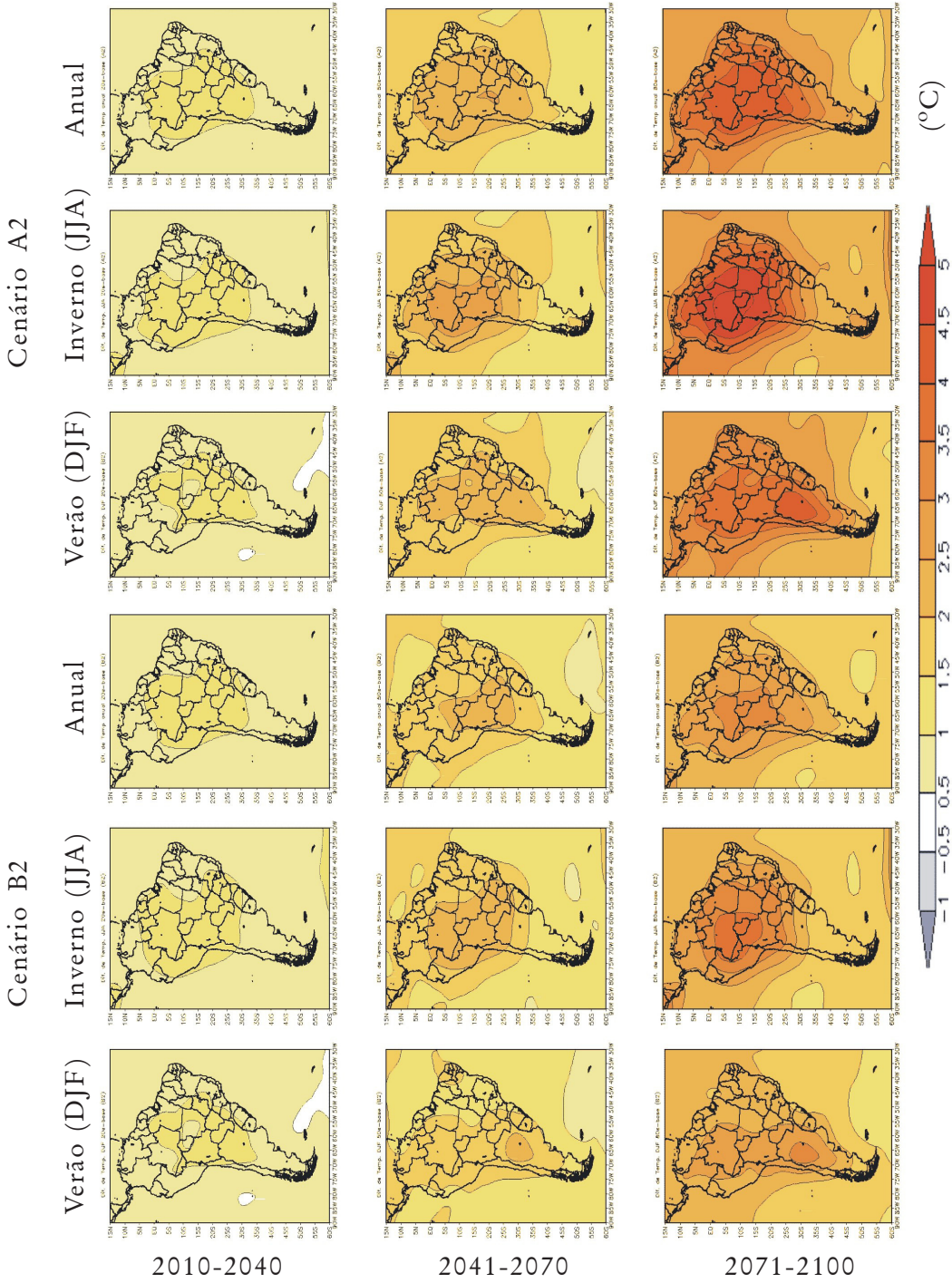


Figura 5: Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos cinco AGCMs para anomalias de temperatura do ar nos cenários A2 e B2, nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. As unidades estão em °C.

Dois estudos publicados recentemente sugerem que já existe evidência de que a atividade humana vem mudando o regime hidrológico e o fluxo dos rios em todo o mundo, seja por causa do aumento da temperatura do planeta, seja em consequência de alterações nas atividades das plantas, em função do dióxido de carbono na atmosfera. Essas mudanças podem gerar consequências nefastas para a produção de alimentos, frequência de inundações e danos para os ecossistemas. Um desses estudos é o relatório de mudanças climáticas publicado pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, ligado ao Centro Meteorológico Inglês¹³, o qual prevê, ao longo do século XXI (2060-2100), no conjunto do planeta, que o fluxo dos rios deve subir cerca de 2% até 2020. Se for considerado também o efeito de concentração de carbono na atmosfera sobre as plantas, o aumento pode chegar a 7%, agravando muito a possibilidade de inundações e deslizamentos de terra em várias partes. O estudo é baseado nos cenários gerados pelo novo modelo do *Hadley Centre* HadGEM1, para o cenário A1B (menos extremo que o cenário A2), utilizado no quarto relatório do IPCC, e que, pelo fato de ter sido gerado por um único modelo, apresenta alguma incerteza. Segundo esse modelo, que inclui o efeito direto do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas, a descarga fluvial no semi-árido brasileiro aumentaria entre 25 e 50%; na Amazônia e no Pantanal, haveria redução entre 25 e 50% e, na bacia do Paraná-Prata, a descarga de vazões deveria aumentar entre 20 e 40%. Essa previsão torna-se consistente diante do aumento de vazões na bacia do Paraná-Prata observado desde 2000.

O outro estudo mencionado foi publicado por um grupo de pesquisadores do Serviço Geológico dos Estados Unidos¹⁴ e avalia o impacto de mudanças climáticas em vazões de rios em nível mundial, utilizando a média feita a partir de doze modelos¹⁵ do IPCC para o período entre 2041 e 2060, em relação ao clima de 1900-70. Os autores mostram aumentos de 20 a 60% nas vazões do rio Paraná-Prata, e reduções entre 10 e 15% na Amazônia e bacia do São Francisco no nordeste do Brasil, em contraposição às projeções do modelo HadGEM1 para essa região. As previsões do HadGEM1 e a média dos modelos revelam aumentos nas vazões do Paraná-Prata e reduções na Amazônia e no Pantanal. Os autores sugerem maior confiabilidade nas previsões para a Amazônia e as bacias do sudeste da América do Sul, enquanto que as incertezas para a bacia do São Francisco permanecem consideráveis.

¹³ UK Met Office. *Climate change, rivers and rainfall*. Recent research on climate change science from the Hadley Centre. UK Met Office, Exeter, December 2005.

¹⁴ MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A. & VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, 17 november 2005.

¹⁵ Os doze modelos são: CCSM3, CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, MIROC3.2(hires), MRI-CGCM2.3.2, HadCM3 e HadGEM1.

Conclusões

Evidências experimentais e tendências já observadas no Brasil, bem como outros estudos considerando as projeções climáticas derivadas dos modelos do IPCC, juntamente com o apanhado de impactos decorrentes da mudança climática no país, permitem concluir que: no Nordeste e na bacia do Prata, embora a chuva tendesse a aumentar no futuro, as elevadas temperaturas do ar simuladas pelos modelos poderiam, de alguma forma, comprometer a disponibilidade de água para a agricultura, consumo ou geração de energia, devido a um acréscimo previsto na evaporação ou evapotranspiração; a extensão de uma estação seca em algumas regiões do Brasil, como a Amazônia, poderia afetar o balanço hidrológico regional e assim prejudicar atividades humanas, ainda que se anuncie aumento de chuva no futuro.

As diferenças entre tendências de mudanças de temperatura e chuva geradas pelos diferentes modelos para algumas regiões, especialmente o Pantanal, sugerem também que existem incertezas nessas projeções. Isso porque os modelos ainda apresentam problemas em representar os processos físicos que realmente acontecem na natureza. De qualquer forma, projeções de extremos climáticos, gerados pelos modelos do IPCC, apontam para um aquecimento maior durante o inverno e estações de transição, assim como para uma tendência de noites mais quentes, condizentes com tendências positivas mais intensas de temperatura mínima do que de temperatura máxima. Também o risco de haver ondas de calor é bastante grande, especialmente nas regiões subtropicais da América do Sul. Existem ainda indicadores de períodos secos mais intensos e prolongados no leste da Amazônia e no Nordeste do Brasil, assim como possibilidades de frequência e intensidade maiores de extremos de chuvas na maior parte da América do Sul tropical.

No momento, estudos de impactos precisam concentrar-se nas atividades mais sensíveis à elevação de temperatura e do nível do mar, cujas incertezas são menores. Nesses estudos, deverão ser abordadas ainda as possíveis mudanças na frequência de extremos climáticos, como secas, tempestades severas, inundações etc. Pela própria natureza dos sistemas, é necessário que as investigações sejam implementadas de modo interdisciplinar. A integração se faz necessária, a fim de que se possam desenhar estratégias, tanto de mitigação quanto de adaptação, eficazes para enfrentar mudanças adversas do clima.

Este documento é derivado dos resultados dos projetos *Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*, apoiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO, com o auxílio do Ministério do Meio Ambiente, BIRD, GEF, CNPq e pelo Global Opportunity Fund (GOF) do Reino Unido, através do projeto *Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South America*.

José Marengo é graduado e doutor em Meteorologia e pesquisador do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, São Paulo.

marengo@cptec.inpe.br

A questão da vulnerabilidade e adaptação deve ser tratada de maneira pragmática, inclusive com o desenvolvimento de modelos que levem em conta as necessidades dos países em desenvolvimento. Nesse esforço, é crucial a participação de técnicos e cientistas, bem como o fortalecimento das instituições desses países. A experiência brasileira nesse domínio mostra que é preciso ajustar os métodos aplicáveis aos cenários de mudança climática resultantes de modelos globais para projeções de escopo regional ou local. Tal ajuste seria útil para as investigações sobre os impactos da mudança climática em áreas como gerenciamento de recursos hídricos, ecossistemas, atividades agrícolas e mesmo propagação de doenças. A maior resolução obtida em modelos de escopo regional ou local concorreria para uma previsão realista de alterações extremas, que, por sua vez, contribuiria substancialmente para uma avaliação mais precisa da vulnerabilidade dos países à mudança do clima e para a melhoria de sua capacidade de adaptação.



FLUXOS TURBULENTOS

O DIÁLOGO ENTRE A SUPERFÍCIE E A ATMOSFERA

Oswaldo L. Moraes
Otávio C. Acevedo
David R. Fitzjarrald
Ricardo K. Sakai

De que maneira a atmosfera inferior transporta e difunde gases e partículas nela abandonados? As páginas que seguem descrevem os fundamentos científicos da técnica de quantificar os fluxos turbulentos, ou seja, as trocas de momentum, energia e massa, incluindo gases-traços, entre a superfície e a atmosfera. Essa técnica, conhecida como correlação de vórtices (*eddy correlation*), tem sido a principal usada na estimativa das contribuições de diferentes ecossistemas para o balanço de CO₂. Limitações de resultados e avanços recentes são apresentados, particularmente, para a região amazônica. A parte das ciências atmosféricas que se ocupa do assunto é a micrometeorologia.

1. Questões preliminares

O dióxido de Carbono (CO₂) é o mais importante gás de efeito estufa resultante de ações antropogênicas¹. As concentrações atmosféricas globais de CO₂ passaram de 280 partes por milhão (ppm), no período pré-industrial, para 379 ppm em 2005. O aumento global dessas concentrações é devido principalmente à queima de combustíveis fósseis e a mudanças no uso do solo por queimadas e práticas agrícolas. Em síntese, o aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera é resultante de ações que ocorrem na superfície do planeta. Assim, a conexão primeira entre a ação do homem e a transferência decorrente desta ação, para a atmosfera, ocorre em uma escala que não é de domínio regional ou continental. O processo inicial se dá em uma escala local. As interações diretas entre superfície e atmosfera possuem escalas de tempo da ordem de, no máximo, horas, e as escalas espaciais, da ordem de, no máximo, alguns quilômetros. Em outras palavras: quando se fala que a concentração de CO₂ atmosférico é de 379 ppm, faz-se referência ao valor médio em uma escala planetária. Entretanto, se a emissão ocorre em um local específico, quais são os mecanismos que transportam e distribuem esta emissão em todo o planeta?

A conexão entre a superfície do planeta e as regiões mais profundas da atmosfera e, em última instância, com a atmosfera global, é uma questão que requer o entendimento completo da interação terra-atmosfera, cuja complexidade deve ser perseguida com todas as ferramentas disponíveis pela ciência, sejam elas teóricas, experimentais ou de simulação.

O estado da atmosfera inferior é determinado, em grande parte, pelas trocas de energia e massa com a superfície. Conforme Middleton², foi a possibilidade de se medir com precisão temperatura e pressão que deu início, no século XIX, à moderna Meteorologia. Entretanto, o modo pelo qual a atmosfera inferior é aquecida e umedecida pelos fluxos superficiais constitui um problema relativamente novo. Observações dos fluxos superficiais tiveram início na década de 1970 com o desenvolvimento de sensores capazes de fazer dezenas de leituras a cada segundo. Posteriormente, nos anos 80 e início da década de 90, mostrou-se que a mesma técnica podia ser usada para quantificar os fluxos de CO₂ superficiais.

A emissão, ou absorção, que acontece na superfície, é primeiramente governada pelos processos característicos daquilo que se conhece como *Camada Limite Planetária*

¹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis – Summary for Policy-makers*, 2007.

² MIDDLETON, W. E. K. *Invention of the Meteorological Instruments*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Press, 1969.

(CLP). O conceito de Camada Limite em um fluido pode ser atribuído ao matemático e engenheiro inglês William Froude, que, na década de 70 do século XIX, fez uma série de experiências sobre as forças de arrasto em uma fina placa colocada na superfície da água. No contexto atmosférico, entretanto, não é fácil definir o que seja a Camada Limite. Para Stull³, a CLP designa a região da atmosfera que fica em contato direto com a superfície e responde às forçantes superficiais com uma escala de tempo da ordem de uma hora. Uma das principais características da CLP é a sua natureza turbulenta. Mas, a estrutura dessa turbulência difere em muito da turbulência usualmente estudada em túneis de vento. A turbulência na CLP, gerada pela convecção térmica, coexiste com a turbulência gerada mecanicamente. Além disso, interage com o vento médio que, por sua vez, é influenciado pela rotação da terra.

Sobre a superfície sólida, em particular, a estrutura da CLP é fortemente influenciada pelo ciclo diurno devido à forçante solar e pela presença de nuvens. Em resposta a este aquecimento/resfriamento da superfície, a profundidade e outras características da CLP apresentam significativas variações durante o ciclo. Logo após o nascer do sol, o aquecimento contínuo da superfície e os movimentos convectivos resultantes fazem com que a profundidade da CLP aumente de maneira contínua até alcançar um valor máximo (1 a 2km) durante a tarde. Seguindo-se ao pôr-do-sol, e através da noite, o esfriamento radiativo da superfície provoca a supressão ou enfraquecimento da turbulência e, conseqüentemente, a altura desta camada apresenta-se bem mais rasa. Perfis de vento, temperatura e concentração dos constituintes atmosféricos também exibem tal variação durante o ciclo diurno. Sobre os oceanos, mares e lagos, as variações diurnas são menores por causa da grande capacidade térmica da água.

Em resumo, os movimentos na CLP são quase sempre turbulentos. *Turbulência* refere-se ao movimento aparentemente caótico que se manifesta de forma irregular em flutuações aleatórias na velocidade, temperatura e concentração de escalares em torno de um valor médio. Os valores médios de vento, temperatura e concentrações variam acentuadamente, em função da altura acima do solo, nas primeiras dezenas de metros, sendo esta região conhecida como *Camada Limite Superficial* (CLS). É surpreendente que a investigação sistemática da CLS, assim como da CLP, esteja confinada aos últimos quarenta anos. Entretanto, a principal razão para isto é que, somente com o desenvolvimento de

³ STULL, R. B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Acad. Publs., 1988.

sensores rápidos e robustos, assim como com o advento de recursos computacionais de porte, tal investigação tornou-se consistente.

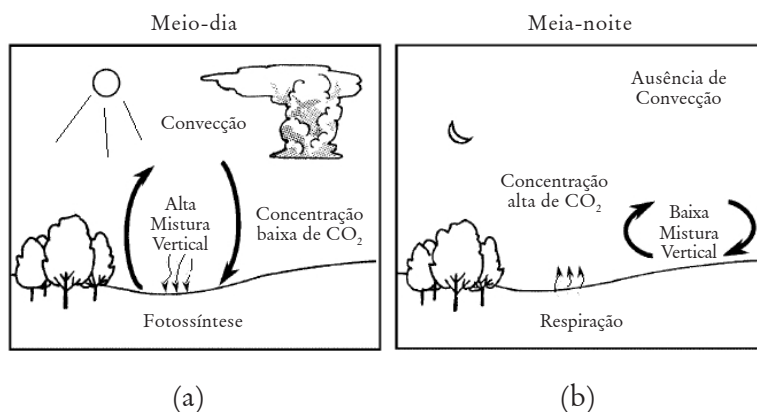


Figura 1: Em períodos diurnos (a), a forçante térmica induz turbulência e homogeneização das concentrações. Durante a noite (b), a supressão da turbulência provoca altas concentrações de contaminantes.

Outra questão crucial na investigação da CLP ainda permanece em aberto e, quem sabe, continuará assim por tempo indefinido: a dificuldade matemática na abordagem das equações que a governam. As equações que governam o escoamento na atmosfera são as equações de Navier-Stokes e equações de conservação de energia e massa. Tais equações são diferenciais parciais, não lineares e acopladas, para as quais não existem soluções analíticas. Além disso, referem-se a valores dependentes do tempo e do espaço, enquanto que nosso interesse básico está no estado médio da atmosfera. Recursos e hipóteses matemáticas possibilitam que equações para as variáveis médias sejam obtidas das equações básicas, mas elas permanecem não lineares, acopladas e com um problema adicional: o surgimento de novos termos. Em outras palavras, se as equações básicas constituíam um sistema fechado, no sentido de envolver o mesmo número de variáveis e equações, ainda que sem solução analítica, as equações para as variáveis médias permanecem não lineares, acopladas, e constituem agora um sistema não fechado. Estes termos adicionais, surgidos nesse sistema derivado, possuem as informações de como a superfície interage com a atmosfera e são chamados de *fluxos turbulentos*.

O saldo da transferência de grandezas escalares resultante do ciclo diário dos fluxos turbulentos é consequência

dos processos de interação da atmosfera com a superfície. Particularmente, para o caso de CO_2 , a técnica que quantifica este saldo, a correlação de vórtices (*eddy correlation*), busca responder uma das questões fundamentais que dizem respeito à Floresta Amazônica, a de seu papel para o ciclo global do Carbono como fonte ou sumidouro de CO_2 para a atmosfera. A técnica permite observar diretamente o CO_2 atmosférico e seu movimento vertical com medidas de longo prazo, a partir de torres operando ao longo de meses e anos. Permite ainda determinar diretamente o *saldo de transferência do ecossistema* (STE), quantidade que engloba os processos de fotossíntese, respiração antrópica e respiração heterotrófica.

2. Aspectos teóricos e experimentais

A equação que governa a evolução temporal da concentração de qualquer gás em um fluido é dada por

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{V}) = S \quad (1),$$

que é a conhecida equação de continuidade: C representa a concentração do material (CO_2 por exemplo), \vec{V} é a velocidade de escoamento do fluido e S o termo de fonte. Note-se que esta equação é acoplada à equação, não escrita aqui, de Navier-Stokes, pois necessita do campo de velocidade para ser resolvida. A equação (1) descreve a dependência de C em função de (x, y, z, t) , isto é, $C = C(x, y, z, t)$. Entretanto, do ponto de vista prático, ainda que pudesse ser resolvida para a determinação exata de $C(x, y, z, t)$, tal equação seria de pouca utilidade. O importante é o conhecimento dos valores médios desta função. Deixando-se de lado toda a questão formal do problema de média em turbulência⁴ consideremos as médias de Reynolds⁵ como abordagem inicial. Reynolds sugeriu que os valores de qualquer grandeza podem ser decompostos em um termo médio mais um valor que flutua em torno dessa média, ou seja,

$$C(x, y, z, t) = \bar{C} + c(x, y, z, t) \quad (2),$$

onde a barra denota o valor médio e c o valor da flutuação. Decomposição similar deve ser efetuada sobre as três componentes do campo de velocidade que, a partir de agora, vamos representar por $U = \bar{U} + u$ para a componente ao longo da direção x , para a componente ao longo

$V = \bar{V} + v$

⁴ MORAES, O. L. L. & ACEVEDO, O. C. Camada Limite Planetária – Problemas com Medições e Interpretação de Dados. *Turbulência*, 4, 109-136, 2004.

⁵ REYNOLDS, O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, A186, 123-164, 1895.

da direção y e $W=\overline{W}+w$ para a componente vertical do vento. Com tais substituições, a equação que descreve a evolução da concentração média é reescrita como:

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} + V \frac{\partial \overline{C}}{\partial y} + W \frac{\partial \overline{C}}{\partial z} + \frac{\partial \overline{uc}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{vc}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{wc}}{\partial z} = S \quad (3)$$

Na derivação acima já está implícita a hipótese de que o fluido é incompressível. Note-se, conforme já referido, que esta equação possui as características da equação (1), diferindo, substancialmente, pelo surgimento dos três últimos termos do lado direito, que designam os fluxos turbulentos. Antes de discutir em maiores detalhes as características dos mesmos, façamos algumas hipóteses adicionais, que não são restritivas, de modo a simplificar a equação (3).

Adotemos um sistema de coordenadas que esteja alinhado com a direção do vento médio e consideremos também que a turbulência seja horizontalmente homogênea. A primeira simplificação é sempre possível de ser feita. A segunda possui validade se a superfície sobre a qual estamos querendo descrever a concentração for plana. Com tais suposições, a equação que descreve a concentração de CO_2 é dada por

$$\frac{\partial \overline{C}}{\partial t} + U \frac{\partial \overline{C}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{wc}}{\partial z} = S \quad (4)$$

A equação (3) apresenta um claro indício de que a concentração média é dominada por um efeito advectivo e um efeito difusivo vertical. No caso de o vento ser fraco, a divergência vertical do fluxo é que domina a evolução da concentração média. Importa ressaltar que a evolução da concentração média não é governada pelo fluxo, mas pelo perfil do fluxo. E qual o significado do termo $\frac{\partial \overline{wc}}{\partial z}$? Por que a ele atribuímos o nome de fluxo?

O *fluxo* de uma propriedade é definido como a quantidade dessa propriedade que atravessa uma determinada superfície, por unidade de área e por unidade de tempo. Assim, aquilo que foi acima caracterizado como fluxos turbulentos não satisfaz essa definição. Entretanto, em meteorologia, define-se como *fluxo cinemático* o produto de uma propriedade pela magnitude da velocidade do vento que transporta a propriedade. Se a turbulência atmosférica tivesse uma natureza absolutamente randômica, perturbações em

w transportariam perturbações tanto positivas quanto negativas de C . Nesse caso, \overline{wC} tenderia a zero após a operação de média. Porém, isso não ocorre, mostrando que a turbulência não é um processo totalmente aleatório, motivo pelo qual transportes turbulentos existem. A figura 2 ilustra essa constatação, em função do perfil vertical médio da propriedade transportada. No caso em que a concentração cresce com a altura, a maioria das parcelas de ar que se deslocam para baixo (w' negativo) trarão ar mais “sujo” (C positivo) de níveis superiores e aquelas que se deslocam para cima (w' positivo) levarão ar mais “limpo” (C positivo). Neste caso, na média, o fluxo turbulento será positivo. Do contrário, se o perfil vertical de concentração crescer com a altura, o inverso ocorrerá, causando um fluxo turbulento \overline{wC} negativo.

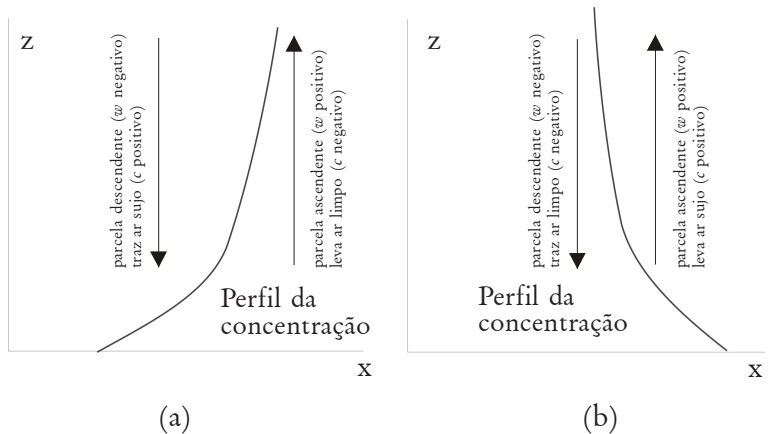


Figura 2: O fluxo turbulento é na direção contrária do aumento da concentração. Em (a), quer as massas de ar desloquem-se para cima, quer para baixo, o perfil determina um fluxo para a superfície. Em (b) o fluxo é para os níveis superiores.

3. Medidas dos fluxos turbulentos

A técnica mais utilizada para observações experimentais dos fluxos turbulentos é a chamada *correlação dos vórtices* (*eddy correlation*): procede-se a observações em alta frequência, tanto da propriedade cujos fluxos se quer estimar, quanto da componente do vento na direção em que o fluxo ocorre. Por exemplo, para se medir o fluxo vertical turbulento de CO_2 (\overline{wC}), deve-se coletar um grande número de amostras de ambas as variáveis (w e c). A figura 3, mostra tais variáveis, para um dia em particular, medidas

com frequência de 10 Hz sobre uma área de pastagem na Amazônia. A partir dessas observações detalhadas, efetua-se a covariância estatística entre as duas variáveis (uma covariância entre duas variáveis é a média do produto da perturbação de cada uma dessas variáveis em relação a sua média, ou no caso do exemplo, \overline{wC}). Fisicamente, isso corresponde a um “inventário” de todo o transporte da propriedade pela componente do vento, a cada instante observado. O fato, mencionado na sessão anterior, de que os campos turbulentos não são totalmente aleatórios, faz com que a correlação entre as duas variáveis turbulentas seja não necessariamente nula.

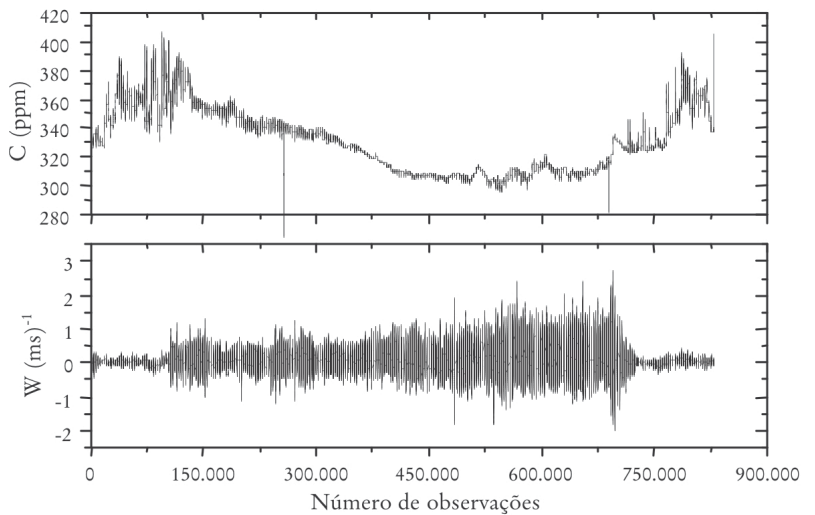


Figura 3: Valores instantâneos, a 10 Hz, da concentração de CO_2 e velocidade vertical do vento, coletados com sensores do sistema de correlação de vórtices, em uma região desmatada da Amazônia. Em um dia de observação, com esta taxa de amostragem, são coletados 864.000 valores. No eixo horizontal, 0 representa 00:00 e 864.000 representa 24:00.

A figura 3 merece ainda algumas considerações. Inicialmente, é importante referir que os sensores do sistema de correlação de vórtices fazem “leituras” do valor absoluto da variável em questão e não da sua flutuação. Isto é, as figuras representam W e C e não w e c , conforme notação adotada anteriormente. Também, é evidente que os valores médios, \overline{W} e \overline{C} , associados com este conjunto de dados, são altamente dependentes do período escolhido para o cálculo de tal média. É, também, muito ilustrativo o fato de que as flutuações nos valores da concentração de CO_2 no

início e final do gráfico são maiores do que os valores intermediários. A figura, em seu eixo horizontal, representa um dia. Assim, seu início e final mostram dados coletados durante a noite. A região intermediária, dados coletados durante o dia. Similarmente, uma consideração equivalente pode ser feita para a componente vertical da velocidade do vento. No período diurno, é facilmente constatável que a turbulência fica muito mais intensa do que no período noturno.

A título de ilustração, e sem cálculos mais refinados, pode-se estimar, a partir desses dados, o fluxo turbulento de CO_2 durante um intervalo de meia hora para um período noturno e um período diurno. As figuras 4 e 5, a seguir, ilustram tal cálculo. Em cada figura, vê-se respectivamente, no quadro superior, a componente turbulenta da velocidade, (w), no quadro intermediário, a componente turbulenta da concentração de CO_2 , (c), e no quadro inferior, o produto (wc). Neste último quadro, a linha vermelha representa o valor médio, ou seja, o fluxo turbulento \overline{wc} . Em termos numéricos, para este exemplo, os valores correspondentes são iguais a $-0,013\text{mg}/(\text{m}^2\text{s})$ para o período diurno e $0,07\text{mg}/(\text{m}^2\text{s})$ para o período noturno.

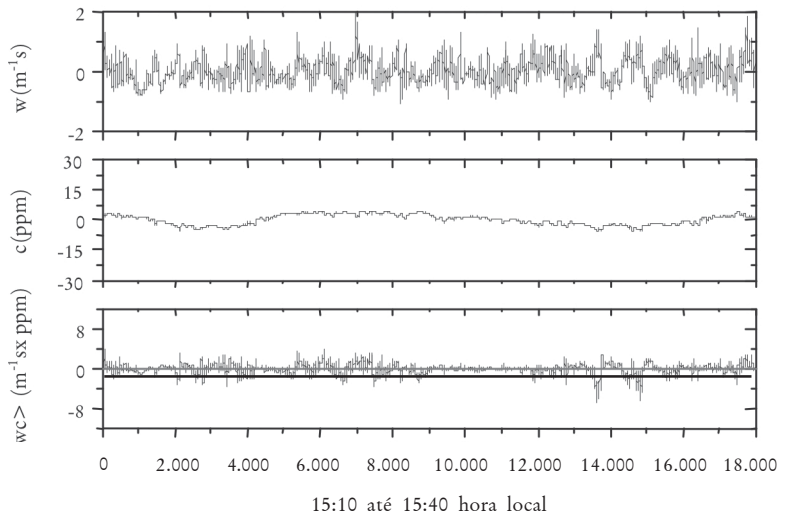


Figura 4: O quadro superior apresenta 30 minutos de dados noturnos da velocidade vertical turbulenta do vento da série ilustrada na figura 3. O quadro intermediário mostra a concentração turbulenta de CO_2 . O quadro inferior refere-se ao produto das duas séries. A linha preta é o valor médio, ou seja, o fluxo turbulento de CO_2 .

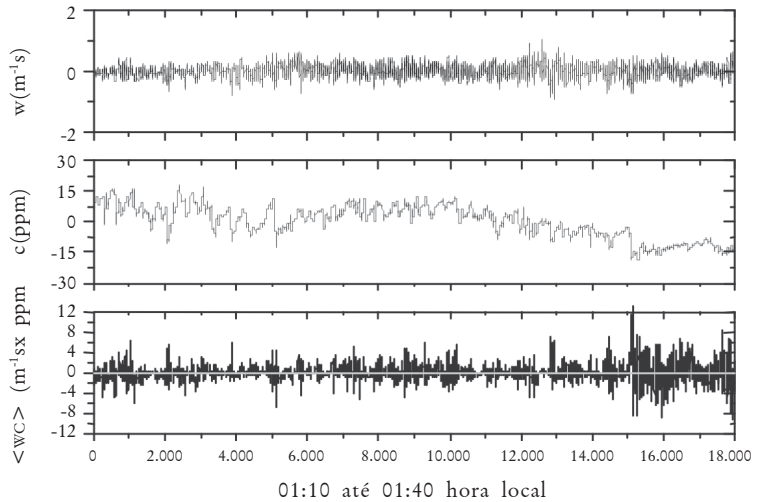


Figura 5: Como na figura 4 para meia hora de dados diurnos.

Um aspecto, aparentemente contraditório, e que está ressaltado nas figuras, é a amplitude da concentração de CO₂, significativamente maior no período noturno do que no período diurno, embora o fluxo, em valor absoluto, seja maior durante o dia do que durante a noite. Isto é consequência da intensidade da turbulência. Em condições convectivas, a turbulência tende a homogeneizar a concentração, enquanto que em condições estáveis, de fraca turbulência, as heterogeneidades são ressaltadas.

No exemplo acima, o fluxo noturno ($0,07mg/(m^2s)$) e o fluxo diurno e $-0,013mg/(m^2s)$ foram calculados para intervalos de trinta minutos. Este período é comumente conhecido como *janela*. A janela utilizada para o cálculo do fluxo é uma das questões fundamentais e motivo de intensas pesquisas atualmente. Detalhes do problema e dos resultados contraditórios que podem ser encontrados a partir de escolhas de diferentes janelas para a determinação dos fluxos estão apresentados na seção quatro.

Problemas presentes nas medidas dos fluxos

Uma vez que permite medir diretamente os fluxos turbulentos, a técnica de correlação de vórtices é a escolha lógica para a determinação da troca líquida de CO₂ entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. Entretanto, a implementação desta técnica pode variar significativamente entre os sítios experimentais. Isso é particularmente verdadeiro para as medidas de fluxo de CO₂, as quais podem fazer uso dos sistemas *open-path* ou *closed-path* para o sensor de concentração do gás. Também existem diferenças entre as

configurações de anemômetros sônicos disponíveis comercialmente e que devem ser consideradas no momento dos cálculos. Ademais, considerações próprias necessitam ser introduzidas para corrigir, ou atenuar, os efeitos aerodinâmicos introduzidos nos escoamentos pelas plataformas de observação.

Outro problema adicional é que requer considerações específicas é a representatividade do sítio onde o sistema de correlação é instalado. A vegetação natural apresenta-se espacialmente não-homogênea. Em particular, a variabilidade espacial da densidade de vegetação influencia a circulação atmosférica nos níveis mais baixos, afetando a troca superficial de energia, água e Carbono em uma larga escala. Os processos para extrair informações nestas escalas dependem, por sua vez, das escalas espaciais e temporais nas quais os dados são coletados.

Tão relevantes quanto os problemas apresentados anteriormente é aquele relativo às medições em condições noturnas e de vento calmo. A respiração noturna do solo e da vegetação é um importante componente do balanço de Carbono de qualquer ecossistema, constituindo-se num dado desafiador, porque ocorre em condições sobre as quais, muitas vezes, a técnica de correlação de vórtices é questionável. Uma aproximação usual para corrigir o problema é adicionar ao fluxo calculado o armazenamento que ocorre entre o solo e a altura em que o sistema experimental é montado. Nesta solução empírica, o armazenamento é igual à integração vertical da mudança da concentração de CO_2 , no tempo, ao longo desta camada. Note-se que, durante o dia, mesmo em condições de ventos fracos, a mistura turbulenta é suficientemente intensa, de modo que a subestimação dos fluxos não é significativa. Durante a noite, por outro lado, observa-se que o fluxo medido de CO_2 tende a zero, quando a turbulência é suprimida. Um comportamento semelhante é predito tanto pela Teoria-K como pela Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov. Em ambas, o fluxo é proporcional ao produto da intensidade da turbulência (u_*) pelo gradiente do valor médio da quantidade transportada. Em outras palavras, o fluxo decresce quando a turbulência decresce. Wofsy *et al.*⁶ e Goulden *et al.*⁷, entretanto, apontam que a intensidade biológica da fonte de CO_2 não deve ser uma função do movimento do ar, implicando que a concentração de CO_2 entre a superfície e o nível de observação deve ser independente da intensidade da turbulência. Numerosas observações, sumarizadas em Massman e Lee,⁸ entretanto, mostram que a correção com o armazenamento

⁶ WOFSY, S. C. *et al.*. Net exchange of CO_2 in a mid-latitude forest. *Science*, 260, 1314-1317, 1993.

⁷ GOULDEN, M. L. *et al.*. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Glob. Change Biol.*, 2, 169-182, 1996.

⁸ MASSMAN, W. J. & LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric. And Forest Meteorol.*, 113, 121-144, 2002.

não faz com que os fluxos reavaliados tenham valores iguais àqueles obtidos em condições de ventos fortes. Em alguns casos, identifica-se um valor crítico de u_* , acima do qual o fluxo tende a um valor assintótico e igual à intensidade da fonte biológica. Similarmente, o balanço de energia é comprometido em situação nas quais u_* é pequeno, melhorando, consideravelmente, nas situações em que u_* é grande. Uma prática comum, neste caso, é substituir os fluxos dos períodos nos quais $u_* < (u_*)_c$ pelo fluxo estimado com uma função da temperatura (Q_{10}) obtida de períodos de forte turbulência. Q_{10} é o aumento relativo na respiração resultante de um aumento de 10° na temperatura. Esta técnica de substituição dos fluxos, nos casos de pouca intensidade da turbulência, é referida como correção por u_* . Os aspectos discutidos acima estão sintetizados na figura 6.

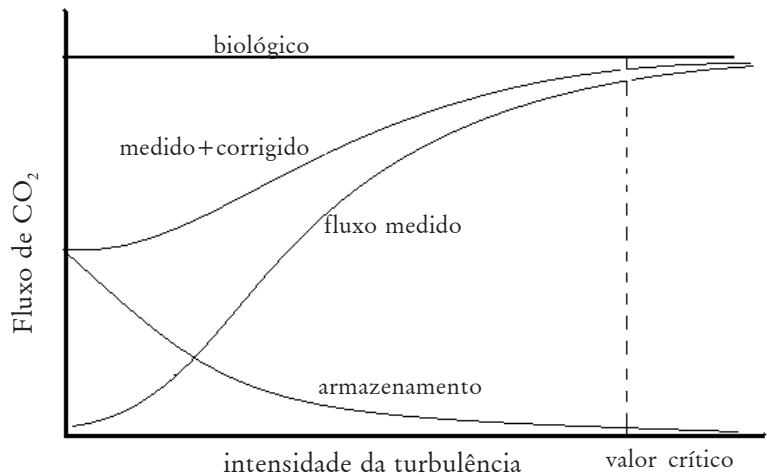


Figura 6: O fluxo medido de CO_2 apresenta uma dependência da intensidade da turbulência. Usualmente, a este fluxo é adicionada a taxa de acumulação, estimada entre a superfície e o nível no qual o sistema de correlação de vórtices é montado. A soma destas duas quantidades tende assintoticamente para o valor esperado da emissão pelo ecossistema.

4. Fluxos superficiais na Floresta Amazônica

A técnica da covariância dos vórtices foi utilizada para a determinação de fluxos superficiais entre a Floresta Amazônica e a atmosfera, pela primeira vez nos experimentos ABLE 2A e 2B (*Amazon Boundary Layer Experiment*), na década de 80.⁹ Os resultados desse período se referem principalmente à partição da energia em fluxos de calor sensível e latente¹⁰. Fan *et al.*¹¹ aproveitaram dados de tais

⁹ GARSTANG, M. *et al.*. The Amazon Boundary Layer Experiment (ABLE-2B): A Meteorological perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 19-32, 1990.

¹⁰ FITZJARRALD, D. R. *et al.*. Turbulent transport observed just above the Amazon Forest. *Journal of Geophysical Research*, (93):20,1551-1563, 1988.

SÁ, L. D. de A.; VISWANADHAM, Y. & MANZI, A. O. Energy receipt partitioning over Amazon Forest. *Theoretical and Applied Climatology*, 39:1-16, 1988.

¹¹ FAN, S. C.; WOFYSY, S. C.; BAKWIN, P. S. & JACOB, D. J. Atmosphere-Biosphere exchange of CO_2 and O_3 in the Central Amazonforest. *Journal of Geophysical Research*, 95:16851-16864, 1990.

experimentos para quantificar as transferências de CO₂ entre a Amazônia e a atmosfera. Neste trabalho, apenas 12 dias de dados são analisados, com a conclusão de que a floresta absorve Carbono a uma taxa de 2,2 T C ha⁻¹ ano⁻¹. Embora seja uma estimativa bastante simplista, originada a partir de uma série muito curta de dados, o estudo marcou o início de uma nova metodologia para responder uma das questões mais fundamentais que dizem respeito à Floresta Amazônica, a de seu papel para o ciclo global do Carbono como fonte ou sumidouro de CO₂ para a atmosfera.

A possibilidade de determinação do saldo da transferência de Carbono entre a Floresta e a atmosfera pela covariância dos vórtices representou uma nova era em termos da caracterização deste ecossistema e de seu papel global. A técnica permite medidas de longo prazo, a partir de torres operando ao longo de meses e anos. Também representa, naturalmente, uma média dos fluxos sobre uma área com dimensões na ordem de centenas de metros, que é a região de onde se originam os turbilhões observados na torre micrometeorológica. Além disso, ao observar diretamente o CO₂ atmosférico e seu movimento vertical, essa técnica permite a quantificação direta do saldo de transferência do ecossistema (STE), quantidade que engloba os processos de fotossíntese, respiração autotrófica e respiração heterotrófica.

Por esses motivos, na década de 90, divulgou-se uma grande quantidade de estudos nos quais se quantificava o STE para a Amazônia, sendo que a maior parte deles integra o projeto ABRACOS (*Anglo Brazilian Amazonian Climate Observation Study*), implementado entre 1990 e 1993.¹² Dentre esses, destacam-se os trabalhos de Grace *et al.*,¹³ que, a partir de 55 dias de medidas em uma floresta no estado de Rondônia, determinou que o ecossistema absorvia Carbono a uma taxa de 0,9 T C ha⁻¹ ano⁻¹, e o de Malhi *et al.*,¹⁴ que apresentou resultados provenientes de um ano inteiro de medidas na região de Manaus. Este último estudo foi o primeiro a mostrar uma grande assimilação de Carbono pela floresta (5,9 T C ha⁻¹ ano⁻¹), bem maior que os valores anteriormente obtidos. Como causas para essa discrepância, os autores sugerem o fato de as medidas anteriores terem sido registradas em locais diferentes, e a possibilidade de a floresta, na região do estudo, estar se recuperando de distúrbios recentes, causados por tempestades, fogo ou seca. Malhi & Grace¹⁵ especulam que a grande assimilação de Carbono observada em Manaus pode estar associada ao efeito de fertilização da atmosfera, a partir dos resultados

¹² GASH, J. H. C. & NOBRE, C. A. Climate effects of amazonian deforestation: some results from ABRACOS. *Bull. Amer. Meteo. Soc.*, 78, 823-830, 1997.

¹³ GRACE, J. *et al.*. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in south-west Amazonia 1992-1993. *Science*, 270, 778-780, 1995.

¹⁴ MALHI, Y. *et al.*. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest. *J. Geophys. Res.*, 103, 593-612, 1998.

¹⁵ MALHI, Y. & GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution*, 15, 332-337, 2000.

¹⁶ MALHI, Y. *et al.*. *Op. cit.*

¹⁷ LAURANCE, W. F. Mega-development trends in the Amazon: implications for global change. *Environmental Monitoring and Assessment*, 61:113-122, 2000.

CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; SCHIMEL, J. P.; FERREIRA, L. V. & MELACK, J. M. Decomposition and carbon cycling of dead trees in tropical forests of the central Amazon. *Oecologia*, 122:380-388, 2000.

ANDREAE, M. O. *et al.*. Towards an understanding of the biogeochemical cycling of carbon, water, energy, trace gases and aerosols in Amazonia: the LBA-EUSTACH experiments. *J. Geophys. Res.*, (107):8066, 2002.

¹⁸ ADAMS, J. M. & PIOVESAN, G. Long series relationships between global interannual CO₂ increment and climate: evidence for stability and change in role of the tropical and boreal-temperate zones. *Chemosphere*, 59, 1595-1612, 2005.

¹⁹ FEARNSIDE, P. M. A água de São Paulo e a floresta amazônica. *Ciência Hoje*, 34, 63-65, 2004.

CLARK, D. A. Sources or sinks? The response of tropical forests to current and future climate and atmospheric composition. *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 359, 477-491, 2004.

²⁰ ANDREAE, M. O. *et al.*. *Op. cit.*

²¹ MALHI, Y. *et al.*. *Op. cit.*

²² ARAÚJO, A. C. *et al.*. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in central Amazonian rain forest: the Manaus LBA site. *J. Geophys. Res.*, (107):8090, 2002.

demonstrados em laboratório de que a atividade fotossintética das plantas tende a aumentar de forma apreciável em uma atmosfera mais rica em CO₂. Além disso, Malhi *et al.*¹⁶ dão especial ênfase à questão da transferência noturna e das limitações da técnica nessas condições, mostrando que tal incerteza pode elevar o valor da respiração noturna em 23%. Como o STE representa uma pequena diferença entre duas quantidades de grande magnitude (produção primária bruta e respiração total), a discrepância pode ter tido consequências significativas no resultado final do estudo.

A grande absorção de Carbono pela floresta, sugerida acima, repercutiu largamente na comunidade científica. Inicialmente, o resultado serviu como evidência de que a Amazônia seria um sumidouro significativo de Carbono em escala global.¹⁷ Por outro lado, Adams & Piovesan¹⁸ argumentam que essa taxa de absorção levaria a biomassa do ecossistema a dobrar em 60 anos, criticando, com base no fato, o uso da covariância dos vórtices para a determinação dos fluxos: "... alguns desses resultados convidam à incredulidade, pois contrastam fortemente com extensivos trabalhos prévios acerca dos processos do ecossistema". Em anos recentes, há o entendimento de que a taxa de assimilação de Carbono determinada por Malhi *et al.* foi exagerada,¹⁹ com a diferença sendo justificada primariamente devido às incertezas quanto aos valores da taxa de respiração noturna.

O mais amplo estudo sobre o funcionamento da Floresta Amazônica como ecossistema até a presente data foi o projeto LBA (*Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in the Amazon*), que envolveu medidas de longo prazo, entre 2000 e 2005, em vários locais da Bacia Amazônica e adjacências. A determinação do papel da Amazônia no ciclo global do Carbono constituiu uma componente importante deste projeto, sendo que vários grupos utilizaram a covariância dos vórtices para a determinação dos fluxos de CO₂ em pontos distintos da região. No estudo de Andreae *et al.*²⁰, realizado em três localidades diversas (Manaus, Rondônia e Caxiuana – no Leste da Amazônia, 350km a Oeste da cidade de Belém), foi observada assimilação de Carbono em magnitude semelhante à determinada por Malhi *et al.*²¹. Também Araújo *et al.*²² quantificaram a absorção de Carbono pelo ecossistema em duas torres micrometeorológicas próximas entre si, na região de Manaus. Fazendo uma correção simples para o problema dos fluxos noturnos, os resultados nas duas localidades mostram absorção de Carbono de, respectivamente, 1,7 e 5,3 T C ha⁻¹ ano⁻¹. Os valores são apreciáveis, mas significativamente menores

- que os obtidos sem o uso de correção alguma: 9,3 e 10 T C ha⁻¹ ano⁻¹. O primeiro trabalho a utilizar medidas de fluxo de CO₂ por covariância de vórtices na região amazônica foi o de Saleska *et al.*²³, que encontraram emissão de Carbono da floresta para a atmosfera, de 1,3 T C ha⁻¹ ano⁻¹. Nessa pesquisa, que se serviu de dados de duas torres micrometeorológicas na região de Santarém ao longo de três anos, correções aplicadas para as perdas de fluxo noturnas foram responsáveis por um aumento no valor de STE de 3,8 a 5,8 T C ha⁻¹ ano⁻¹, em um sítio, e de 2,0 a 3,8 T C ha⁻¹ ano⁻¹, em outro sítio. A não aplicação da correção, portanto, levaria a valores de assimilação de Carbono pela floresta. Estes seriam, porém, inferiores aos observados nos estudos anteriores, indicando que boa parte da diferença entre os resultados provém de variabilidade genuína nas transferências entre a floresta e a atmosfera, de uma região para outra. Os resultados de Saleska *et al.* concordam com estimativas independentes, fundamentadas em inventários de biomassa e de fluxos noturnos a partir de observações de Radônio.²⁴ De qualquer forma, os autores enfatizam que "... incertezas notáveis estão associadas às correções de fluxo noturno, refletindo um entendimento imperfeito dos detalhes do transporte na copa, mas a evidência disponível sugere fortemente que fluxos não corrigidos sobreestimarão a absorção na maioria dos sítios". A importância da correção dos resultados em relação às noites de pequena mistura turbulenta fica clara no trabalho de Miller *et al.*²⁵, que apresentam resultados detalhados de medidas em uma das duas torres analisadas por Saleska *et al.*²⁶. Na ausência de qualquer tipo de correção, os autores calcularam que a floresta absorveria Carbono a uma taxa de 3,9 T C ha⁻¹ ano⁻¹. Por outro lado, com a devida filtragem para as noites calmas, os resultados passam a indicar a floresta como uma fonte de Carbono, de 0,4 T C ha⁻¹ ano⁻¹, um valor que concorda bem com estimativas de biometria e com os resultados de Saleska *et al.*. Como ilustração da dependência das correções no resultado final, Miller *et al.*²⁷ mostraram que, dependendo da quantidade de noites cujos dados são corrigidos, a estimativa de emissão de Carbono pelo ecossistema pode chegar até 2,0 T C ha⁻¹ ano⁻¹. Ainda que tais estudos apresentem argumentos fortes para a aplicação da correção para os dados noturnos, um problema com este procedimento pode ser inferido dos resultados de Sakai *et al.*²⁸. Neste trabalho, que usou a covariância dos vórtices para determinar as transferências de Carbono entre a atmosfera e uma área desmatada na região de Santarém, ficou demonstrado que
- ²³ SALESKA, S. R. *et al.*. Carbon in Amazon Forests: Unexpected Seasonal Fluxes and Disturbance-Induced Losses. *Science*, 302, 1554-1557, 2003.
- ²⁴ MARTENS, C. S. *et al.*. Radon fluxes in tropical forest ecosystems of Brazilian Amazonia: night-time CO₂ net ecosystem exchange derived from radon and energy covariance methods. *Global Change Biology*, 10, 618-629, 2004.
- ²⁵ MILLER, S. D. *et al.*. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. *Ecological Applications*, 14, 114-126, 2004.
- ²⁶ SALESKA, S. R. *et al.*. *Op. cit.*
- ²⁷ MILLER, S. D. *et al.*. *Op. cit.*
- ²⁸ SAKAI, R. K. *et al.*. Land-use change effects on local energy, water, and carbon balances in an Amazonian agricultural field. *Global Change Biology*, 10, 895-907, 2004.

restrições semelhantes às impostas por Saleska *et al.* ou por Miller *et al.* implicariam rejeição de 98% dos dados noturnos. Isso ocorre devido a que o desmatamento origina uma grande perda radiativa local à noite, causando forte estabilidade térmica e reduzindo fortemente a intensidade da mistura turbulenta.

Ometto *et al.*²⁹ apresentam uma síntese das medidas de STE na Floresta Amazônica, tanto por covariância dos vórtices, como por biometria. A grande disparidade entre os resultados, descrita nos parágrafos acima, fica evidente, e os únicos estudos que concluíram pela existência de emissão de Carbono do ecossistema para a atmosfera foram os realizados na região de Santarém. Conclui-se então que a variabilidade entre os resultados pode ser conseqüência de diversidade de sítios estudados. De qualquer forma, é certo que o uso de diferentes técnicas, em especial no que diz respeito ao uso ou não de filtragem dos dados originados em noites de pouco vento, contribui para a incerteza associada aos resultados obtidos.

5. Fluxos turbulentos em noites de pouco vento

Por que o valor de LTE determinado pela técnica de covariância dos vórtices depende do uso ou não da correção para as noites de vento fraco e, além disso, do valor de intensidade turbulenta escolhido como limite para a filtragem?

Inicialmente, é importante destacar que essa dependência, já observada em outros ecossistemas como floresta decídua³⁰ ou floresta boreal³¹, mostrou-se substancialmente mais importante na Floresta Amazônica. O motivo é o fato de o valor final de STE representar uma diferença pequena entre duas quantidades bastante grandes (fotossíntese e respiração total) que, no caso da Amazônia, são, cada uma, muito maiores que nos ecossistemas estudados anteriormente. Como a incerteza – ainda que pequena – com respeito à transferência no período noturno afeta diretamente apenas uma dessas quantidades (a respiração), ela pode fazer com que o resultado final mude de maneira apreciável, podendo mesmo substituir assimilação por emissão de Carbono pela superfície.³²

Massman & Lee e Baldocchi³³ atribuem duas principais razões para o fato de a covariância dos vórtices subestimar as taxas de respiração em noites de pouco vento: mistura turbulenta insuficiente e existência de escoamentos de drenagem.

²⁹ OMETTO, J. P. H. B. *et al.*. Amazonia and the modern carbon cycle: lessons learned. *Oecologia*, 143, 483-500, 2005.

³⁰ GOULDEN, M. L. *et al.*. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Glob. Change Biol.*, 2, 169-182, 1996.

³¹ GOULDEN, M. L. *et al.*. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 102, 987-996, 1997.

³² MASSMAN, W. J. & LEE, X. *Op. cit.*

³³ MASSMAN, W. J. & LEE, X. *Op. cit.*

BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystem – past, present and future. *Global Change Biology*, 9, 479-492, 2003.

Os escoamentos de drenagem são movimentos horizontais de ar frio em direção às regiões mais baixas, que, acredita-se, podem transportar uma porção importante do CO₂ respirado localmente. A medida experimental deste tipo de processo não é trivial, pois envolve uma rede de sensores dispostos espacialmente, não podendo ser obtida com uma única torre. Apenas no final da década de 90 os primeiros estudos de quantificação começaram. Staebler & Fitzjarrald³⁴ mediram o Carbono transportado horizontalmente por correntes de drenagem, concluindo que, de fato, era através deste processo que parte do CO₂ respirado localmente e não medido pela covariância dos vórtices era transportado. Entretanto, o Carbono transferido horizontalmente não equivalia ao total do fluxo perdido. Aubinet *et al.*³⁵ observaram que os termos de transporte horizontal são importantes, mas dependendo do local, podem contribuir positiva ou negativamente para o balanço local de Carbono.

Existem, portanto, evidências de que a não quantificação do transporte horizontal não seja a causa única da subestimação de taxas de respiração noturnas. O problema referido como “mistura turbulenta insuficiente” pode explicar a diferença, mas, em geral, a sua descrição é muito vaga na literatura especializada. Frequentemente se sugere como possível solução que a covariância dos vórtices seja aplicada a uma série de dados maior que os 30 minutos comumente utilizados, com o objetivo de se capturar transferências de baixas frequências. É interessante destacar ainda que a janela de 30 minutos, adotada pela comunidade ecológica para o cálculo dos fluxos³⁶, é bastante distinta da de 5 minutos usada tipicamente pela comunidade micrometeorológica³⁷. Qual o motivo das diferenças? Podem elas explicar, pelo menos parcialmente, as dificuldades na determinação dos fluxos turbulentos em noites de pouco vento?

Vickers & Mahrt³⁸ mostraram que a transferência turbulenta ocorre de forma organizada até uma escala, que na maioria das vezes é bem definida. Em escalas maiores que essa, a transferência se dá por outros processos, genericamente definidos como sendo de “mesoescala”. Os fluxos de mesoescala não são organizados da mesma forma que os fluxos turbulentos; em geral sua magnitude e sentido apresentam enorme variabilidade e, em muitos casos, sua média é nula. A figura 7 exemplifica a diferença entre transferência turbulenta e de mesoescala ao longo de uma noite de dados no sítio desmatado do projeto LBA³⁹.

A separação dos fluxos entre sua parte turbulenta e as escalas maiores, como mostrado na figura 7, é possível atra-

³⁴ STAEBLER, R. M. & FITZJARRALD, D. R. Observing subcanopy CO₂ advection. *Agric. For. Meteorology*, 122:139-156, 2004.

³⁵ AUBINET, M. *et al.* Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different carboeuroflux sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 116:63-94, 2005.

³⁶ KRUIJT, B. *et al.* The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecological Applications*, 14(4), 101-113, 2004.

MILLER, S. D. *et al.* *Op. cit.*

³⁷ MAHRT, L & VICKERS, D. Contrasting vertical structures of nocturnal boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 105:351-363, 2002.
SUN, J. *et al.* Intermittent turbulence associated with a density current Passage in the stable boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 105, 199-219, 2002.

³⁸ VICKERS, D. & MAHRT, L. The cospectral gap and turbulent flux calculations. *J. Atm. Ocean Tech.*, 20, 660-670, 2003.

³⁹ Descrito por SAKAI, R. K. *et al.* *Op. cit.*

⁴⁰ MALLAT, S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine. Intell.*, 11, 674, 1989.
 HOWELL, J. F. & MAHRT, L. Surface-layer fluxes in stable conditions. *Boundary-Layer Meteorol.*, 90, 495-520, 1997.

vés da decomposição em multirresolução.⁴⁰ Um coespectro de multirresolução permite a visualização da transferência em termos das suas diferentes escalas e tem a importante propriedade de que sua integração, até uma determinada escala T , é idêntica ao fluxo calculado pela covariância dos vórtices para uma série de comprimento T .

Santarém, sítio desmatado, 19 de janeiro de 2001

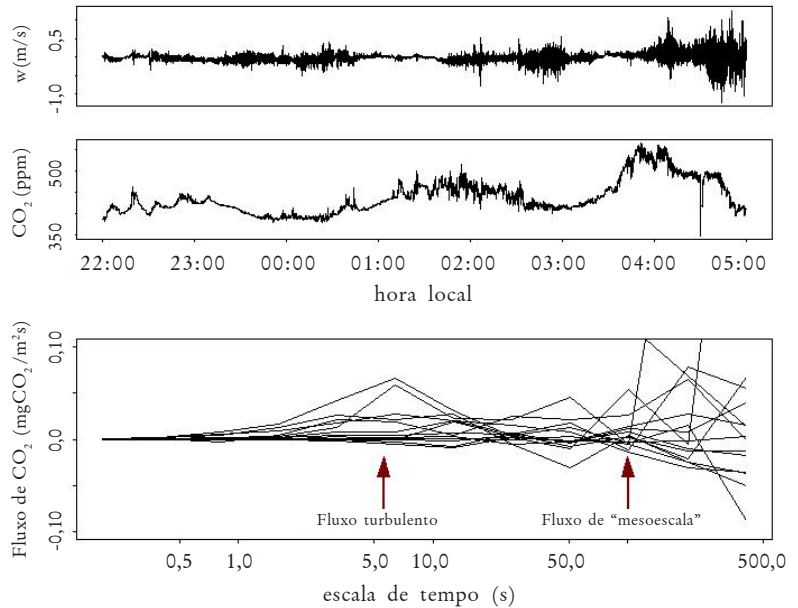


Figura 7: A escolha adequada das janelas na determinação dos fluxos é fundamental para diferenciar as contribuições de microescala daquelas de mesoescala.

Portanto, se a série cujo fluxo se quer estimar, através da covariância, tem um comprimento maior que a escala temporal dos processos turbulentos, o método resultará em um fluxo contaminado por flutuações de mesoescala. Como esta porção tem, em geral, magnitude maior que a transferência turbulenta, o uso de séries muito longas faz com que os fluxos determinados não equivalham à transferência turbulenta. No exemplo da figura 7, a escala turbulenta não excede os 50 segundos.

A diferença entre as escalas utilizadas respectivamente pelas comunidades micrometeorológica e ecológica, está, portanto, associada a esse fato. As primeiras estão centradas na componente turbulenta do processo, enquanto que as outras visam quantificar as trocas em sua totalidade, sem se interessar pela natureza do processo. De fato, Vickers &

⁴¹ VICKERS, D. & MAHRT, L. *Op. cit.*

Mahrt⁴¹ argumentam que “... a escolha do tamanho da janela pode ser influenciada pelo objetivo da pesquisa em particular.” Entretanto, o caráter aleatório dos processos de escala maior que a turbulenta, faz com que o fluxo nessas escalas varie largamente, não apenas entre as diferentes séries, mas também em uma mesma série, para diferentes tamanhos de janela. A variabilidade do fluxo calculado de mesoescala ocorre, parcialmente, porque as séries não apresentam estacionariedade nesta escala. Portanto, uma premissa básica que fundamenta o procedimento de covariância dos vórtices é violada. Assim, há apenas sentido em se aplicar essa metodologia para a componente turbulenta dos fluxos; portanto, a perda de fluxo por mistura turbulenta insuficiente ocorre, na verdade, devido ao cálculo a partir de séries inadequadamente longas.

Santarém, sítio de floresta primária

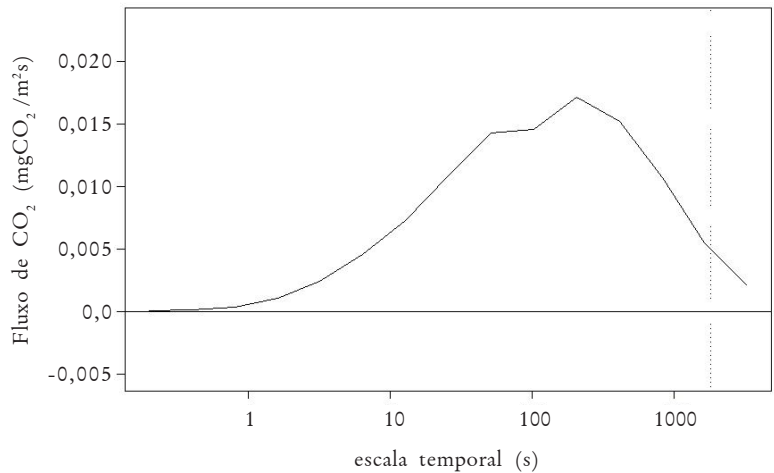


Figura 8: Fluxo de CO₂, num sítio de floresta não perturbada, para diferentes janelas de amostragem.

Como se explica, então, que o uso de janelas maiores aumente, em geral, o valor medido dos fluxos? Tendo em vista que os fluxos de escala maior que a turbulenta são, em grande parte, aleatórios, assumindo valores de ambos os sinais e registrando média que tende a zero, este procedimento não deveria causar alterações consistentes. A figura 8 mostra a decomposição em multirresolução de séries obtidas no sítio de floresta primária de Santarém, do projeto LBA. Como se vê, as escalas turbulentas, nesse caso, são bem maiores, de forma que os 30 minutos normalmente usados estão dentro da porção correspondente à transferência

turbulenta. Nota-se que a mesma se estende, em várias ocorrências, além dos 30 minutos. Portanto, a janela ideal, em muitos desses casos, deve ser maior, de forma que o aumento da janela implica aumento do fluxo calculado, e esse aumento é genuíno.

⁴² ACEVEDO, O. C. *et al.*. Turbulent Carbon Exchange in Very Stable Conditions. *Boundary-Layer Meteorology*. Aceito para publicação, 2007.

⁴³ SAKAI, R. K. *et al.*. *Op. cit.*

⁴⁴ ACEVEDO, O. C. *et al.*. *Op. cit.*

Acevedo *et al.*⁴² adotaram a decomposição em multirresolução para calcular os fluxos noturnos no sítio desmatado do projeto LBA. Na vasta maioria das ocorrências, a transferência turbulenta ficou restrita a escalas menores que 100 segundos, e isso explica porque Sakai *et al.*⁴³ concluíram que o limite comumente utilizado para classificar uma noite como turbulenta não era atingido em 98% dos casos. O cálculo dos fluxos usando a janela mais apropriada, variável de caso para caso, melhora o cálculo da taxa de respiração e diminui bastante a sua variabilidade em relação aos valores obtidos com uma janela constante. Por outro lado, Acevedo *et al.*⁴⁴ mostraram que, ainda assim, há perda de fluxos quando se registra baixa intensidade turbulenta. Como a transferência turbulenta foi, nesse caso, quantificada diretamente, não contendo contaminação de escalas maiores, é possível que a perda esteja associada a escoamentos de drenagem.

De qualquer forma, a melhora na determinação dos fluxos noturnos depende da caracterização apropriada dos processos micrometeorológicos de transferência. O emprego de janelas variáveis, como a aplicação de decomposição em multirresolução, representa um avanço importante nesse sentido.

6. Conclusões

A transferência turbulenta é o principal processo através do qual a superfície interage com a atmosfera. Propriedades como momento, calor e escalares são trocados entre a superfície e a camada limite planetária por turbilhões de diferentes escalas, que superpostos, aparentam um comportamento aleatório, mas que, a partir de um tratamento estatístico adequado, mostram-se organizados, tendo importância significativa para o balanço de propriedades na superfície do planeta.

Por razões destacadas ao longo deste trabalho, a técnica da covariância dos vórtices se tornou uma metodologia padrão para o cálculo dos fluxos turbulentos. Na Floresta Amazônica, especificamente, essa técnica foi largamente utilizada na determinação das transferências de Carbono entre a biota e a atmosfera. Entretanto, sua utilização também

Este trabalho foi parcialmente financiado pela NASA como parte do projeto LBA-ECO, grant NCC5-283 e pelo CNPq, através de auxílios individuais aos autores brasileiros.

Oswaldo L. Moraes é bacharel e doutor em Física e professor do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

osvaldo.moraes@pq.cnpq.br

Otávio C. Acevedo é bacharel em Meteorologia, doutor em Ciências Atmosféricas e professor do Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

otavio@smail.ufsm.br

David R. Fitzjarrald é graduado em Física, doutor em Meteorologia e pesquisador do Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York, Albany, NY, EUA.

fitz@asrc.cestm.albany.edu

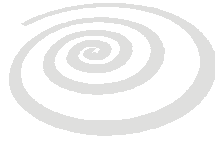
Ricardo K. Sakai é bacharel em Meteorologia, doutor em Ciências Atmosféricas e pesquisador do Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York, Albany, NY, EUA.

sakai@asrc.cestm.albany.edu

suscitou amplas discussões, evidenciadas pelo contraste entre resultados obtidos para o mesmo local com diferentes procedimentos. De maneira especial, os resultados se mostraram sensíveis aos procedimentos de cálculo das transferências noturnas.

Trabalhos recentes apontam que uma boa parte da dificuldade está associada aos diversos processos físicos que interagem durante o período noturno, como turbulência intermitente, escoamentos de drenagem, ondas de gravidade, meandro do vento horizontal, entre outros. Tais processos apresentam diferentes escalas, em geral maiores que aquela na qual ocorre a mistura turbulenta, que deve ser quantificada utilizando-se uma escala apropriada. Parte das discrepâncias podem estar associadas ao cálculo dos fluxos a partir de séries de tempo diferente daquele na qual a transferência turbulenta ocorre.

Em condições muito estáveis, por outro lado, outros processos micrometeorológicos podem ser importantes. Entre estes, citam-se a transferência de energia entre as diversas escalas ou o transporte organizado de escalares contra o gradiente em escalas maiores que a da turbulência. A física desses fenômenos ainda está sob investigação, havendo grande expectativa de que possam esclarecer outros detalhes acerca do balanço noturno de escalares. A descrição adequada das transferências de qualquer espécie entre a superfície e a atmosfera depende da correta caracterização da micrometeorologia do problema.



MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Carlos E. M. Tucci

A sociedade e o meio ambiente estão sujeitos a riscos naturais relacionados com o clima. Daí a relevância de pesquisas sobre os impactos da mudança climática em rios e bacias hidrográficas. A infra-estrutura dos recursos hídricos tem sido planejada com base em amostras do passado, projetando-se para o futuro o comportamento estatístico de séries estacionárias. Tais princípios consideram que o clima é naturalmente estável dentro do cenário de 100 anos futuros a contar dos projetos, tendo em vista a vida útil dos empreendimentos. Contudo, a observação de séries mais longas mostra que a variabilidade e também a modificação climática trazem consigo séries não-estacionárias que, associadas ao uso do solo, aumentam dúvidas e potencialmente o risco dos projetos. Sendo assim, convém analisar os principais componentes dessa incerteza no contexto hidrológico e a sua repercussão sobre a infra-estrutura dos recursos hídricos no Brasil.

Introdução

A condição singular do Brasil como nação com grande riqueza hídrica sempre nos levou a um acomodamento quanto aos riscos das variações naturais sobre o desenvolvimento da sociedade. A sofisticação do cenário nacional e internacional atual exige entretanto maior conhecimento técnico-científico sobre a variabilidade climática e seus impactos sobre os recursos hídricos, bem como sobre a vulnerabilidade dos diferentes setores socioeconômicos que dependem essencialmente desses recursos.

O desenvolvimento dos recursos hídricos ao longo do século vinte foi baseado em técnicas desenvolvidas por engenheiros para o dimensionamento e planejamento de sistemas hídricos. Essas técnicas estão fundamentadas na estatística da série histórica das vazões medidas nos rios. Portanto, admitem-se os seguintes princípios básicos: 1) As séries de vazões são homogêneas ou estacionárias, ou seja, as suas estatísticas não variam com o tempo. 2) As amostras utilizadas são estatisticamente representativas. A não-estacionariedade ou a representatividade podem ocorrer por um ou mais dos seguintes fatores: a) variabilidade climática no período de amostra; b) modificação climática; c) modificação do uso do solo; d) alterações nas características físico-químicas e biológicas da bacia hidrográfica, devido aos efeitos naturais e antrópicos.

Observa-se, assim, nos setores da sociedade que dependem dos recursos hídricos, uma vulnerabilidade intrínseca que contribui para aumentar os riscos de planejamento e gestão de águas no país.

Efeito do uso do solo

A ação do homem sobre o solo pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres, como: redução ou aumento das vazões médias, máximas e mínimas de uma bacia hidrográfica, e alteração da qualidade da água. Um resumo dos argumentos que conduziram a essas conclusões é o seguinte:

– O desmatamento para culturas anuais aumenta o escoamento médio de uma bacia pela redução da evapotranspiração.¹ O impacto que isto tem sobre a vegetação e os sistemas hídricos depende dos efeitos de escalas nas bacias de maior porte. Na literatura existe pouca comprovação sobre o efeito do uso do solo sobre o escoamento em grandes bacias².

¹ SAHIN, M. J. & HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, 178, 293-309, 1996.

BRUIJNZEEL, L. A. Predicting the hydrological impacts of tropical forest conversion: the need for integrated research. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M. & VICTORIA, R. L. (eds.). *Amazonian Deforestation and Climate*. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Co., 1996.

² TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. Environmental Issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development*, v. 14, n. 2, p. 157-173, 1998.

– Grande parte do conhecimento hidrológico é resultado de observações feitas a partir de pequenas bacias. No âmbito internacional e no Brasil, o conhecimento do comportamento ecohidrológico dos biomas nacionais é muito reduzido, devido à falta de monitoramento e aos efeitos antrópicos não-controlados.

– O desenvolvimento urbano produz aumento do volume hídrico, escoamento médio e máximo, erosão, sedimentos e deterioração da qualidade da água. Esses impactos geram condições extremamente desfavoráveis sobre os rios na vizinhança dos centros urbanos, além de inundações causadas por projetos de drenagem totalmente inadequados em quase todas as cidades da bacia.³

³ TUCCI, C. E. M. & BERTONI, J. C. *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH GWP, 2003. 452 p.

⁴ IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001.

Variabilidade hidrológica

O *Intergovernmental Panel on Climate Change*⁴ define *modificação climática* como as mudanças de clima no tempo, devido à variabilidade natural e/ou como resultado das atividades humanas (ações antrópicas). Já a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (convenção formulada na Rio-92) adota para o mesmo termo a significação de mudanças associadas direta ou indiretamente à atividade humana que alterem a variabilidade climática natural observada num determinado período. Neste texto, compreende-se por *variabilidade climática* as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações; e por *modificação climática*, as alterações da variabilidade climática causadas pelas atividades humanas.

A variabilidade hidrológica, por sua vez, é entendida aqui como as alterações que possam ocorrer na entrada e na saída dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto que as principais variáveis de saída são o nível e a vazão de um rio. Os efeitos mais importantes da variabilidade hidrológica estão relacionados com: a) a variabilidade natural dos processos climáticos; b) o impacto da modificação climática; c) os efeitos do uso da terra e a alteração dos sistemas hídricos.

A relação entre as variáveis de entrada e saída dos sistemas hidrológicos apresenta um comportamento não-linear. A alteração da precipitação mostra impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica. Os dados informam que, nos anos com valores extremos (inundações e secas), a resposta da bacia se amplifica com relação à variação adimensional da precipitação. Tal condição ocorre devido à proporcionalidade com que os valores de precipitação se

relacionam com os de vazão. Nos anos mais úmidos, o aumento de precipitação produz maior vazão, já que a infiltração cresce pouco e a evapotranspiração potencial diminui pela freqüência da chuva, o que aumenta proporcionalmente o escoamento. Nos anos secos, ao contrário, com a redução de precipitação, o aumento da evapotranspiração reduz sensivelmente a vazão. Portanto, a anomalia da vazão (resposta da bacia hidrográfica) amplifica seus efeitos na precipitação, se considerarmos apenas a anomalia da precipitação (figura 1). O processo é ainda mais marcante em climas tropicais, em que a evapotranspiração diminui ou aumenta de forma significativa com a existência ou não de precipitação. Este efeito é chamado de *elasticidade do escoamento*.⁵

⁵ SCHAAKE, J. C. From climate to flows. In: WAGONNER, P. E. et al. (ed.). *Climate changes and U. S. Water Resources*. New York: Wiley & Sons, 1990. p. 177-206.

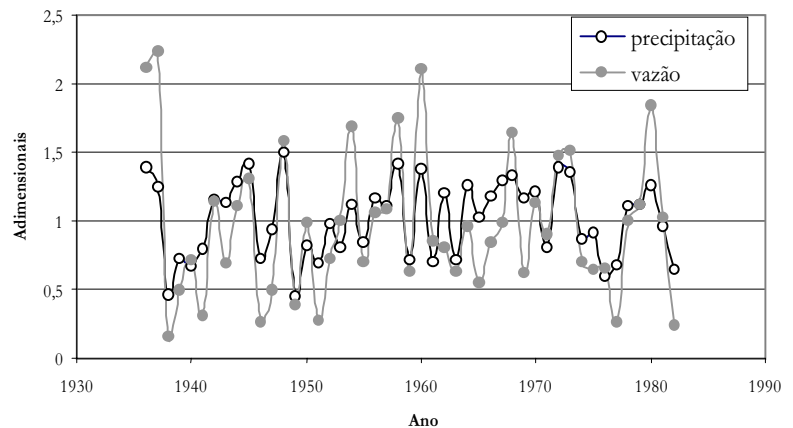


Figura 1: Precipitação e vazão no rio Verde Pequeno, na bacia do rio São Francisco (vazões obtidas por modelo hidrológico).

Considere dois períodos denominados aqui de 1 e 2. Para verificar a variação de vazão ($\Delta Q = Q_2 - Q_1$) entre os dois períodos com relação à vazão média do período 1 ($Q_1 = Q$), utilizou-se a variação da precipitação ($\Delta P = P_2 - P_1$) com relação à precipitação média do período 1 ($P_1 = P$). Considerando a equação do coeficiente de escoamento, é possível demonstrar o seguinte:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{\Delta P}{P}\right) - 1$$

onde C_2 é o coeficiente de escoamento médio resultante do período 2; C_1 é o coeficiente de escoamento médio do período 1; ($C = P/Q$). Existirá uma função $C = f(P)$ para as condições de tipo e uso do solo; a função não é unívoca, mas apresenta uma tendência similar, quando não há grande

alteração no uso do solo. Através de tendência média, é possível estimar o coeficiente de escoamento em função da variação de P. Utilizando-se esta função média e a equação 1, pode-se calcular a variação da vazão em função da precipitação e de sua variação percentual.

A equação 1 incorpora toda a variabilidade hidrológica, devido tanto ao clima quanto ao uso do solo. Quando C_2 e C_1 provêm da mesma função, ou seja, não existe mudança no uso e tipo de solo, a anomalia depende essencialmente dos períodos climáticos. Quando os períodos fossem semelhantes, também as anomalias deveriam ser iguais. Ora, isso não ocorre, já que nunca os coeficientes de escoamento são iguais. Assim, a equação não capta as flutuações da não-linearidade do processo, apenas tem a utilidade de observar macro-variações além da não-linearidade.

Na figura 2, são apresentados os valores de precipitação e vazão da incremental Itaipu (a partir de Rosana até Itaipu), no rio Paraná, onde claramente se observam os efeitos da modificação do uso do solo, antes e depois de 1970 (1931-1969 e 1970-1994). Além do desmatamento da bacia diretamente contribuinte, houve a substituição do café pela soja no Norte do Paraná.⁶ O maior volume no escoamento não se deve somente ao uso do solo, mas também à associação dos dois fatores: variabilidade climática (combinada com mudança climática?) e uso do solo, já que nessa bacia incremental foram registrados um aumento de 10% na precipitação e um crescimento na vazão em torno de 44%. Para bacias consolidadas em termos de uso do solo, como a bacia do rio Grande, localizada entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, as alterações também tiveram acréscimo, ou seja, 18% para precipitação e 17% para vazão.

⁶ TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. *Op. cit.*

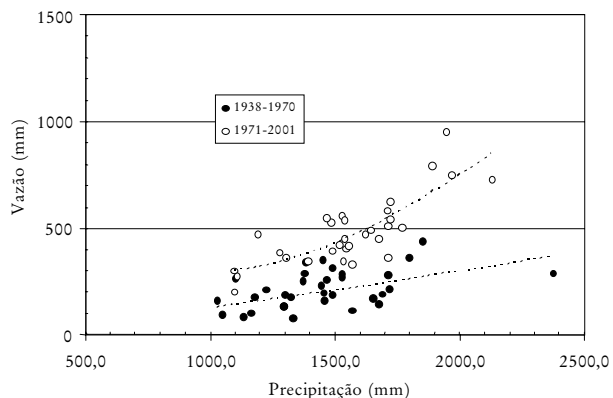


Figura 2: Relação entre escoamento e precipitação na bacia incremental de Itaipu.

Vulnerabilidade climática

A história tem mostrado que o clima é um condicionante fundamental no desenvolvimento da população em diferentes partes do globo.⁷ Mesmo considerando o avanço da tecnologia no último século, a variabilidade climática pode produzir impactos significativos no desenvolvimento dos países e comprometer a sustentabilidade das populações.

A variabilidade climática e a representatividade da amostra são condicionantes semelhantes, já que a falta de representatividade de uma amostra de dados observados pode não apontar todas as variabilidades da população estatística da série. Os dois últimos fatores representam efeitos antrópicos sobre o sistema.

Existem séries de variáveis climáticas que se fundamentam na temperatura obtida por correlação com amostras de gelo, ou nas precipitações estimadas a partir dos anéis de crescimento das árvores, no entanto os resultados constituem informações indiretas que permitem uma idéia do comportamento, mas se diferenciam dos valores efetivamente observados.

O comportamento climático tem sido avaliado com base em séries de dados, na maioria de 20 a 50 anos de dados hidrológicos. Nas últimas décadas cresceu, em diferentes partes do globo, o número de séries longas, evidenciando as características interdecadais dos processos climáticos e hidrológicos. Contudo, são raras as séries com tamanho próximo de 100 anos. Dessa forma, grande parte das pesquisas sobre variabilidade e comportamento do clima utiliza amostras de períodos curtos, que podem ser tendenciosos.

Na bacia do rio Uruguai e grande parte do Rio Grande do Sul, o período entre 1942 e 1951 foi muito mais seco, se comparado com o restante da série. Isso pode ser observado em diferentes locais do Estado. Utilizando-se a série após 1951, por exemplo, 1951-2000, com 50 anos para dimensionar o volume útil de um reservatório, o seu volume é 50% menor que o volume estimado considerando a série após 1942. O impacto, neste caso, ocorrerá sobre a infra-estrutura do Estado quando um período seco como este se repetir no futuro. Em tal situação, a amostra depois de 1950 não é representativa dos períodos úmidos e secos que aparecem em séries longas. Outro caso semelhante foi constatado na série do rio Paraguai em Ladário, quando na década de 60 (mais precisamente de 1960 a 1973) ocorreram níveis muito abaixo do período anterior, comprometendo a sustentabilidade da população do Pantanal.

⁷ DIAMOND, J. *Armas, Gemas e Aço: o destino das sociedades humanas*. Rio de Janeiro: Record, 1997. 472p.

Em Blumenau, Santa Catarina, desde 1852 são observadas as cotas máximas de inundação. A série de observação contínua iniciou-se em 1935, mas foram registradas todas as cotas acima de 9,0m (cota do leito maior) desde 1852, constituindo-se portanto a mais longa série contínua de cotas de inundação do país. No período de 1912 a 1982 as cotas ficaram muito abaixo (< 13,0m) das inundações que ocorreram antes e depois deste período (várias cotas entre 15 e 17,1m, a máxima em 1880). Analisando-se a série contínua de dados entre 1935-2000, a mesma poderia ser considerada estatisticamente não-estacionária, mas como se pode perceber, os condicionantes se referem à variabilidade de longo período e a uma amostragem pouco representativa (período de registro), conforme a figura 3.

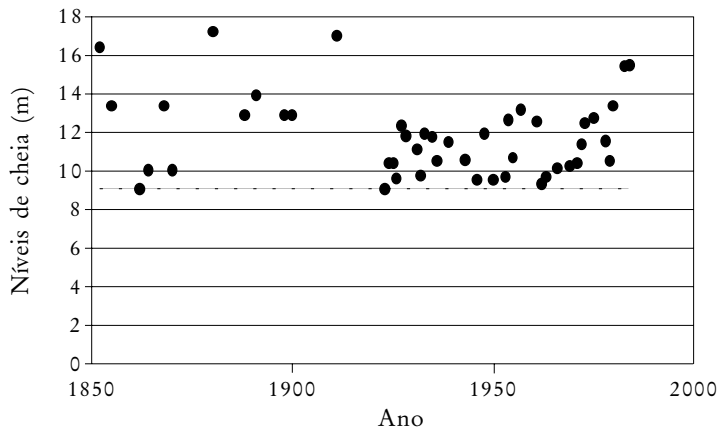


Figura 3: Níveis máximos em Blumenau acima de 9,0m (cota de extravasamento da calha do rio Itajaí-Açu).

Esse tipo de comportamento, atestado pelos hidrólogos ao longo do tempo, foi denominado *efeito de José*⁸. Geralmente tais observações se prendiam a décadas específicas, como realmente comprovam os dados de muitas regiões do globo. No entanto não tem sido observado se existem ciclos de prazo maior, porque a maioria das séries não é suficientemente longa.

Tucci e Clarke⁹ e Collischonn *et alii*¹⁰ mostraram que bacias de grande porte, na América do Sul (rio Paraguai e Paraná) e na África, apresentavam períodos longos com tendências diferentes. Enquanto na América do Sul ocorreu aumento de precipitação e vazão após 1970, na África houve redução substancial. Algumas questões se colocam. Por que a ciência tem dificuldade em identificar essas tendências de longo prazo? Pelo fato de serem curtos os períodos

⁸ A denominação “efeito de José” inspira-se na Bíblia (Genesis 41, 20-30), referindo-se aos sete anos de abundância seguidos por sete anos de fome. O fenômeno é quantificado pela equação empírica $R/S \propto k^H$ para $H > 1/2$ e tem sido considerada uma curiosidade estatística. O processo deve ser entendido no contexto das memórias longas das flutuações climáticas. Ver: MANDELBROT, B. B. & WALLIS, J. R. Noah, Joseph and operational hydrology. *Water Resources Res.*, 4(5), p. 909-918, 1968.

⁹ TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. *Op. cit.*

¹⁰ COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, 245, p. 218-238, 2001.

de informação? Condições antrópicas como o uso do solo ou o aquecimento provocado pelo efeito estufa poderiam ter influenciado tal comportamento? As respostas requerem da ciência um esforço importante e uma visão integrada dos processos hidroclimáticos, em nível global e de mesoescala. Por outro lado, mesmo que não exista um entendimento completo e não seja possível prever com antecedência esses processos, é necessário conhecer os impactos a que a sociedade está sujeita devido a essas variabilidades, para que sejam planejadas medidas mitigadoras. Tucci e Damiani¹¹ estimaram o efeito da modificação climática sobre os recursos hídricos na bacia do rio Uruguai, considerando o prognóstico climático de 2xCO₂ na atmosfera pelo modelo GISS. Na figura 4, é possível observar a simulação dos cenários atual e futuro para a vazão específica na bacia.

¹¹ TUCCI, C. E. M. & DAMIANI, A. Potenciais Modificações Climáticas no rio Uruguai, RBE. *Caderno de Recursos Hídricos*, vol. 12, n. 2, junho 1994.

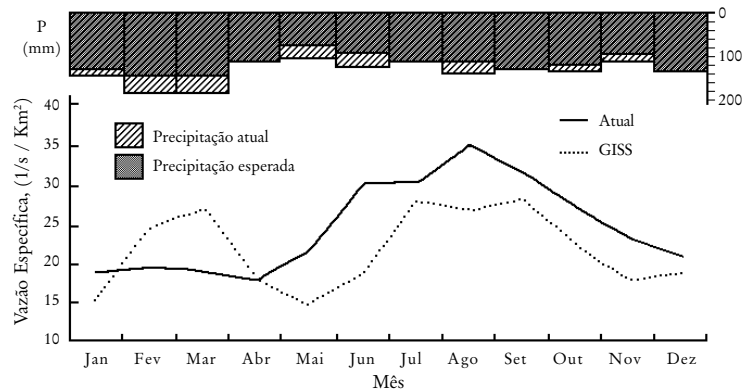


Figura 4: Cenário atual e previsto para a vazão específica mensal na bacia do rio Uruguai, com base nas estimativas do modelo GISS com a duplicação do CO₂ na atmosfera.

Vulnerabilidade dos setores dos recursos hídricos

A variabilidade climática afeta em maior ou menor grau todos os usos dos recursos hídricos e a conservação ambiental associada. Na história das civilizações é comum a identificação do movimento e da sustentabilidade de povos a partir da disponibilidade hídrica ou da combinação de fatores relacionados a clima, solo, água, entre outros fatores físicos. As freqüentes secas que ocorrem no Nordeste brasileiro explicam muito da história desta região, inclusive sobre o movimento da população atingida em outras partes do país. O efeito existe, mas é necessário analisar quais são as principais fragilidades em cada setor dos recursos hídricos, associadas ao desenvolvimento econômico das regiões, o que será discutido a seguir.

Abastecimento urbano

O abastecimento de água para comunidades de até 5.000 habitantes pode ser realizado através de poços, por pequenas bacias, de acordo com a disponibilidade e demanda a fio d'água; ou por regularização; ou ainda por grandes bacias em função da localização da demanda. A fragilidade maior diante da variabilidade climática está nas comunidades que atualmente possuem seu abastecimento nas seguintes condições: a) regiões semi-áridas onde a disponibilidade é pequena, independentemente da regularização; b) localidades abastecidas por rios de pequena bacia sem regularização, mesmo tendo uma vazão média alta. Nas cabeceiras do rio Uruguai é comum encontrar, nessas condições, comunidades que sofrem freqüente racionamento por falta de regularização; c) mananciais urbanos com demanda acima da capacidade da disponibilidade hídrica, como em parte da região metropolitana de São Paulo, onde a demanda retirada para abastecimento é superior à disponibilidade de alguns mananciais; d) redução da disponibilidade pela poluição dos sistemas hídricos devido ao ciclo de contaminação urbano.¹²

A fragilidade dos sistemas de abastecimento urbanos está relacionada com a falta de monitoramento, por parte da maioria das companhias de abastecimento, da disponibilidade hídrica dos mananciais, que fica sempre sujeita à variabilidade interanual e ao racionamento. As companhias priorizam o tratamento da água e de alguma forma se preocupam com o tratamento de esgoto (com pouco sucesso), mas geralmente não tratam de conhecer a disponibilidade do seu insumo básico, que é a água. Este cenário gera maiores incertezas com relação à sustentabilidade da quantidade e qualidade da água de abastecimento, pois qualquer anomalia maior sobre o sistema hídrico poderá gerar impactos significativos. A forma de mitigar tais cenários é desenvolver estudos que proponham alternativas emergenciais eficazes e mecanismos de segurança para atender aos problemas.

Irrigação

Com a implementação da regulamentação do uso da água e da cobrança, poderão ocorrer dois processos opostos na área rural: a) redução da demanda de irrigação nos projetos existentes devido à cobrança e à racionalização do uso da água, criando melhores oportunidades para a sustentabilidade regional da atividade, em obediência aos acordos e às decisões dos comitês de bacia; b) aumento de conflitos, com dificuldades na implementação das decisões dos

¹² TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. *RBRH*. v. 7, n. 1, março 2002.

comitês e restrições de diferentes naturezas. Provavelmente, o país deverá registrar os dois tipos de processos, mas é esperado que o primeiro predomine.

A irrigação é um dos grandes consumidores de água, principalmente no sul do país com a irrigação de arroz, que consome o equivalente a cerca de 800 pessoas/hectare, com pouca racionalização do seu uso. A tendência é de que, num cenário crítico de disponibilidade hídrica, aumente o conflito entre a irrigação e o abastecimento de água, o que já acontece. Como a irrigação geralmente ocorre distribuída pelas propriedades, e as empresas de abastecimento de água apresentam maior inércia e estão a jusante das propriedades, o abastecimento, num período crítico, será penalizado e exigirá medidas fortes para inverter a prioridade prevista na legislação, que é atender ao consumo humano.

No nordeste do Brasil, grande parte da irrigação é realizada a partir do rio São Francisco, que por ser uma bacia muito grande, normalmente não apresenta limitações de disponibilidade, apesar do conflito com a energia. No entanto, o cenário será sempre crítico para os perímetros fora do São Francisco, onde as garantias de sustentabilidade são limitadas e dependentes da variabilidade interanual. Para reverter o processo, são necessários reservatórios que assegurem a disponibilidade entre anos secos; entretanto, reservatórios de maior volume, se comparados com a vazão média, possuem grande tempo de residência nos anos secos, o que tende a salinizar a água devido à alta evaporação. O problema pode ser minimizado em parte por conjuntos de reservatórios ou práticas locais, como reservatórios subterrâneos. Aqui também o conflito entre o uso humano e o fornecimento de energia é significativo.

Nessa região do país, desde os últimos treze anos, observa-se a tendência a uma média móvel de precipitação declinante e de aumento da evapotranspiração, agravando ainda mais a sustentabilidade da população considerando o clima e a disponibilidade de água. A avaliação da tendência interdecadal e dos efeitos climáticos são fundamentais ao planejamento de ações para a região.

Na região semi-árida, a tendência para a vizinhança dos grandes mananciais é que seja voltada ao plantio de produtos de maior rentabilidade, enquanto que para as áreas de pouca disponibilidade de água é previsto que se dediquem à agricultura de subsistência. A fruticultura e o café, em algumas regiões, têm mostrado rentabilidade, principalmente pelo maior número de safras em um mesmo ano. Por outro lado, esses empreendimentos exigem regularização da

água sem falhas durante períodos longos, já que o plantio é permanente. De qualquer modo, pode-se esperar investimentos de empresas agrícolas e outros investimentos privados na região do São Francisco, incentivando o seu crescimento econômico. A sustentabilidade desse processo de longo prazo dependerá do aprimoramento tecnológico. Nas áreas agrícolas fora da cobertura da disponibilidade hídrica sem riscos, onde os rios não foram perenizados, o potencial de água é pequeno, sendo pouco eficiente e conflituoso o recurso sistemático à irrigação de baixo valor agregado. De acordo com as condições atuais, o desenvolvimento se dará muito mais no sentido de buscar a sustentabilidade da população por meio da melhora dos indicadores sociais, a partir de investimentos não necessariamente relacionados à água. Em resumo, o cenário potencial é de gradual solução de alguns problemas críticos de sustentabilidade social, por meio de investimentos externos à região, proporcionando atendimento a uma demanda maior por água para irrigação, sobretudo para a fruticultura irrigada praticada no raio de ação dos rios perenes ou perenizados.

Nas regiões sul e sudeste do país, a irrigação não abrange grandes áreas, até porque os períodos secos não têm sido muito longos desde a década de 70, o que leva parte dos agricultores a não optarem pela irrigação. No entanto, se houver uma modificação de tendência, poderá crescer a demanda por irrigação, tornando-se viável a sua implantação em função de melhores resultados econômicos e de menor disponibilidade de água nos períodos secos. O centro-oeste, onde se encontra grande parte do cerrado brasileiro, área de grande potencial agrícola, depende muito da regularização da água, pois o lençol freático é profundo (planalto) e a sazonalidade anual da precipitação mostra vários meses (maio a agosto) praticamente sem precipitação. Portanto, a viabilidade da expansão agrícola desta área está relacionada com a disponibilidade hídrica e sua regularização.

Quanto aos programas de conservação do solo, deve-se observar que ainda ocorrerão grandes discrepâncias regionais de ações. As regiões em que o agricultor é mais bem treinado e em que há uma ação mais presente da extensão rural deverão apresentar resultados bons, como já acontece hoje. Em outras regiões, prevê-se uma ação federal mais efetiva para garantir investimentos em capacitação do homem do campo, em pesquisa aplicada e em extensão rural. Os grandes desafios deverão envolver o controle da ocupação dos limites da Amazônia e o desenvolvimento do Cerrado. Esse processo dependerá muito das políticas governamentais.

Energia

a) Planejamento de longo prazo

O Brasil é um dos grandes produtores de energia hidrelétrica, representando 10% da produção mundial. Mais de 90% da energia elétrica brasileira são provenientes de usinas hidrelétricas, sendo o restante complementado por energia térmica. Uma parte das térmicas é mantida desligada para assegurar a produção nos períodos críticos, mas existem limites. O sistema é fortemente dependente da disponibilidade hídrica de médio e longo prazos, para a produção de energia firme, tendo sido projetado com base na probabilidade de falha estimada através do uso de séries históricas de vazão, que iniciaram em 1930 e vêm incorporando mais informações anualmente.

Silveira e Guerra¹³ avaliaram a atual crise de energia do setor elétrico e mostraram que os investimentos no setor, entre 1985 e 1995, foram inferiores à demanda, o que resultou no rebaixamento do reservatório do sistema sudeste e centro oeste (como pode ser observado na figura 5), transformando um sistema de regularização interanual em um sistema de regularização intra-anual.

¹³ SILVEIRA, CARLOS. A. C. & GUERRA, HÉLVIO. N. A crise energética e o monitoramento de reservatórios hidrelétricos. *XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Aracaju, 2001.

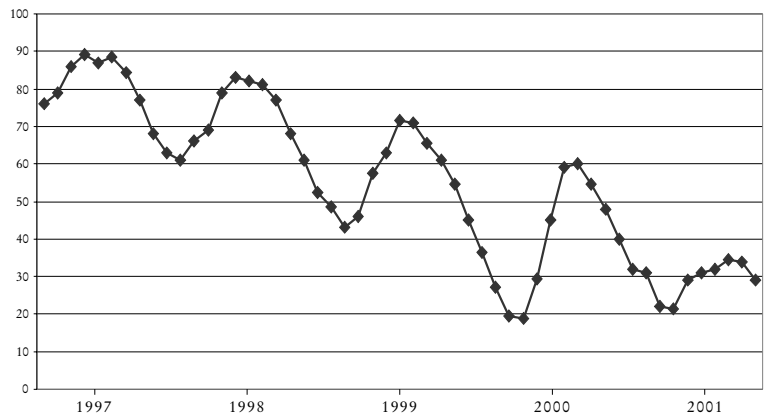


Figura 5: Nível (em %) de armazenamento do reservatório equivalente do sistema SE/CO de janeiro de 1997 a junho de 2001.

Fonte: SILVEIRA & GUERRA. *Op. cit.*

Apesar de o sistema hidrelétrico apresentar uma grande interligação energética, o que reduz o risco de falha do sistema como um todo, grande parte das usinas hidrelétricas está localizada na região sudeste, o que concentra o risco de falha do ponto de vista espacial, porque as diversas usinas estão sujeitas a variabilidades climáticas simultâneas.

Desde 1970, as regiões centro-oeste, sul e sudeste apresentam vazão média cerca de 30% superior à do período anterior, o que significa que, para a mesma capacidade instalada, é possível gerar mais energia, com menor risco de falha. Isso tem permitido, ao longo do tempo, aumentar a energia firme das usinas. O aumento de vazões ocorre, pelo menos parcialmente, como consequência de um aumento simultâneo, mas menos intenso, de precipitações na mesma região do Brasil. Enquanto isso, algumas regiões da África, como a bacia do rio Congo e a região sub-sahariana, experimentam um longo período menos úmido do que o anterior, além de redução das vazões.

Trata-se, talvez, de períodos interdecadais de 30 anos de variabilidade climática, associada ou não a mudança climática. O primeiro período observado se estendeu de 1940 a 1970; nele ocorreram seqüências de El Niño de fraca intensidade e de La Niña de forte intensidade, o que indica períodos mais secos em parte das regiões da América do Sul. O segundo período se estende de 1970 até 2000, quando ocorreram fenômenos de El Niño mais intensos e de La Niña menos intensos.

Tal comportamento somente poderia ser identificado estatisticamente, com séries suficientemente longas, por isso foi pouco percebido. Somente agora, com mais conhecimento sobre o clima e com séries de dados hidrometeorológicos que se aproximam dos 100 anos, é possível reconhecê-lo.

Em algum grau, parte da variabilidade climática tem sido prevista com base em modelos de circulação atmosférica, em horizontes de aproximadamente seis meses. Esses métodos permitem antecipar, com relativo sucesso, se as variáveis climáticas estarão superiores ou inferiores à média climática de uma estação ou seqüência de meses. Mais recentemente, tais modelos mostraram que é possível reduzir as incertezas nas previsões de até seis meses, no rio Uruguai.¹⁴

O sistema elétrico brasileiro, mesmo com o atual período de vazões altas, está no limite de atendimento da demanda. Condições climáticas mais desfavoráveis resultariam em condicionantes críticos ao desenvolvimento econômico brasileiro, mantidas as tendências de aumento da demanda e de reduzida ampliação da oferta. O mercado *spot* de energia depende da previsão das condições climáticas de curto e longo prazo. Provavelmente haverá um importante desenvolvimento tecnológico neste setor, em função do prêmio do conhecimento prévio dos condicionantes que

¹⁴ TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S. & SAMPAIO, G. O. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. *Water Resources Research*, v. 39, n. 7, p. 3, (1-11), 2003.

norteiam os preços. Da mesma forma que existe a previsão de safras agrícolas, em função das condições climáticas e do plantio, a agência reguladora poderá especializar-se para informar as condições previstas, para curto e médio prazo, do volume dos reservatórios, informações que deverão regular os preços do setor.

A pergunta que naturalmente surge é a seguinte: se soubermos antecipadamente o que vai ocorrer, poderá esse conhecimento trazer algum benefício, já que a instalação de sistemas de produção de energia requer anos para sua implantação? Ora, o benefício da avaliação preditiva é o de permitir investigar os riscos e minimizá-los a tempo, através de ações planejadas, como, por exemplo, providenciar uma reserva técnica energética para a garantia do sistema, ou definir quando iniciar o uso das térmicas e estocar água nos reservatórios.

b) Previsão de curto prazo e volume de espera

Os reservatórios de hidrelétricas operam com base na programação de geração e previsão de vazões, dentro de cenários mensais e semanais, com correções diárias. Conforme essa programação, ficam estabelecidos, nos reservatórios de maior porte, *volumes de espera* para controle de enchentes a jusante dos mesmos, tornando-os um sistema de uso múltiplo. O volume de espera implica redução de níveis do reservatório para amortecimento de cheias durante o período chuvoso. Quanto maior o volume, maior é a redução da energia produzida, em detrimento do controle de inundações. A sua determinação é realizada com base nas estatísticas das séries de vazões históricas afluentes do reservatório.

Essa metodologia tem o agravante de sub ou superdimensionar o volume, quando os valores ficam abaixo ou acima das condições esperadas (flutuação estatística). Os resultados das incertezas produzem, por um lado, maiores riscos de inundação e insegurança do sistema; e por outro lado, existem riscos de ineficiência com perda de energia gerada, na medida em que o nível é rebaixado e que, durante o período chuvoso, o reservatório não consegue recuperar o nível máximo normal. A previsão de curto prazo pode contribuir para a redução do volume de espera, permitindo: a) maior segurança às barragens e aos trechos de jusante da mesma; b) melhoria da produtividade da usina, mantendo a mesma condição de risco a jusante e para a barragem.

Atualmente, os reservatórios hidrelétricos no Brasil não utilizam a previsão de curto prazo para reduzir o volume

de espera. Os procedimentos são puramente hidrológicos e dependem da ocorrência de precipitação, portanto possuem uma antecedência máxima correspondente ao tempo de concentração da bacia. Além disso, agregam incertezas pela falta de conhecimento de precipitação futura sobre a bacia. A previsão da precipitação e sua inclusão (ou não) no modelo hidrológico permitem ampliar o tempo de antecedência da previsão de vazões afluentes aos reservatórios do sistema. Com essa previsão é possível gerenciar de modo mais eficiente a disponibilidade de energia. Collishonn *et alii*¹⁵ mostraram que a otimização do volume de espera, com base na previsão de vazão de afluência ao reservatório de Três Marias, utilizando-se um modelo hidroclimático (meteorológico+hidrológico), poderia economizar dois milhões de dólares por ano.

c) Segurança das barragens

Devem ser analisadas a eventualidade do rompimento da barragem, a área que pode ser atingida e a velocidade do escoamento, como base para um plano de defesa civil a jusante do empreendimento. Cerca de 35% das falhas ocorridas no mundo se devem a sub-dimensionamento do vertedor em função da representatividade das séries de vazão. O risco de rompimento das barragens geralmente é da ordem de 10^{-4} (baseado na probabilidade de dimensionamento do vertedor). Dessa forma, uma barragem, durante sua vida útil de 100 anos, teria a chance de 1% de romper-se. Nas últimas décadas, com o aumento da informação hidrológica, a melhoria dos métodos construtivos, a previsão e o alerta de ocorrência das enchentes, é de se esperar que este risco seja menor.¹⁶ Marengo¹⁷ mostra que, de acordo com o período de construção e a idade da barragem, o risco de falha diminui, convergindo para valores de 10^{-5} .

Segundo Lave *et alii*¹⁸ e Serafim¹⁹, o uso de um sistema de alerta com pelo menos duas horas de antecedência pode reduzir o número de mortes a zero. Paté-Cornell e Tagaras²⁰ advertem que um sistema de monitoramento pode diminuir em 12% a chance de rompimento da barragem, o número de mortes em 44% e os prejuízos em 12%. Brown e Graham²¹ identificaram dois tipos de enchentes: a) a de tempo superior à evacuação, estimado em 90 minutos; b) a de tempo inferior a 90 minutos. No primeiro caso, a perda de vidas é estimada em 0,04% da população ameaçada e, no segundo, 13%. Deve-se considerar que na seção de passagem da cheia, quando as velocidades são maiores, existem os maiores riscos.

¹⁵ COLLISHONN, W.; MARTIN, J.; TUCCI, C. E. M. & SILVA, B. C. *Avaliação de Benefícios da Previsão Meteorológica na Operação de Reservatórios com Usos Múltiplos*. 1º Prêmio INMET de Estudos sobre Benefícios da Meteorologia para o Brasil. INMET, 2006.

¹⁶ SERAFIM, J. L. Safety of Dams judged from failures. *Water Power and Dam Construction Sutton*, v. 33, n. 12, p. 32-35, December 1981.

¹⁷ MARENGO, H. M. Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia. *Ingeniería Hidráulica en México*, v. XI, n. 2, p. 65-77, 1996.

¹⁸ LAVE, L. B.; RESENDIZ-CARRILLO, D. & MICHAEL, F. C. Safety goals for high-hazard dams: are dams too safe? *Water Resources*, v. 26, n. 7, p. 1383-1391, July 1990.

¹⁹ SERAFIM, J. L. *Op. cit.*

²⁰ PATÉ-CORNELL, M. E. & TAGARAS, G. Risk costs for new dams: Economic analysis and effects of monitoring. *Water Resources Research*, v. 22, n. 1, p. 5-14, January 1986.

²¹ BROWN, C. A. & GRAHAM, W. J. Assessing the threat to life from dam failure. *Water Resources Bulletin*, v. 24, n. 6, p. 1303-1309, December, 1988.

São poucos os países que possuem um sistema legal que obrigue os empreendimentos à prevenção deste tipo de ocorrência. Na Argentina, o processo iniciou com a privatização do sistema elétrico. No Brasil, ainda não há nenhuma regulação para prevenção dos impactos resultantes dessa situação. Na França, um decreto de 1968 obriga a realização de um plano de emergência para todas as barragens com mais de 20m de altura ou reservatórios com capacidade superior a 15hm³.²² Nos Estados Unidos, existem barragens sob legislação federal e outras sob legislação estadual. Apenas as barragens administradas por órgãos federais ou barragens particulares que participam de projetos hidrelétricos estão sob lei federal. Na década de 90, o governo federal desenvolveu um padrão para segurança das barragens visando unificar as leis estaduais.

²² BENOIST, G. Les études d'ondes de submersion des grands barrages d'EDF. *La Houille Blanche*, n. 1, p. 43-54, 1989.

A segurança e o risco das barragens estão diretamente relacionados com a série hidrológica utilizada no dimensionamento do seu vertedor ou dos condicionantes climáticos adotados para estimativa da Precipitação Máxima Provável. Portanto, o aumento da incerteza climática produz um cenário que exige maior regulação para um reservatório ou uma cascata de reservatórios numa bacia hidrográfica.

Navegação

O sistema brasileiro de transporte concentra-se atualmente na malha rodoviária, mas a capacidade deste sistema está no limite. Na medida em que o país se sofisticava e cresce, a tendência é que outros meios de transporte se ampliem. Portanto, o transporte hidroviário interior deverá ser incrementado, principalmente em função das grandes áreas de produção agrícola no centro-oeste. Trata-se de uma das importantes alternativas de escoamento da produção, devido a sua economia de escala. No entanto, é fortemente dependente da variabilidade dos níveis dos rios e de sua previsão a curto e médio prazo, além das estatísticas destes níveis.

A carga transportada por um barco depende fundamentalmente do calado do rio. Como o transporte pode demorar vários dias em rios como o Paraná, Paraguai, Jacuí, Amazonas, entre outros, é necessário prever com antecedência os seus níveis para estabelecer a carga adequada. Da mesma forma, em termos de condições médias futuras, é possível avaliar os custos de transporte em função dos níveis de água e a capacidade de carga das embarcações. Como a maioria dos rios não possui regularização para navegação (com poucas exceções, como o Tietê e o Jacuí,

ainda em conflitos com outros usos), o impacto de períodos longos acima ou abaixo dos conhecidos pode comprometer o preço e a viabilidade do transporte hidroviário.

Qualidade da água e meio ambiente

A qualidade da água depende da vazão nos rios. Quanto maior a vazão, maior será a capacidade de diluição dos corpos de água. No entanto, deve-se considerar outro efeito, que é o aumento da demanda bentônica (carga no fundo dos rios), quando a vazão aumenta e a erosão do fundo incorpora esta carga no volume transportado pelo rio, reduzindo a sua qualidade. Também durante as inundações, ocorre o maior transporte de poluição difusa agregada aos sedimentos, tanto na área rural como urbana. Na maioria dos sistemas hídricos, as condições críticas de qualidade da água ocorrem durante as estiagens, quando diminui a vazão nos rios e com ela sua capacidade de diluição das cargas urbanas e rurais. Nas áreas urbanas, com as inundações, a carga do escoamento pluvial também gera condições críticas de qualidade da água.

Nesse contexto, quais são as condições que podem ser agravadas com a variabilidade climática? a) Períodos mais secos, como os que ocorreram antes de 1970, podem representar menor capacidade de diluição e piora da qualidade da água dos rios; b) por outro lado, intensificando-se as precipitações nos centros urbanos, devido ao aquecimento das superfícies urbanas e processos convectivos, as cargas pluviais representarão custos maiores para melhoria da qualidade da água; c) o desmatamento e a expansão das áreas agrícolas tenderão a ampliar a carga difusa rural sobre os sistemas hídricos, além de reduzir a capacidade de regularização natural das bacias.

Como condicionante ambiental para a conservação da fauna e flora, é muito mais importante a manutenção da variabilidade sazonal do que efetivamente um valor limite, como o discutido na qualidade da água. Evidentemente que um valor limite baixo pode comprometer a fauna do rio, mas a duração de valores acima ou abaixo de determinados patamares pode alterar significativamente a flora. No rio Paraguai, a sustentabilidade do Pantanal depende muito mais da ocorrência do extravasamento da calha do rio, onde este volume alimenta os baixios com água e sedimentos que permitem a sustentabilidade destas áreas como banhado. Alterando-se a magnitude das inundações, as áreas inundadas ficarão reduzidas e o banhado pode-se transformar em cerrado, devido ao balanço hídrico negativo desta área, como de certa forma ocorreu entre 1960 e 1973.

A construção de um reservatório que regulariza a vazão a jusante, reduzindo sua amplitude, altera os ambientes condicionantes a jusante, em função da redução da amplitude de variação dos níveis e vazões. Neste sentido, o impacto potencial da variabilidade climática pode produzir mudanças na paisagem e alteração ecológica de alguns ambientes. Somando-se a isso as ações antrópicas, torna-se imprescindível conhecer as conseqüências da complexa realidade que o homem pode produzir.

O comprometimento ambiental de regiões como Amazônia, Pantanal, Cerrado, entre outras, pela variabilidade climática e pelas ações antrópicas, deve ser examinado para que medidas preventivas e mitigadoras possam ser planejadas, principalmente no zoneamento ecológico em desenvolvimento pelo governo.

Inundações

Existem dois tipos de inundações: a) inundação ribeirinha; b) inundação devido à urbanização no interior das cidades. A primeira é um processo natural em que o rio inunda o seu leito maior, de acordo com a intensidade e a duração das precipitações, em função das condições iniciais de umidade. Os principais impactos sobre a população ocorrem devido à falta de: a) conhecimento sobre a ocorrência dos níveis de inundações e ocupação do leito de inundação; b) planejamento da ocupação do espaço de acordo com os riscos de ocorrência das inundações. Já as inundações urbanas ocorrem devido à impermeabilização e canalização do escoamento nas cidades, ampliando os volumes e picos.

No Brasil, não existe nenhum programa sistemático de gerenciamento de inundações, apenas ações isoladas de construção de obras de proteção. Observa-se, em alguns trechos de rios, o alerta de inundação pela simples informação dos níveis ou sua previsão a curto prazo, como no trecho inferior do rio Paraná, no trecho do Pantanal do rio Paraguai e no rio Iguaçu, entre outros. A cidade de São Paulo possui um sistema de previsão de alerta, com base em radar meteorológico.

No caso das inundações ribeirinhas, o cenário comum de impacto é decorrência do seguinte: a população ocupa a várzea de inundação quando ocorre uma seqüência de anos de níveis anuais máximos pequenos, uma vez que áreas planas são propícias ao assentamento. Quando retornam os anos com maiores inundações, os prejuízos são significativos e a população exige dos governos a construção de obras de controle como barragens etc. Na figura 6, pode-se ob-

servar os níveis de enchentes do rio Iguazu, em União da Vitória, estado do Paraná. Num período longo, as inundações ficaram abaixo de cinco anos de tempo de retorno (Tr). As enchentes após 1982 produziram prejuízos significativos na comunidade (tabela 1). Dessa forma, a variabilidade climática condiciona a ocupação do espaço rural e urbano quando não existe um programa preventivo de controle de inundações, acarretando grandes prejuízos a parte importante da sociedade brasileira que ocupa áreas de risco. No caso das inundações devido à urbanização, além do aumento da vazão causado pela impermeabilização, tem sido observada nos últimos anos maior intensidade de chuvas, que pode ser explicada pelo efeito térmico das áreas impermeáveis ou pelo aumento da intensidade das precipitações, com duração de até 3 horas (condições críticas para estes eventos) por variabilidade ou modificação climática. Tais condicionantes ainda estão pouco claros.

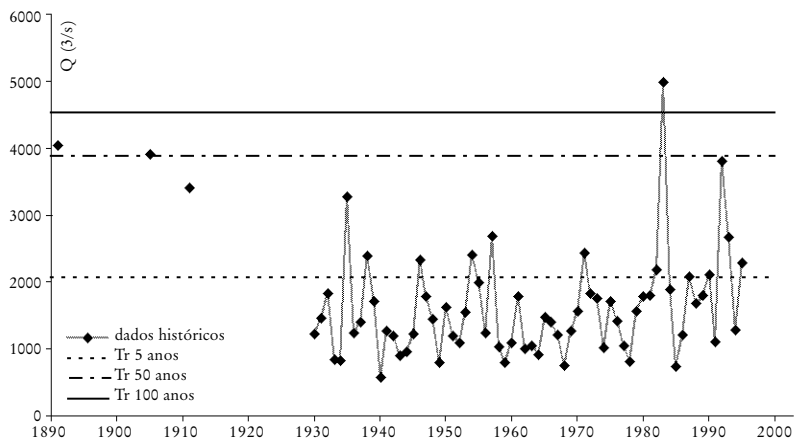


Figura 6: Níveis máximos de enchentes no rio Iguazu em União da Vitória (bacia de cerca de 25.000 km²)²³.

²³ TUCCI, C. E. M & VILLANUEVA, A. *Controle de enchentes das cidades de União da Vitória e Porto União*. CORPRERI, 1997. 117 p.

²⁴ JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (JICA). *The Master Plan study on the utilization of water resources in Paraná State*. vol. 1. Tokio: JICA, 1995.

Tabela 1: Perdas por inundações em União da Vitória e Porto União. Fonte: JICA²⁴

Ano	Prejuízos US\$ milhões
1982	10.365
1983	78.121
1992	54.582
1993	25.933

Carlos E. M. Tucci é engenheiro civil, doutor em Recursos Hídricos e professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
tucci@iph.ufrgs.br

De qualquer modo, fica evidente a variabilidade hidrológica e climática ao longo do tempo, tornando as séries não-estacionárias. Mas quais são as principais causas desse fenômeno? Como identificar as incertezas na avaliação de risco e mitigar o efeito negativo sobre os recursos hídricos? Estas são questões que necessitam de respostas consistentes e que trazem consigo desafios técnicos e científicos para reduzir a vulnerabilidade ao risco climático, visando a sustentabilidade humana e ambiental.



O AQUECIMENTO CLIMÁTICO IMPACTOS SOBRE A AGRICULTURA EUROPÉIA

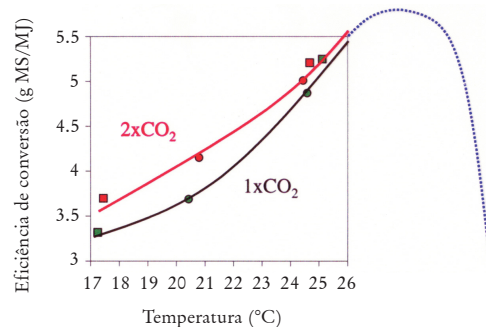
Bernard Seguin

O futuro da agricultura européia está novamente em questão, em meio às controvérsias sobre as perspectivas da PAC (*Politique Agricole Commune*) e das subvenções ligadas a essa política. A economia controla majoritariamente a escolha das produções feita pelos agricultores, bem como os sistemas de culturas e de pecuária que decorrem de tal escolha. As influências sobre os danos ambientais e a saúde dos consumidores ocupam agora o primeiro plano das preocupações que motivam a formulação dos conceitos de uma agricultura sustentável. Esses conceitos não se limitam mais à pesquisa de uma produção otimizada para assegurar a alimentação da população, mas observam igualmente a dimensão da multifuncionalidade da agricultura, visando garantir, entre outras coisas, a preservação do espaço rural. Outras funções são também emergentes, como a utilização da biomassa como energia renovável e, de modo mais amplo, a redução do uso de energia fóssil (biocarburantes, química verde, estocagem de carbono). É nesse contexto que deve ser apreciada a questão do impacto da mudança climática. O texto que segue propõe-se a fornecer as grandes linhas do que poderá acontecer, mas é preciso ter em mente que esse impacto será, ao final, apenas um dos componentes de um grande conjunto em mutação.

Características gerais dos impactos previsíveis sobre a produção agrícola

Do ponto de vista do funcionamento ecofisiológico das plantas cultivadas, o primeiro elemento a ser examinado não está diretamente ligado à modificação das variáveis climáticas, mas antes ao fator que é essencialmente responsável pelas mesmas, a saber, o aumento do gás carbônico (ou dióxido de carbono) atmosférico. Este produzirá, de fato, um efeito específico nas coberturas vegetais, estimulando a fotossíntese. Com a hipótese de uma duplicação de CO_2 no final deste século, os resultados contarão com um aumento da fotossíntese bruta da ordem de 30% para as plantas C_3 (como o trigo, o arroz etc.) e 15% para as plantas C_4 de origem tropical, como o milho, em razão de um nível de saturação da fotossíntese atingido em concentrações inferiores de CO_2 para as plantas C_4 . Isso conduz a um aumento de assimilação líquida da ordem de 20% para as plantas C_3 e de 10% para as plantas C_4 , levando em conta o aumento da respiração associada à elevação de temperatura. A amplitude desse aumento e sua duração estão condicionadas por outros fatores limitantes potenciais (nutrição em nitrogênio e outros elementos minerais), aumento que será tanto mais elevado quanto mais moderados forem tais fatores. Por outro lado, é preciso considerar uma ampliação da resistência estomática, limitando a transpiração e conduzindo a uma eficiência maior na utilização da água (relação fotossíntese líquida/transpiração), em particular para as plantas C_4 .¹ Esse conjunto levará a um incremento significativo da produção potencial de biomassa, conforme ilustra a figura 1.

¹ BETHENOD, O.; RUGET F.; KATERJI, N.; COMBE, L. & RENARD, D. Impact of atmospheric CO_2 concentration on Water use efficiency of maize. *Maydica*, 46, 75-80, 2001.



² RUGET, F.; BETHENOD, O. & COMBE, L. Repercussions of increased atmospheric CO_2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. *Maydica*, 41, 181-191, 1996.

Figura 1: Aumento da eficiência de conversão do milho pela duplicação da concentração de CO_2 a diferentes temperaturas².

Tal efeito sobre a fotossíntese será combinado ao efeito próprio do aquecimento climático, em primeiro lugar sobre a temperatura, mas igualmente sobre os outros fatores,

em particular a chuva. Ainda que a resposta fisiológica das plantas a um enriquecimento da atmosfera em gás carbônico e a uma elevação concomitante de temperatura acarrete teoricamente uma produção maior de biomassa, os efeitos sobre o rendimento das espécies cultivadas, na escala do povoamento, podem ser muito mais contrastados. Isso é particularmente válido para o sul, onde o *optimum* térmico para a fotossíntese é com frequência atingido (por exemplo, no caso do arroz, cuja fertilidade das espigas diminui sensivelmente além de 34°C, ou do milho, cuja viabilidade do pólen baixa além de 36°C), ou mesmo ultrapassado. Em condições temperadas, a elevação de temperatura pode favorecer a maior parte dos processos fisiológicos, mas também pode causar um impacto negativo sobre as culturas, da maneira como são praticadas atualmente, acelerando seu ritmo de desenvolvimento, encurtando os ciclos de cultivo e, por conseguinte, a duração do funcionamento da usina fotossintética. No final das contas, o balanço da produção de biomassa deverá apresentar aspectos variados, em função do tipo de cobertura e das condições climáticas associadas às condições de cultivo das plantas.

Eis efetivamente o que resulta do grande número de estudos consagrados nestes últimos vinte anos à previsão do impacto do aquecimento climático sobre a agricultura em escala mundial.³ A análise das últimas sínteses do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) 2001⁴ mostra a tendência a um efeito majoritariamente desfavorável nas regiões tropicais quentes, enquanto que os resultados para as regiões temperadas são mais contrastados (figura 2), porém com efeito mais negativo quando o aquecimento ultrapassa 2 a 3°C, como ilustra a figura 3 para o trigo e o milho. Trata-se de um primeiro elemento que permite delinear o contexto geral da agricultura europeia, correspondendo essencialmente a este quadro geográfico das regiões temperadas, entretanto com uma diferenciação maior entre os países mais frios ao norte da Europa e os mais quentes ao sul. O contraste fica claro no caso da França, que se situa bem na junção dessas duas grandes zonas climáticas.

Quais são os efeitos sobre a produtividade das culturas na Europa?

Os trabalhos realizados no âmbito do projeto europeu CLIVARA⁵, bem como a revista de sínteses organizada por Olesen e Bindi⁶, permitem resgatar em grandes linhas os impactos potenciais da mudança climática sobre a agricultura europeia, como segue:

³ ROSENZWEIG, C. & HILLEL, D. *Climate change and the global harvest*. Oxford: Oxford University Press, 1988.

REDDY, K. R. & HODGES, R. F. *Climate change and global crop productivity*. Wallingford: CABI Publishing, 2000.

⁴ IPCC. *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the third assessment report of IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

⁵ DOWNING, T. E.; HARRISON, P. A.; BUTTERFIELD, R. E. & LONSDALE, K. G. *Climate change, climatic variability and agriculture in Europe*. An integrated assessment (CLIVARA). Oxford (GB): Environmental Change Institute, University of Oxford, 2000. (Research report n° 21). 443 p.

⁶ OLESEN, J. E. & BINDI, I. M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *Eur. Journ. Agronomy*, 16, 239-262, 2002.

– A ação conjunta da estimulação da fotossíntese e de um aquecimento da ordem de 2 a 3°C poderá traduzir-se por um aumento da produtividade potencial da maioria das culturas (incluindo pastagens) na maior parte das regiões. Hulme *et al.*⁷ demonstraram, com referência ao trigo, que só a influência da mudança climática (sem considerar a estimulação da fotossíntese pelo aumento do CO₂) não teria peso significativo em relação à variabilidade natural dos últimos 30 anos, com exceção da Finlândia, da Alemanha e dos Países Baixos. Em contrapartida, a introdução deste efeito do CO₂ conduz a aumentos substanciais de produtividade de 10 a 30%. Para o conjunto das culturas, os valores em cifras reunidos por Olesen e Bindi⁸ são difíceis de ser interpretados diretamente, pois foram obtidos por diferentes autores com hipóteses de partida diversas. Esses valores situam os aumentos entre 10 e 30% para o trigo e para a batata, e mais para o milho ou a soja, sendo geralmente mais expressivos no norte da Europa (em particular na Escandinávia) que no sul (Espanha, Portugal) ou no leste (Ucrânia).

⁷ HULME, M.; BARROW, E. M.; ARNELL, N. W.; HARRISON, P. A.; JOHNS, T. C. & DOWNING T. E. Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature*, 397, 688-691, 1999.

⁸ OLESEN, J. E. & BINDI, M. *Op. cit.*

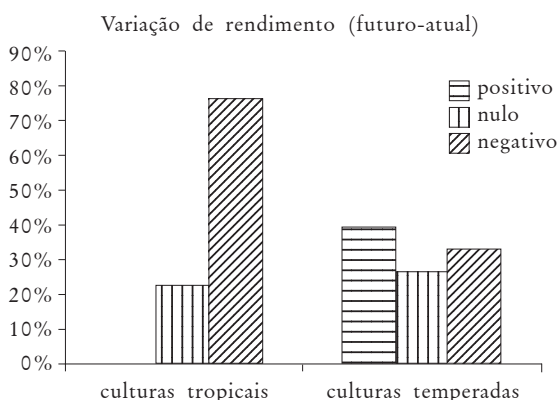


Figura 2: Efeito da mudança climática sobre o rendimento das culturas (a partir de 43 estudos repertoriados no terceiro relatório do IPCC 2001).

– Nessas regiões e, de modo mais abrangente, no sul da França, Itália e Grécia, o efeito determinante será o da pluviometria, com um stress hídrico elevado e repetitivo capaz de converter o efeito potencial positivo em resultado muito negativo, como foi verificado durante o verão de 2003.⁹ Totalmente excepcional pelas temperaturas mais elevadas (de 4 a 5°C) que as normais sazonais¹⁰, aquele verão foi igualmente marcado por uma seca intensa, que provocou baixas de rendimento atingindo de 20 a 30% as culturas de verão e mais de 50% a produção forrageira, com efeitos integrados próximo a 10% no contexto da União Europeia.

⁹ SEGUIN, B.; BACULAT, B.; BARET, F.; BRISSON, N.; HUARD, F. & RUGET, F. An overview of the consequences of the 2003 summer for agriculture in France. *Proceedings of the 8th European Society of Agronomy Congress*. Copenhagen (Danemark), 11-15 juillet 2004. ESA, 335-336, 2004.

¹⁰ CHUINEL, I.; YIOU, P.; VIOUY, N.; SEGUIN, B.; DAUX, V. & LE ROY LADURIE, E. Back to the Middle Ages? Grape harvest dates and temperature variations in France since 1370. *Nature*, 432, 289-290, 2004.

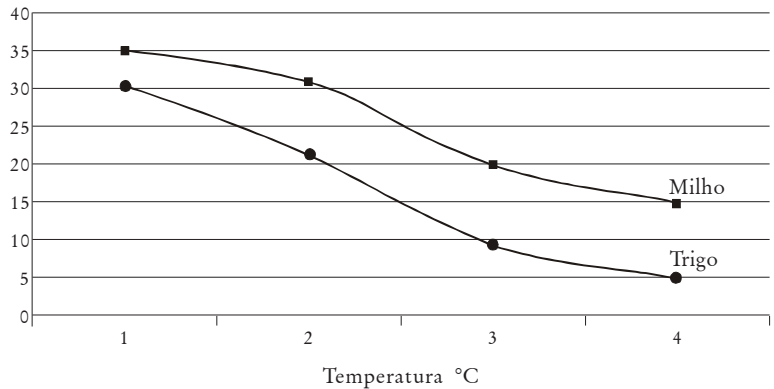


Figura 3: Efeito do aquecimento sobre o rendimento do trigo e do milho em zona temperada, a partir de estudos repertoriados no terceiro relatório do IPCC 2001¹¹ (em %).

¹¹ Conforme EASTERLING, W. & APPS, M. Assessing the consequences of climate change for food and forest resources: a view from IPCC. *Climate change*, 70, 165-189, 2005.

¹² DELECOLLE, R.; SOUSSANA, J. F. & LEGROS, J. P. Impacts attendus des changements climatiques sur l'agriculture française. *C. R. Acad. Agric. Fr.*, 85, 45-51, 1999.

SOUSSANA, J. F. Changement climatique. Impacts possibles sur l'agriculture et adaptations possibles. *Demeter*, Armand Colin, Paris, p. 195-222, 2001.

SEGUIN, B. & GARCIA DE CORTAZAR, I. Climate warning: consequences for viticulture and the notion of terroirs in Europe. *Acta Horticulturae*, 689, 61-71, 2005.

SEGUIN, B.; BRISSON, N.; LOUSTAU, D. & DUPOUEY, J. L. Impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt. In: *L'homme face au climat. Actes du Symposium du Collège de France*, Paris, 12-13 oct. 2004. Paris: Odile Jacob (ed.), 2006. p. 177-204.

Essas tendências encontram-se no âmbito do território francês, como estabeleceram os artigos de síntese de Delecolle *et al.*, Soussana e mais recentemente Seguin *et al.*¹² Quanto às grandes culturas, os resultados das simulações efetuadas com os modelos de cultivo para o trigo e o milho podem atestar efeitos ligeiramente positivos sobre o trigo (com aumentos de rendimento de 2,5 a 5,7%), e efeitos mais variáveis sobre o milho (+10% a -16% no caso de uma cultura irrigada no sudeste).

Quanto às pastagens, a conjugação de trabalhos experimentais (em estufas e com enriquecimento natural no seu exterior) e de modelização a partir de um modelo de ecossistema de pastagem, permite projetar, nas condições do Maciço Central (França), um aumento da produção de biomassa aérea da ordem de 25% (dos quais 18% são atribuíveis apenas à duplicação de CO₂). Em termos de sistema pecuário, a valorização desse incremento de produção deverá facilitar uma ampliação da capacidade animal dos pastos (de 20%) ou um aumento da estação de pastagem da ordem de três semanas, com um crescimento da ingestão de 7 a 20% e de 2 a 20% para a produção de carne.

No que diz respeito às culturas perenes (árvores frutíferas e videiras), o fator primordial poderá ser a antecipação dos estágios fenológicos, tanto mais marcada quanto mais se afaste, durante a estação, do final do período de dormência, que corre o risco de ser mais tardio por causa da falta de frio. Para certas espécies como o damasqueiro, os invernos amenos podem até criar perturbações fisiológicas (queda do broto, frutos abortados). A ação do calor, logo a seguir, afetará rapidamente a parte superior da planta

e a antecipação da data de floração poderá favorecer paradoxalmente o risco de congelamento (figura 4), projetando condições climáticas menos favoráveis para a fecundação e a polinização, a despeito da elevação das temperaturas. Para a videira, o período da maturação sofrerá uma antecipação de 15 de agosto para o decurso do mês de julho, acarretando conseqüências inequívocas sobre a qualidade da vindima, mais carregada em açúcar (e portanto em teor alcoólico) e menos em acidez.

Convém relativizar o alcance dessas previsões, observando que a disponibilidade de água pode tornar-se um importante fator de limitação, capaz de prejudicar sensivelmente as culturas em casos de secas fortes e recorrentes, como mostra a experiência de anos recentes, em particular a de 2003.

Por outro lado, os elementos que acabam de ser apresentados apóiam-se unicamente nos valores médios dos fatores climáticos. A eventualidade de ocorrências extremas e, de maneira mais ampla, a consideração da variabilidade desses fatores poderiam conduzir a impactos diferentes, pela ultrapassagem de valores-limite ainda mal definidos. Enfim, seria necessário considerar o impacto, ainda pouco conhecido no momento, sobre as plantas adventícias (ervas daninhas), os insetos e doenças criptogâmicas. Assim, foi possível constatar que, em determinados casos, a carpocapsa

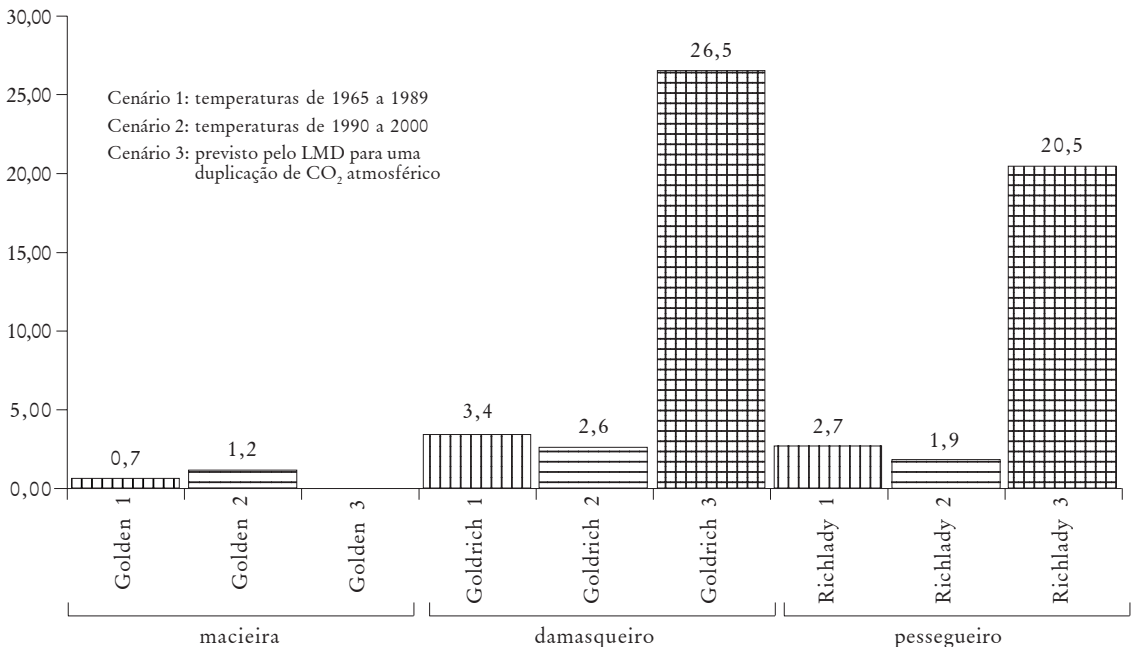


Figura 4: Efeito do aquecimento climático sobre os estragos causados pelo gelo simulados para 3 produções frutíferas (macieira, damasqueiro, pessegueiro) na região de Avignon (em %).

(*Cydia pomonella*) das maçãs passou de dois para três ciclos anuais. O fungo *Phoma* do girassol, ao contrário, foi sem dúvida reduzido no sudoeste, nestes últimos anos, pelas fortes temperaturas, e praticamente erradicado no momento pela seca de 2003. Além dos desequilíbrios dos sistemas ecológicos complexos que representam as relações entre hospedeiros e parasitas (é possível que os deslocamentos temporais dos ciclos, como consequência do aumento de temperatura, sejam significativamente diferentes para os dois componentes), também é preciso levar em conta a possibilidade de movimentos geográficos que trazem consigo certas doenças ou pragas, veiculadas pelos modernos meios de transporte, e que se instalam em regiões onde as condições climáticas lhes são favoráveis. Pesquisas em curso tentam estabelecer, por exemplo, o papel do aquecimento com relação ao aparecimento do pulgão (*Bemisia tabacci*) nas estufas do sul da França.

Passado recente: prefiguração do futuro?

Os elementos apresentados acima resultam essencialmente da consideração de cenários ainda sujeitos a muitas incertezas. Entretanto, as evidências atuais de um aquecimento significativo não somente em escala global, mas também no âmbito do território francês, desde o século passado, estimulam as pesquisas a confirmar tais projeções, a partir das observações sobre a recente evolução das produções agrícolas correspondentes. Se os agricultores (e os pecuaristas) assumem que a modificação dos calendários de certas culturas está ligada a essa particularidade climática, calendários confirmados, aliás, por análises recentes a partir de dispositivos experimentais do INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*) – praticamente um mês de antecedência desde 1970 em relação às datas de semeadura do milho, em quatro sítios cobrindo o conjunto do território –, ainda não foi possível apreciar tal modificação de maneira objetiva, nem avaliar a importância do seu eventual papel na evolução recente dos rendimentos da produção. Por outro lado, a análise dos dados fenológicos (datas dos estágios de desenvolvimento) em árvores frutíferas e na videira, culturas em princípio muito menos dependentes nesse ponto das decisões culturais, permitiu mostrar avanços significativos de estágios, como a floração das árvores frutíferas (uma dezena de dias em trinta anos no caso das macieiras da região sudeste, conforme Domergue *et al.*¹³, figura 5) ou a data da vindima no caso das videiras (quase um mês, na mesma região, durante os últimos cinquenta anos, segundo Ganichot¹⁴).

¹³ DOMERGUE, M.; LEGA-VE, J. M.; CALLEJA, M.; MOUTIER, N.; BRISSON, N., & SEGUIN, B. Réchauffement climatique: quels effets sur la floraison chez trois espèces fruitières? *Arboriculture fruitière*, 578, 27-33, 2004.

DOMERGUE, M.; GARCIA DE CORTAZAR, I.; SEGUIN, B.; BRISSON, N., & RIPOCHE, D. Le réchauffement récent du climat en France et ses conséquences sur l'agriculture. Actes du XVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Varsovie (Pologne), 10-14 septembre 2003. In: BLAZEJCZYK, K. & ADAMCZYK, A. B. (eds.). *Acad. Pol. Sci., Doc. Geogr.* 39, 85-88, 2003.

¹⁴ GANICHOT, B. Evolution de la date des vendanges dans les Côtes du Rhône méridionales. *Actes des 6èmes Rencontres Rhodaniennes*. Orange, France: Institut Rhodanien, 2002. p. 38-41.

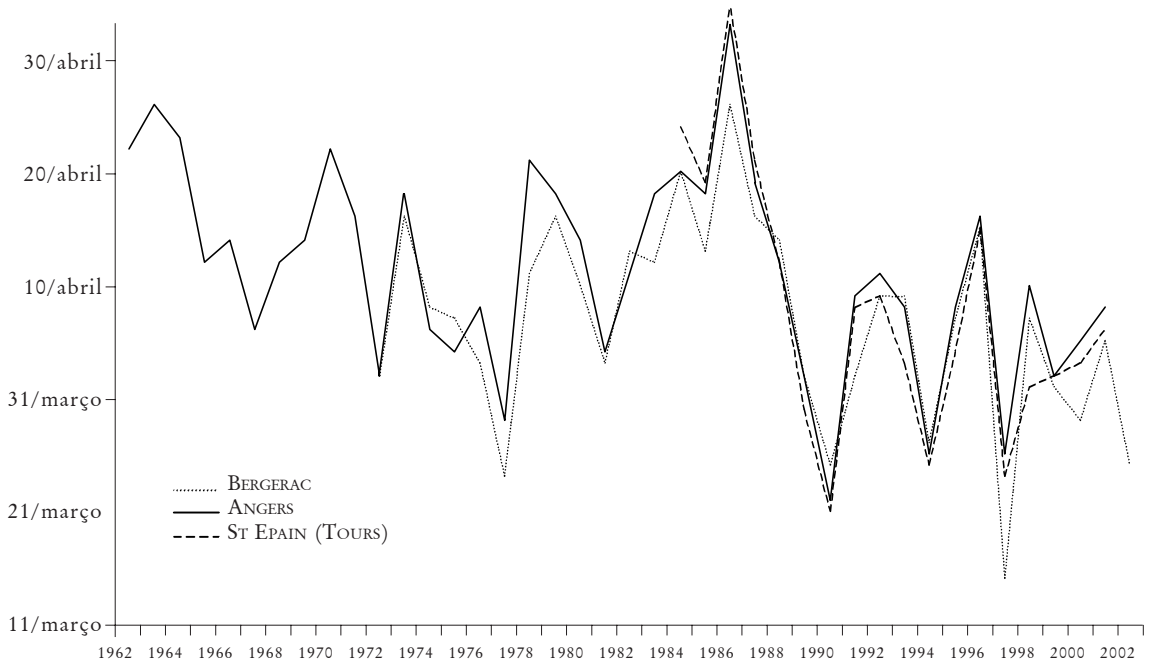


Figura 5: Evolução do período de floração da pêra Williams desde 1962 (a partir da base de dados Phenoclin). Fontes: J. M. Bore (INRA Angers), C. Lavoisier (La Morinière), M. Peschescot (Domaine de Castang)

Adaptação: mudar no próprio local ou deslocar-se

Mudar no próprio local...

As perspectivas apresentadas acima tiveram como referência sobretudo os sistemas tais como são praticados atualmente. Mas, admitindo implicitamente sua estabilidade geográfica, uma apreciável margem de adaptação parece possível, mobilizando a pesquisa agrônômica em sentido amplo, para adequar tais sistemas às condições climáticas modificadas (recurso a material genético apropriado, implementação de itinerários técnicos adaptados, ajustamento da fertilização e da irrigação etc.) De modo geral, estima-se que a adaptação das grandes culturas poderia efetuar-se sem grandes problemas, na medida em que os anos mostraram a capacidade dos agricultores de fazê-las evoluir com rapidez em função particularmente das pressões resultantes da PAC. O mesmo é válido para as pastagens e a pecuária. Entretanto, é preciso relativizar essa visão otimista sobre a capacidade de ajustamento rápido (alguns anos), sublinhando mais uma vez as incertezas atuais sobre a pluviometria e o balanço hídrico. Para as culturas perenes, embora o diagnóstico sobre a

adaptação dos sistemas de cultivo permaneça idêntico em suas grandes linhas, a capacidade de adaptação parece menor. Esta necessita considerar um período mais longo, da ordem de dez a vinte anos. Desde já, para as árvores frutíferas, diante das evoluções fenológicas constatadas, é preciso preocupar-se com a escolha do material vegetal adaptado. Quanto à videira, esta apresenta problemas específicos, por causa de sua vinculação com o terreno¹⁵.

¹⁵ SEGUIN, B. & GARCIA DE CORTAZAR, I. *Op. cit.*

Deslocar-se...

Além desse primeiro nível, deve-se levar em conta um segundo nível de adaptação, que passa por um deslocamento geográfico das zonas de produção ou de plantação. Atualmente ainda não se pode observar sinal tangível de mudança geográfica dos sistemas de produção. No entanto, o aquecimento percebido neste último século equivale a um deslocamento para o norte da ordem de 180km, ou em altitude da ordem de 150m. O que traduz a plasticidade já evocada, mas até onde ou até quando? Portanto, pode-se projetar legitimamente a eventualidade de uma trajetória de certas culturas em direção ao norte, ou em altitude, bem como a introdução de novas culturas no sul. No primeiro caso, em escala européia, é possível prever que se cultivem a ervilha e a colza (*Brassica campestris*) na Escandinávia e Finlândia, que o milho se estenda (e também a videira!) até a Grã-Bretanha, os Países Baixos ou a Dinamarca, ou em direção ao leste (Polônia etc.), que a soja e o girassol sigam de perto essa progressão etc. Para o sul, embora não pareça viável antecipar tecnicamente uma expansão da área de cultura do algodão e o aparecimento de culturas tropicais como o amendoim – além do que sua oportunidade econômica mostra-se fraca atualmente –, é antes a ameaça do recurso hídrico que representa o elemento essencial. Se a tendência dos cenários a uma diminuição da pluviometria estival (da ordem de 20 a 30%) ao redor da bacia mediterrânea está confirmada para o futuro, a mesma poderia acarretar um abandono da agricultura em certas zonas tradicionais de culturas de sequeiro e uma tensão crescente entre os diferentes usuários, no que diz respeito à utilização da água, em detrimento da irrigação.

Entretanto, na hipótese de deslocamentos geográficos, a natureza do elo com o caráter local desempenhará importante papel: se em princípio parece possível cultivar o trigo ou o milho em regiões diferentes, o mesmo não se pode dizer das produções mais tipificadas (em primeiro lugar a videira, naturalmente), para as quais uma grande

parte do valor acrescido provém da existência de uma “zona de apelação” ou de um *terroir*. Na medida em que a noção de terreno implica uma estreita adequação entre o meio físico (sol e clima), as variedades (cepas) e as técnicas de cultivo, a videira apresenta particular fragilidade em relação a uma evolução do clima. Não é possível pensar em deslocar as A.O.C. (*Apellations d’Origine Contrôlées*)! O ano de 2003 foi antes tranquilizador neste ponto: mesmo que seja muito cedo para conhecer o seu *millésime* e que a conjunção da seca e da canícula tenha efeitos nefastos em alguns aspectos, a videira demonstrou certa capacidade de adaptação a tais condições excepcionais.

À guisa de conclusão: o futuro e o presente...

As projeções sobre os impactos repousam na credibilidade dos cenários do futuro. Embora a perspectiva de uma elevação significativa da temperatura média pareça bastante aceitável, sua repartição sazonal e sua variabilidade, bem como a frequência dos extremos, permanecem assuntos para questionamento, do mesmo modo que as previsões sobre as chuvas, cujo impacto é igualmente importante.

No momento, e de forma esquemática, é permitido pensar que um aquecimento limitado (da ordem de 2°C) provocaria apenas um ligeiro deslocamento de equilíbrio, permanecendo dentro dos limites das capacidades de adaptação quase tradicionais: o século passado suplantou bem as variações das temperaturas estivais, da ordem de + ou - 1°C, enquanto a genética permitiu deslocar a cultura do milho, limitado ao sudoeste da França em 1945, cerca de 500km para o norte (de Paris). Além desse quadro, é difícil discernir as conseqüências de um aquecimento entre 4 e 5°C, que provocaria, sem dúvida, rupturas significativas. Mas, nesse caso, o impacto do aquecimento seria tal, sobre todos os ecossistemas e todos os setores de atividade, que seria ilusório prognosticar impactos a partir unicamente das considerações de produtividade potencial.

Voltamos assim às considerações da introdução sobre o impacto do aquecimento em relação a todos os aspectos socioeconômicos que vão determinar o futuro da agricultura europeia. Considerando apenas os aspectos técnicos, Olesen e Bindi¹⁶ puderam avaliar o peso relativo da mudança climática no horizonte de 2050, que seria mais ou menos equivalente ao do progresso tecnológico nos países da velha Europa, enquanto nos novos países do leste que aderiram à U. E. esse peso aumentaria em ¼. Para nos aproximarmos

¹⁶ OLESEN, J. E. & BINDI, M. *Op. cit.*

¹⁷ EWERT, F.; ROUSENVELL, M. D. A.; REGINSTER, I.; METZGER, M. J. & LEEMANS, R. Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 107, 101-116, 2005.

¹⁸ OLESEN, J. E. & BINDI, M. *Op. cit.*

Bernard Seguin é engenheiro agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador do Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) e responsável pela Mission "Changement climatique et effet de serre" (MICCES), França.

bernard.seguin@avignon.inra.fr

Tradução de Zília Mara Scarpari.

da realidade, convém evidentemente considerar, tão exaustivamente quanto possível, o conjunto das pressões que pesarão no futuro da agricultura européia, levando-se em conta diferentes cenários que afetarão de modo diverso o custo da energia, a disponibilidade das terras, os mercados comerciais etc. Ewert *et al.*¹⁷ também puderam concluir, a partir desse estudo integrado, que na União Européia constituída então por 17 países e com a perspectiva de englobar 25, o rendimento do trigo (e da maior parte das outras culturas) deveria crescer 163% em relação ao ano 2000, segundo o horizonte considerado (2020, 2050, 2080) e os respectivos cenários. No horizonte de 2050, por exemplo, a progressão seria de 37% para o cenário B₂ e de 101% para o cenário A₁F₁. Afinal, o peso da mudança climática sobre a produção global da União Européia apresentou-se fraco.

Trata-se de um resultado que poderia relativizar as interrogações sobre o impacto da mudança climática na agricultura européia. É preciso entretanto assinalar que os autores do estudo enfatizam que esse efeito global relativamente fraco provém de ponderações dos efeitos regionais, estes significativos e da mesma ordem dos efeitos tecnológicos, como estimaram Olesen e Bindi¹⁸.

Portanto, a mudança climática não será o único fator que influenciará na agricultura européia, com certeza, mas seu impacto sobre a produtividade das culturas e a repartição geográfica das áreas agrícolas potenciais será bastante significativo. Por outro lado, a eventualidade de um crescimento da variabilidade e de um recrudescimento das ocorrências extremas (em particular das temperaturas elevadas e das secas no sul) poderá reforçar tal impacto.



MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AGRICULTURA

UMA ABORDAGEM AGROCLIMATOLÓGICA

Eduardo Delgado Assad
Hilton Silveira Pinto
Jurandir Zullo Junior
Fábio Marin

Que cenários poderão configurar-se em decorrência da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera, notadamente o dióxido de carbono? O que está acontecendo e o que poderá acontecer na agricultura, se ocorrer aumento de temperatura e mudanças na precipitação pluviométrica no Brasil? Essas questões traduzem a inquietação da sociedade brasileira contemporânea no que diz respeito aos reflexos sociais e econômicos das mudanças em curso. Para tentar respondê-las, é preciso resgatar primeiramente certas informações sobre a evolução do clima; em segundo lugar, não se pode deixar de referir algumas análises de longas séries de dados de temperatura, bem como de evidências de efetivas mudanças climáticas; por fim, com o auxílio de modelos meteorológicos, será possível avaliar os efeitos da elevação de temperatura na produção agrícola e seus reflexos no zoneamento de riscos climáticos que se faz no Brasil.

Introdução

A discussão sobre as mudanças climáticas tem reflexo em toda sociedade. Afirma-se que a terra está aquecendo, que a chuva está diminuindo, que o inverno é mais intenso e que determinados fenômenos, como vendavais, furacões, chuvas de granizo “nunca dantes vistos”, acontecem com maior frequência. Algo mudou? O que mudou? É verdade que a capacidade do homem de poluir a atmosfera aumentou e muito, desde o início da revolução industrial nos idos de 1780. É evidente que as florestas e outros tipos de vegetação natural têm sido derrubadas em ritmo acelerado e substituídas por áreas agricultáveis. Somente nos cerrados brasileiros, nos últimos 25 anos, 45 milhões de hectares de vegetação natural foram substituídos por culturas intensivas ou pastagens.¹ Atualmente o Programa de Cálculo do Desflorestamento da Amazônia (PRODES), coordenado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), indica que as taxas de desmatamento na Amazônia são muito altas, da ordem de 24.865Km² em 2002-2003, 27.361Km² entre 2003-2004 e 18.900Km² entre 2004-2005. Na maioria dos casos as florestas são substituídas por pastagens ou agricultura, após a queimada.²

Aliado a esses fatos, vem o avanço tecnológico e a capacidade do homem, cada vez mais impressionante, de coletar, armazenar e analisar as informações do ambiente.

Por que a meteorologia, nas últimas duas décadas, tem estado em evidência?

Em um primeiro momento, porque a capacidade de se coletarem dados climáticos aumentou exponencialmente. Segundo, porque o desenvolvimento e os produtos de modelos de previsão têm oferecido às sociedades, informações importantes de amplo espectro, desde o turismo, passando pela aviação, agricultura, defesa civil etc. Determinados *vilões climatológicos*, como o “El niño” ou a “La niña”, apesar da sua difícil previsão, são bem conhecidos no que diz respeito aos seus efeitos, sendo também possível minimizá-los. A mídia divulga periodicamente a previsão do tempo e faz alertas climáticos, fundamentados em pesquisas e modelos meteorológicos. Bolsas de cereais têm as atenções voltadas para os possíveis “*sinistros climáticos*”, que podem ocorrer alterando significativamente os mercados de importação e exportação de alimentos. Portanto, quando se fala em mudanças climáticas, toda a sociedade é afetada e a correta informação deve ser repassada, procurando-se evitar tumultos desnecessários e incertezas que podem ter reflexos econômicos e sociais incalculáveis.

¹ EMBRAPA. *Embrapa Cerrados e a região dos Cerrados*. Informações básicas e dados estatísticos. Planaltina: Embrapa-CPAC, 1997. 24p.

² Ver www.obt.inpe.br/prodes/index.html.

Evolução do clima e mudanças globais

Para abordar as questões referentes à evolução do clima, poder-se-ia discorrer sobre teorias conhecidas ou procurar buscar na literatura informações já amplamente veiculadas. Nesse sentido decidiu-se pela segunda opção e selecionou-se parte do texto de Guyot:

Os resultados de análise de calotas de gelo da Groenlândia e da Antártica mostram que as flutuações do clima que se produziram ao longo dos 160.000 últimos anos estão estreitamente ligadas aos teores da atmosfera em gás, notadamente o gás carbônico e o metano.³

³ GUYOT, G. *Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes*. Paris: Masson, 1997. 505 p.

⁴ LORIUS, C. Climat et gaz à l'effet de serre: les données des archives glaciaires. *CR. Acad. Sci. La vie des Sciences*, 8:108-124, 1991.

⁵ PETIT-MARIE, N. L'avenir dans les archives géologiques. *La recherche*, 23(243):566-569, 1992.

⁶ DUPLESSY, J. C. Les certitudes des paleoclimatologues. *La Recherche*, vol 23, 243:558-565, 1992.

⁷ LE TREUT, H. & KANDEL, R. Que nous apprennent les modèles de climats? *La Recherche*, vol. 23, n. 243, 572-583, 1992.

⁸ DUPLESSY, J. C. *Op. cit.*

Atualmente, todos os resultados obtidos tanto pelos glaciólogos⁴, como pelos geólogos⁵ e paleoclimatólogos⁶, ou os especialistas da modelagem do clima⁷, confirmam que as flutuações climáticas que se produziram nos últimos milhões de anos são principalmente devidas às variações de insolação. A origem dessas variações é puramente astronômica, conforme a proposição feita pelo geofísico Milutin Milankovich, citado por Duplessy⁸. Como todas as teorias inovadoras, elas foram objeto de controvérsias, mas agora são plenamente validadas graças ao desenvolvimento recente da análise isotópica dos sedimentos marinhos. As flutuações climáticas observadas são então explicadas pela combinação de dois fatores:

1. O primeiro corresponde à variação da inclinação do eixo da terra sobre o plano da sua órbita, de mais ou menos 1°30' em torno de um valor médio de 23°30' com uma periodicidade de 41.000 anos. Quando a inclinação é forte, as zonas de altas latitudes recebem mais energia no verão e menos no inverno, o que amplifica os contrastes sazonais. O fenômeno inverso também aparece em períodos de pequena inclinação.

2. O segundo fator é a posição da terra sobre sua órbita em torno do sol, numa determinada data que varia com uma pseudoperiodicidade, que compreende os períodos dominantes entre 19.000 e 23.000 anos. Assim, a terra está mais próxima atualmente do sol durante o inverno boreal do que durante o verão. Esta configuração provoca verões mais quentes e invernos mais frios. Vivemos neste período há alguns milhares de anos.

As variações astronômicas da insolação provocam uma série de outros fenômenos que tem por efeito amplificar as modificações climáticas. Neste caso, evidências sobre as atividades solares começam a ser comprovadas.

Trabalhos desenvolvidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM)⁹ mostram um crescimento da temperatura no hemisfério norte da ordem de 0,5°C. Este aumento não é contínuo, mas concentrado principalmente em dois períodos: o primeiro de 1920 a 1940 e o segundo a partir de 1976, com um aquecimento rápido que culmina em 1990. Por outro lado, observa-se um resfriamento após 1940, sobretudo durante os anos 60 e 70.

No hemisfério sul, a série temporal indica um aquecimento mais progressivo após 1930, com aumento mais forte até os anos 70.

Guyot¹⁰ apresenta com clareza a teoria em que se baseiam as afirmações das alterações climáticas globais. Entretanto, fica evidente que *mudanças climáticas significativas* foram observadas na escala de tempo geológico e que, no último século, foram observadas *flutuações climáticas* comprovadas pelos dados das séries históricas analisadas. Está provado que houve aquecimento e resfriamento, para períodos diferentes, nos últimos 150 anos, o que é bem diferente das claras mudanças climáticas identificadas no espaço de tempo geológico.

Trabalhos similares foram feitos no Brasil. Salgado Laboriau *et al.*¹¹, analisando as mudanças climáticas e a vegetação no final do quaternário no cerrado e veredas do Brasil central, observam que a vegetação antes de 32.400 anos era similar à atual com clima sub-úmido; entre 32.400 e 20.000 anos predominou a vegetação rasteira, sugerindo que a umidade aumentou, mas que a temperatura provavelmente diminuiu; a fase úmida foi consistente no Pleniglacial médio, que terminou em 28.000 anos nos Andes tropicais; começando a decrescer a partir de 18.500 anos; houve um período muito seco entre 18.500 e 11.000, mas, entre 6.500 e 5.000 anos a umidade retornou, coincidindo com o aumento da precipitação em outras partes do Brasil central. Em outro artigo, Salgado Laboriau *et al.*¹² constatam que de 4.600 anos até o presente, na região do Brasil central, as diversidades palinológicas atuais não evidenciaram mudanças climáticas.

Fica então a questão: é real ou não o aquecimento da atmosfera? As séries da OMM¹³ indicam um aumento de 0,5°C no planeta, desde o início da revolução industrial, ou seja, numa série de 130 anos, observa-se uma elevação de

⁹ OMM. Organisation Meteorologique Mondiale. *The global climate system monitoring*. December 1988/may 1991. Genève: OMM, 1992. 110 p.

¹⁰ GUYOT, G. *Op. cit.*

¹¹ SALGADO-LABORIAU, M. L.; CASSETI, W.; FERAZ-VICENTINI, K. R.; MARTIN, L.; SOUBIÉS, F.; SUGUIO, K. & TURCQ, B. Late quaternary vegetational climatic changes in cerrado and palm swamp from central Brazil. *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*, 128:215-226, 1997.

¹² SALGADO-LABORIAU, M. L.; BARBERI, M.; FERAZ-VICENTINI, K. R. & PARIZZI, M. G. A dry climatic event during the late quaternary of tropical Brazil. *Review of paleobotany and Palynology*, 99:115-129, 1998.

¹³ OMM. Organisation Meteorologique Mondiale. *Op. cit.*

temperatura. Grandes flutuações inter-anuais acontecem, com aquecimento e resfriamento em períodos diferentes. Como é feita essa determinação? Recupera-se uma série histórica de dados de temperatura obtidos por estações climatológicas localizadas em várias partes do globo e determina-se a média anual da temperatura de cada estação. De posse da temperatura média anual de cada estação em vários pontos, calcula-se o valor médio da temperatura da Terra. A questão é que 0,5°C é um valor muito inferior ao desvio padrão da média da série histórica. Fica, portanto, uma dúvida: existe realmente um aquecimento do planeta devido às ações antrópicas (desmatamento, queimadas, emissão de gases etc.) ou esse aumento de temperatura pode ser explicado como fenômeno normal atrelado aos desvios de origem estatística no pequeno intervalo de tempo analisado?

Portanto, antes de se afirmar que o planeta está aquecendo, é importante verificar se, no período atual, o possível aquecimento médio de 0,5°C, não está ligado às flutuações de insolação, conforme apresentado por Guyot¹⁴, ou procurar verificar quantitativamente se a emissão de gases de diversas origens tem provocado essas alterações. Um exemplo representativo de tal hipótese pode ser obtido analisando-se a série histórica de dados de temperatura de Campinas, São Paulo. Nesse sentido, o relatório do IPCC¹⁵, *Intergovernmental Panel on Climate Change*, é incontestável. As mudanças estão ocorrendo, as concentrações de CO₂ na atmosfera cresceram e a contínua emissão de gases de efeito estufa tem promovido um aumento na temperatura mínima, com fortes evidências como o degelo da Groenlândia, a redução das neves eternas do Kilimanjaro, a incontestável redução das geleiras na Patagônia e as fortes ondas de calor que nos últimos anos assolaram a Europa.

Quando se analisa a temperatura média, como é o caso da figura 1, essa evidência não é clara. Percebe-se uma flutuação oscilando entre 20,0 e 21,0°C.

A análise dessa série mostra algumas flutuações interessantes. No período de 1930 a 1937, a temperatura média anual esteve abaixo de 20,5°C. Entre 1938 e 1941, houve um aquecimento e a temperatura média anual ficou acima de 20,5°C. Novamente no período de 1942 a 1954, houve um novo resfriamento e a temperatura média anual ficou abaixo de 20,5°C. Após esse período observou-se uma tendência de elevação de temperatura entre os anos de 1952 a 1960, chegando a 22°C. Finalmente, de 1960 a 1987, a temperatura oscilou entre 20°C e 21°C. Nesse caso, como em vários outros, o desvio padrão das temperaturas máximas

¹⁴ GUYOT, G. *Op. cit.*

¹⁵ IPCC. *Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, adaptations and vulnerability*. Disponível em http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/005.html >acesso em: julho 2006.

anuais é da ordem de 2,0°C, e das temperaturas médias anuais, entre 1,5 e 2,0°C, o que é pelo menos 4 vezes superior ao aumento da temperatura média do globo. Não foram verificadas nessas séries tendências contínuas de aquecimento, mas sim flutuações normais associadas aos valores absolutos observados. É difícil afirmar, analisando séries históricas da temperatura média como a de Campinas, que houve tendência de aquecimento na região.

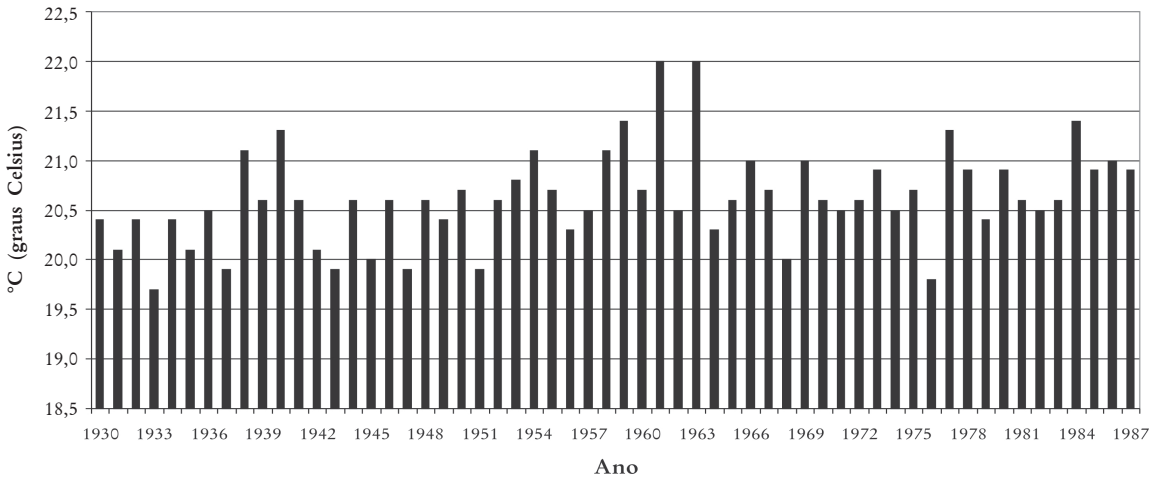


Figura 1: Variação da temperatura média anual de Campinas. Período 1930-1987. Fonte: IAC e CEPAGRI/UNICAMP

Entretanto, quando se analisa a temperatura mínima média nos últimos 115 anos, na mesma região (figura 2) percebe-se uma forte tendência de elevação, da ordem de 2,5°C.

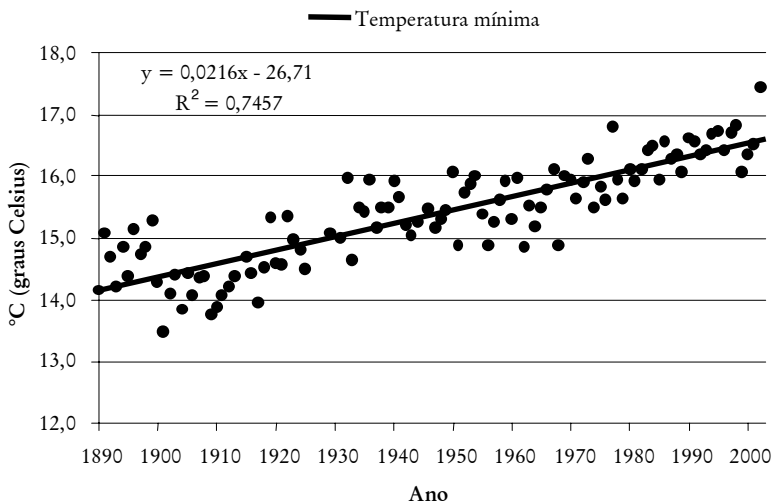


Figura 2: Variação da temperatura mínima média anual de Campinas. Período de 1890 a 2002. Fonte: IAC e CEPAGRI/UNICAMP

Para evitar os problemas de análise induzidas por crescimento de área urbana, maior impermeabilização do solo provocando forte influência nas medições de temperatura, etc, a mesma verificação foi feita em Passo Fundo e Pelotas, no Rio Grande do Sul, e em Sete Lagoas, Minas Gerais, em áreas rurais. A tendência é a mesma. A explicação mais plausível, apesar de algumas controvérsias, aceita pela maioria dos cientistas do globo, é que a concentração dos gases de efeito estufa está aumentando, provocando essa nítida elevação de temperatura mínima.

Efeito do aumento do dióxido de carbono na atmosfera

O efeito do aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera tem sido intensamente estudado pelos especialistas em fisiologia vegetal. O seu funcionamento é bem conhecido, no que diz respeito à atividade fotossintética e a sua ação no crescimento das plantas. A concentração do CO_2 na atmosfera, sendo próxima de 300 ppm, está bem abaixo da saturação para a maioria das plantas. Essa concentração, quando em níveis excessivos (próximos de 1.000 ppm), passa a ser fitotóxica. A atividade fotossintética é maior nas plantas tipo C_3 ¹⁶ do que nas C_4 ¹⁷. Altas concentrações de CO_2 podem aumentar a fotorrespiração nas plantas C_3 . Conseqüentemente, a taxa fotossintética, especialmente nos experimentos que procuram enriquecer o ambiente com CO_2 , pode ter uma resposta maior nas plantas C_3 do que nas plantas C_4 . Nesses mesmos experimentos, não se observam evidências de aumento de produtividade. Da mesma maneira, a transpiração (diretamente relacionada com a temperatura), tende a ser mais reduzida nas plantas C_4 do que nas plantas C_3 . O fato deixa evidente que existe uma maior eficiência no uso da água, nas plantas C_4 do que nas plantas C_3 .

Para entender o funcionamento combinado do aumento da temperatura e da concentração de CO_2 na atmosfera, utilizam-se modelos que tentam explicar os possíveis incrementos ou reduções de produtividade, provocados por esses dois fatores, diretamente ligados à atividade fotossintética.

Assad & Luchiari¹⁸, utilizando modelos fisiológicos simplificados, mostraram que tais variações são significativas nos cerrados brasileiros. Por exemplo, a temperatura média durante a estação chuvosa nessa região (outubro a abril) é de 22°C, tendo um máximo de 26,7°C e um mínimo de 17,6°C. Considerando uma variação térmica regional, foram simulados dois cenários:

¹⁶ Plantas C_3 – A denominação C_3 advém do fato de a maioria das plantas verdes formarem como primeiro produto estável da cadeia bioquímica da fotossíntese o ácido 3-fosfoglicérico (3-PGA), uma molécula com 3 carbonos. De forma bastante simplificada, a fotossíntese C_3 envolve a adição de uma molécula de CO_2 – reação de carboxilação – em uma molécula acceptora constituída de 5 carbonos e dois átomos de fósforo, a ribulose 1,5 bisfosfato (RUBP). A Rubisco ou seja, a ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase-oxigenase é a enzima responsável pela carboxilação no ciclo C_3 também conhecido como “ciclo de Calvin-Benson”. A maioria das leguminosas é classificada como plantas C_3 .

¹⁷ Plantas C_4 – As plantas C_4 são assim chamadas por formarem como primeiro produto da fotossíntese o ácido oxalacético (4C), o qual é rapidamente reduzido a ácido málico e ácido aspártico, ambos com 4 carbonos, porém mais estáveis. A maioria das gramíneas se encontra nessa categoria.

¹⁸ ASSAD, E. D. & LUCHIARI Jr. A. Future scenarios and agricultural strategies against climatic changes: the case of tropical savannas. In: *Mudanças Climáticas e estratégias futuras*. USP, 30-31 de outubro de 1989. São Paulo, SP.

1. Aumento de 5°C na temperatura média. Nesse caso, para as plantas C₄ (milho e sorgo) haveria um incremento potencial de pelo menos 10 Kg/ha/dia de grãos secos na produtividade média observada hoje. Para as plantas tipo C₃ (soja, feijão, trigo) esse aumento seria menor, da ordem de 2 a 3 Kg/ha/dia de grãos secos.

2. Redução média de 5°C. A perda de produtividade nas plantas tipo C₄ seria da ordem de 20 Kg/ha/dia e nas plantas tipo C₃, da ordem de 10 kg/ha/dia.

Tabela 1: Comparação entre as plantas C₃ e C₄.

Parâmetros	C ₃ (soja, feijão)	C ₄ (milho, cana, sorgo)
Anatomia	Células esponjosas e paliçádicas	Mesófilo e células da bainha do feixe vascular
Taxa de crescimento (g.dm ⁻² .dia ⁻¹)	1	4
Estômatos	Abertos durante o dia e fechados à noite	Abertos durante o dia e fechados à noite
Eficiência do uso da água (gCO ₂ Kg ⁻¹ H ₂ O)	1-3	2-5
Taxa fotossintética ótima (mgCO ₂ dm ⁻² .h ⁻¹)	30	60
Temperatura ótima	20-30°C	30-45°C
Ponto de compensação de CO ₂	50 ppm	5 ppm
Fotorrespiração	Alta	Baixa

Neste tipo de abordagem, ficou claro que um aumento da concentração de CO₂, em níveis não superiores a 1.000 ppm, provocando um aumento de temperatura de até 5°C na atmosfera, resultaria num aumento de produtividade nas plantas C₄ (da ordem de 20%) e nas plantas C₃ (da ordem de 10%).

Posteriormente, alguns modelos mais precisos foram desenvolvidos, como é o caso do CERES-WHEAT versão 2.10¹⁹, CERES MAIZE²⁰ e SOYGRO-SOYBEAN²¹. Esses modelos foram utilizados pelo IBSNAT, *International Benchmark Sites Network for Agrotechnology*,²² e permitiram considerar, de forma integrada, fatores do solo, da planta e do clima para verificar as variações de produtividade em diversas condições ambientais. No modelo desenvolvido pelo IBSNAT, existe uma opção de simular os efeitos fisiológicos provocados pela variação na concentração de CO₂ da atmosfera.

¹⁹ GODWIN, R. B.; RITCHIE, J. & SINGH, U. *A user Guide to CERES wheat v.2.10*. Muscle Shoals, ALA, USA / Michigan State University/IFDC/IBSNAT, 1989. 86 p.

²⁰ JONES, C. A. & KINIRY, J. R. *Ceres-Maize: a simulation model of maize growth and development*. Texas: University Press, 1989. 194p.

²¹ JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; JAGTAP, S. S. & SOYGRO, V. 5.41: Soybean crop growth simulation user's guide. *Agriculture Experimental Station Journal*, Gainesville, Florida, n. 8304, 1988.

²² JONES, J. W.; JAGTAP, S. S. & HOOGENDOORN, G. The structure and function of DSSAT. In: IBSNAT SYMPOSIUM, 1989, Las Vegas, Nevada. *Proceedings*. Honolulu: University of Hawaii/IBSNAT, 1990. p. 1-14.

²³ SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B. & SANS, L. M.^a Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for Wheat, Maize and Soybean. *Revista Brasileira de Agroclimatologia*, Santa Maria, v. 2. p. 115-129, 1994

²⁴ ASSAD, E. D. & LUCHIARI Jr. *Op. cit.*

²⁵ SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B. & SANS, L. M.^a *Op. cit.*

Modelos como esses são testados em diversas regiões do globo e têm servido de orientação para suporte à decisão na agricultura. No Brasil, Siqueira *et al.*²³, utilizando esses modelos e trabalhando com vários cenários diferentes, em 13 locais, desde baixas latitudes, como Manaus, até latitudes altas, como Pelotas, encontraram respostas bem próximas e mais exatas do que aquelas propostas por Assad & Luchiarri²⁴. Trabalhando com os modelos de equilíbrio atmosférico conhecidos com GISS, GFDL e UKMO associados aos modelos do IBSNAT, Siqueira *et al.*²⁵ mostraram que todas as simulações projetavam aumento na temperatura, algumas mudanças de precipitação e efeitos menores na radiação solar. Em decorrência da elevação de temperatura, foram verificados encurtamentos nos ciclos fenológicos do milho e do trigo e aumentos nas produtividades de milho, soja e trigo, quando aumentos nas concentrações de CO₂ passaram dos atuais 330 ppm para 550 ppm. Em alguns casos foram projetados ganhos superiores a 500 kg/ha para o milho e trigo e mais de 1.000 kg/ha para a soja.

O que é importante destacar em todos esses modelos, com maior ou menor detalhamento, é que, havendo aumento da concentração de CO₂, fica evidente um aumento de produtividade tanto para as plantas C₃ como para as C₄, até o nível de fitotoxicidade. Ou seja, até uma determinada concentração o efeito é positivo, depois as plantas morrem. A questão é saber como será o comportamento dessas plantas com relação ao fator hídrico, uma vez que o aumento de temperatura provocará um aumento na eficiência fotossintética, com reflexos no consumo de água e maior vulnerabilidade aos estresses hídricos, comuns em regiões tropicais, durante o período das chuvas.

Possíveis efeitos das mudanças climáticas na agricultura brasileira

No início dos anos 90, o Ministério da Agricultura solicitou ao Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA) do Ministério do Desenvolvimento, um estudo que pudesse identificar as principais causas das perdas na agricultura brasileira. Os números indicaram que 95% das perdas eram por seca ou excesso de chuva. A partir dessas indicações e fundamentado nos resultados da pesquisa agropecuária brasileira, foi implantado o Zoneamento Agrícola do Brasil, nome adotado pelos estudos de riscos climáticos que hoje orientam parte da liberação dos créditos agrícolas, responsáveis atualmente por 95 bilhões de dólares/ano,

referentes ao PIB da agricultura brasileira. Na verdade, trata-se de indicações de datas de plantio, para vários tipos de solos e várias culturas em 21 estados do país, atingindo anualmente em torno de 5.300 municípios. Essas indicações são baseadas nas análises de séries históricas de chuva e de temperatura, que variam entre um mínimo de 20 anos de dados diários até as séries mais longas com 100 anos.

Para indicação das datas de plantio, com pelo menos 80% de probabilidade de sucesso (ou seja, no máximo 20% de ocorrência de seca ou de excesso de chuvas), são consideradas a capacidade de retenção de água nos solos, a profundidade das raízes das plantas cultivadas, a duração do ciclo, a chuva e a variação desse conjunto de dados no período. Na região nordeste do Brasil, as datas de plantio variam de novembro a junho e no sul do Brasil, de julho a dezembro. Assim, as indicações do zoneamento são feitas para as condições climáticas de cada município, para as culturas de arroz, feijão, milho, trigo, soja, café, algodão e, mais recentemente, caju, mamona, mandioca e maçã.

O princípio para determinação do risco climático é simples. As áreas de menor risco são aquelas onde não há deficiência hídrica, o que garante a germinação e, principalmente, a fase de floração-enchimento de grãos, que reúne as condições fenológicas referentes (condicionantes da produtividade das culturas). Esse risco não deve ultrapassar 20% (figura 3).

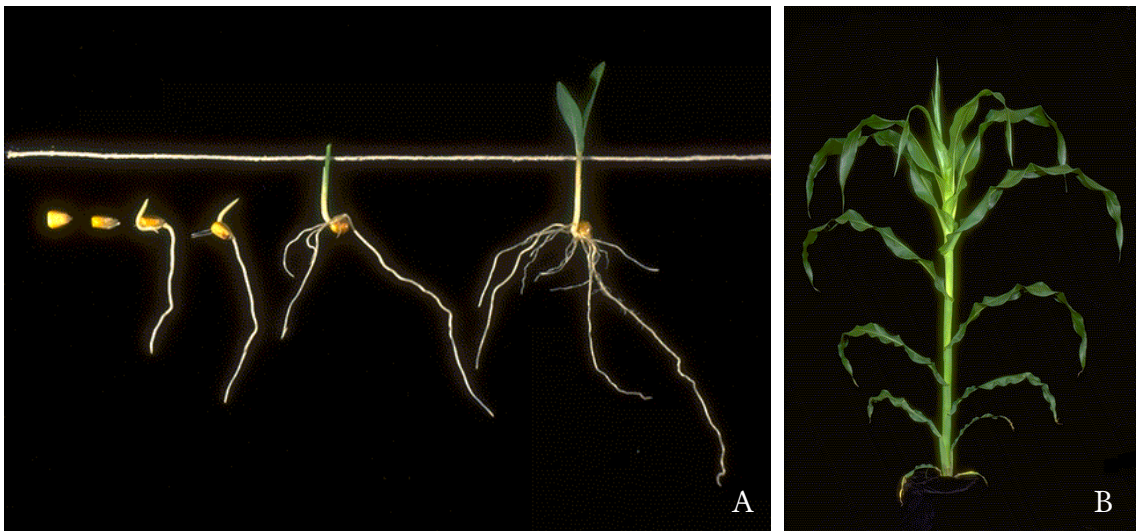


Figura 3: Na fase de germinação (A) e no início do período de florescimento (B), o risco de faltar água deve ser inferior a 20%. Cultura de milho. Fonte: EMBRAPA/CNPMS

Para definir os riscos, são utilizados índices agrometeorológicos determinados no balanço hídrico, calculados a partir da evapotranspiração das culturas, que é a soma entre a transpiração das folhas e a evaporação do solo. Também pode ser definida como a quantidade total de água perdida de uma superfície coberta com vegetação, através da evaporação direta da água de interceptação e da superfície do solo. Cada planta tem sua condição ótima de consumo de água, regulada pela fotossíntese, que depende diretamente da quantidade de água e da temperatura do ar. Sendo satisfeitas essas condições, o plantio é recomendado.

Por esses critérios é então conhecida a área em que se pode, potencialmente, plantar qualquer cultura no território nacional, com riscos determinados. A pergunta que se faz é: o que aconteceria com o atual zoneamento agrícola e conseqüentemente com a agricultura, havendo aumento de temperatura nos patamares indicados pelo IPCC²⁶, com um mínimo de 1,4°C e um máximo de 5,8°C na temperatura média do globo em 100 anos?

²⁶ IPCC. *Op. cit.*

A primeira conseqüência é o aumento nas taxas evapotranspirativas, promovendo maior consumo de água das plantas e, portanto, esvaziando o reservatório “solo” mais rapidamente. A segunda conseqüência seria a redução do ciclo das culturas, principalmente nas plantas C₄, tornando-as mais eficientes em termos de assimilação e transformação energética, porém mais sensíveis à deficiência hídrica. A análise dos impactos do aumento da temperatura e da chuva na agricultura deve, então, ser feita no tempo e no espaço.

Tomando como exemplo o caso da soja no Brasil, e considerando que a maioria dos plantios é feita entre os meses de outubro e dezembro, os impactos esperados para o aumento de 1,4 e 5,8°C são consideráveis. O exemplo da figura 4 refere-se ao plantio no mês de novembro.

Nesse mês, considerado o de menor risco para o plantio das culturas de sequeiro, há uma redução média de 60% na área favorável para cultivo da soja. Mantido o calendário agrícola atual, a região sul do Brasil sofreria o maior impacto, com forte redução de produção. Por outro lado, havendo aumento da temperatura, o calendário de plantio nas altas latitudes tenderá a se deslocar, sendo possível o plantio de soja e milho até o final do mês de janeiro com colheita em junho. No caso das regiões com baixas latitudes, haverá redução de área, sem opções de deslocamento de calendário.

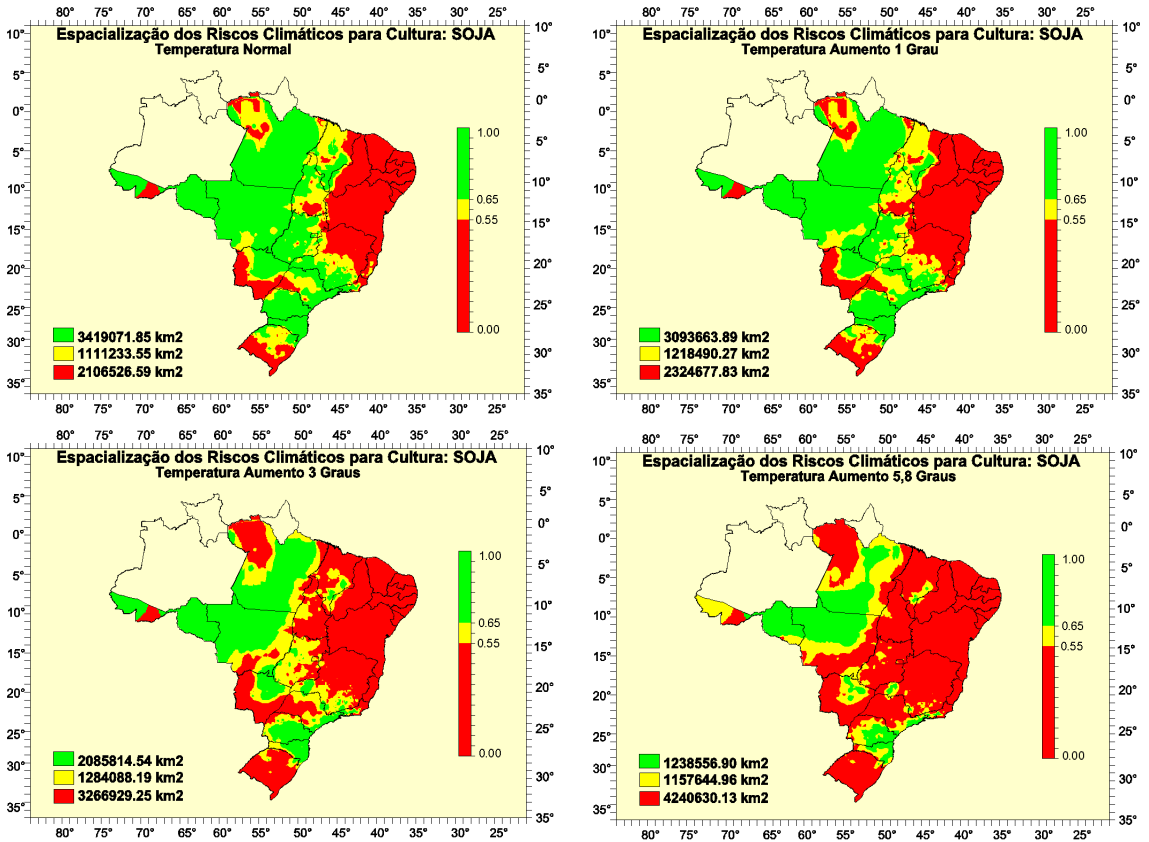


Figura 4: Impacto do aumento da temperatura nas áreas potencialmente favoráveis (verde) para cultivo de soja no Brasil. Quanto mais próximo de 1,0 menor o risco de plantio.

A mesma análise para os três cenários é feita para várias culturas indicando redução na produção e na área plantada.

No caso específico do café arábica, são considerados os riscos de geada, de abortamento de flores (sob temperatura maior que 34°C) e de deficiência hídrica. A elevação na temperatura reduziria o risco de geada, mas cresceriam os riscos de abortamento de flores. Quanto maior a temperatura, maior será o deslocamento da cultura do café em direção ao sul do país. Essas mesmas observações são válidas para a cultura de citrus. Considerando os resultados do primeiro cenário, com aumento de 1,0°C e redução das áreas cultivadas com café nos Estados de Minas Gerais, Paraná e São Paulo, o impacto econômico previsto é estimado em US\$ 375 milhões por ano, equivalente à redução de 4 milhões de saca de café/ano.

Tabela 2: Áreas atuais e futuras de cultivo de grãos no Brasil de acordo com o acréscimo das temperatura previsto pelo IPCC e conseqüente redução das produções.

Cultura	Potencial atual área Km ²	Área após T+1°C Km ²	Área após T+3°C Km ²	Área após T+5,8°C Km ²	Redução da produção	Produção atual e futura
Arroz	4.755.204	4.560.347	3.875.734	2.792.430	41%	13 milhões/tons. 7,7 milhões/tons.
Feijão	5.141.047	4.992.366	4.575.250	3.972.723	23%	2,8 milhões/tons. 2,2 milhões/tons.
Soja	3.419.072	3.093.664	2.085.815	1.238.557	64%	60 milhões/tons. 22 milhões/tons.
Milho	5.169.034	5.079.497	4.808.833	4.421.934	15%	39 milhões/tons. 33 milhões/tons.
Café Arábica	904.971	698.720	381.414	73.915	92%	30 milhões/sacas 2,4 milhões/sacas
População Brasil	165 milhões em 2000	190 milhões em 2020	300 milhões em 2050	400 milhões em 2100		

No caso do milho, há uma possibilidade de redução de produção de 39 para 33 milhões de toneladas, com impacto de US\$ 900 milhões ao ano. Porém, o maior impacto seria na produção da soja, com redução de 38 milhões de toneladas/ano, o que significaria uma perda de cerca de US\$ 8.5 bilhões/ano, aos preços atuais.

As considerações feitas a partir de simulações de riscos climáticos de longo prazo, levam em conta os principais efeitos com possibilidade de mensuração e com reflexos na agricultura, ou seja, aumento da temperatura, com observações mais freqüentes de dias quentes e ondas de calor; aumento na temperatura mínima, e observação de eventos de precipitação mais intensos.

Conclusões

A análise dos cenários foi feita com intenção de identificar a vulnerabilidade multidimensional do sistema agrícola brasileiro e sua fragilidade diante das mudanças climáticas. É fundamental construir a capacidade de adaptação à mudança global do clima utilizando-se “novos princípios”, que basicamente seriam: a adoção do princípio da precaução, evitando-se risco de dano sério e irreversível, mesmo na ausência de completa certeza científica; a adoção do desenvolvimento econômico sustentável, e, no caso brasileiro, adoção do comércio de emissões de carbono como base de discussões comerciais.

Bibliografia consultada:

- ASSAD, E. D. *Chuva nos Cerrados*. Análise e espacialização. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. 424 p.
- ASSAD, E. D. Novas técnicas de zoneamento agrícola no Brasil. In: *I Simpósio internacional de Securidade e Zoneamento Agrícola do Mercosul*. Brasília, 5 e 6 de março de 1998. p. 29-31.

Eduardo Delgado Assad é agrometeorologista, doutor em Hidrologia e Matemática e pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, São Paulo.

assad@cnptia.embrapa.br

Fábio Marin é agrometeorologista, doutor em Agronomia e pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, São Paulo.

marin@cnptia.embrapa.br

Hilton Silveira Pinto é agrometeorologista, doutor em Agronomia e pesquisador do Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura (Cepagri) da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

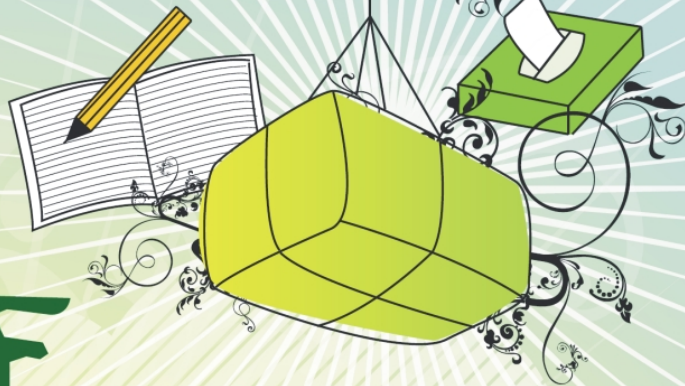
hilton@cpa.unicamp.br

Jurandir Zullo Junior é agrometeorologista, doutor em Engenharia Elétrica e pesquisador do Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura (Cepagri) da Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

jurandir@cpa.unicamp.br

O potencial de absorção de gases de efeito estufa por comunidades agrícolas é grande e, no Brasil, esses sistemas têm escala, como por exemplo, as técnicas de plantio direto, reflorestamentos e a integração pecuária-lavoura. Somente o incentivo à adoção dessas práticas de maneira integrada, permitirá a absorção de 10,55 milhões de toneladas de carbono ao ano e um crescimento da produção agrícola em pelo menos 50%, sem haver necessidade de expansão de área. Essas medidas devem ser incentivadas para minimizar, no curto e médio prazos, o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

Mantido o cenário atual, a adaptabilidade das atuais culturas deve ser perseguida nos seguintes aspectos: tolerância ao calor, para todo o Brasil; tolerância à seca, para as Regiões Sul e Nordeste, e manejo de solos buscando aumentar a capacidade de conservação de água. No caso específico de adaptação aos estresses ambientais, tolerância à seca e ao calor, o país tem ainda uma situação privilegiada, que é sua grande biodiversidade. Certamente na biodiversidade dos Cerrados e da Amazônia é que se encontram os genes necessários que permitirão a adaptação das atuais culturas exóticas às mudanças climáticas, mantendo-se o mesmo nível de produção agrícola.



IMAGINE

UM CADERNO ESCOLAR, UMA CAIXA DE LENÇOS DE PAPEL,

FRALDAS DESCARTÁVEIS E UM CARTÃO DE ANIVERSÁRIO

ESCRITO A MÃO POR VOCÊ



O QUE ELES TÊM EM COMUM ?

A MATÉRIA-PRIMA. **T**ODOS SÃO FEITOS
A PARTIR DA CELULOSE, QUE VEM DE ÁRVORES
PLANTADAS, COMO O EUCALIPTO. **A**LÉM DE
PAPEL, O EUCALIPTO GERA EMPREGOS E
DESENVOLVIMENTO, COM RESPEITO AO
MEIO AMBIENTE E ÀS COMUNIDADES.



ARACRUZ

O BRASIL FAZENDO UM BONITO PAPEL
NO MUNDO INTEIRO.