

C I Ê N C I A A B E R T A

Teias Matemáticas

Frentes na Ciência e na Sociedade

M. PAULA SERRA DE OLIVEIRA

Coordenadora

(Página deixada propositadamente em branco)

MARIA PAULA SERRA DE OLIVEIRA

Coordenadora

TEIAS MATEMÁTICAS

Frentes na Ciência e na Sociedade



gradiva



Imprensa da Universidade de Coimbra

© *Gradiva – Publicações, L.^{da} / Imprensa da Universidade de Coimbra, 2004*
Coordenação editorial: *Maria Paula Serra de Oliveira*

Tradução: *Artur Soares Alves*

Carlota Isabel Leitão Pires Simões

Francisco José Craveiro de Carvalho

João Filipe Cortez Rodrigues Queiró

José Miguel Dordio Martinho de Almeida Urbano

Lia Sandra dos Santos

Mário da Silva Rosa

Paulo Eduardo Aragão Aleixo Neves de Oliveira

Revisão do texto: *Isabel Pedrome*

Capa: *António Barros* [Imprensa da Universidade, Coimbra], com imagem de *E. M. de Melo e Castro*, “Fract 010 explod MC”, Dezembro de 2003

[Fractal original gerado no Fractint com tratamento no Photoshop 7.0]

Infografia: *Estúdios Estimulus* [design]

Paginação: *António Resende e Victor Hugo Fernandes*

Impressão e acabamento: *G.C. – Gráfica de Coimbra, L.^{da}*

Reservados os direitos para Portugal por:

Gradiva – Publicações, L.^{da} e Imprensa da Universidade de Coimbra

Gradiva – Publicações, L.^{da}

Rua Almeida e Sousa, 21, r/c, esq. • 1399-041 Lisboa

Telefs. 21 397 40 67/8 • 21 397 13 57 • 21 395 34 70

Fax 21 395 34 71 • Email: gradiva@ip.pt

URL: <http://www.gradiva.pt>

Imprensa da Universidade de Coimbra

Rua Antero de Quental, 195 • 3000-033 Coimbra

Telefs. 351 239 85 31 10

Fax 351 239 85 31 19 • e-mail: fjrpress@ci.uc.pt

URL: <http://www.imp.uc.pt>

ISBN: 972-662-970-5

1.^a edição: Maio de 2004

Depósito legal n.º 210431/04

OBRA PUBLICADA COM O PATROCÍNIO DE:
CENTRO DE MATEMÁTICA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Portugal

David M. Holland
Instituto Courant de Ciências Matemáticas
Universidade de Nova Iorque, EUA

Ciência global do ambiente e matemática aplicada moderna¹

RESUMO

A ciência global do ambiente é uma actividade interdisciplinar baseada em conhecimentos de física, química, biologia e outras disciplinas. Utiliza a matemática aplicada moderna e as ciências da computação para dispor de linguagem e ferramentas através das quais as teorias científicas se desenvolvem e são confrontadas com as observações obtidas directamente na própria natureza. Este artigo examina alguns dos complexos e delicados equilíbrios responsáveis pelo actual estado climático do ambiente físico do planeta Terra, bem como o papel da matemática aplicada moderna como auxiliar na formulação e resolução adequadas de modelos realistas do sistema Terra. Apresentam-se sucintamente os últimos avanços da ciência global do ambiente, bem como as possíveis direcções de desenvolvimento futuro desta ciência e as crescentes oportunidades de interacção com a área da matemática aplicada moderna. A história da Terra fornece indicações de que ocorrem grandes mudanças nas componentes do sistema climático, nomeadamente na Terra sólida, nos oceanos, nas calotes de

¹ Tradução de José Miguel Urbano, professor do Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra. Revisão de Manuel Maria Godinho, professor do Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra.

gelo, nos mantos de gelo que cobrem alguns mares, na atmosfera e na própria vida. Começando pelo processo de formação do planeta, descrevem-se diversos fenómenos que ocorrem num largo espectro de escalas temporais, desde a lenta deriva dos continentes às rápidas mudanças diárias no estado do tempo. É importante estudar as componentes individuais do sistema climático da Terra, mas é também de enfatizar o facto de existirem interacções complexas entre essas componentes. Estas interacções podem controlar, de modos subtils, o que à primeira vista poderiam parecer fenómenos inexplicáveis — alguns exemplos notáveis são as glaciações, o aquecimento global e o El Niño. A investigação científica destes ou doutros fenómenos correlativos deu origem a algumas das mais complexas equações com derivadas parciais encontradas até hoje, relativamente às quais as técnicas de resolução e as propriedades das soluções ainda não são completamente conhecidas.

1. INTRODUÇÃO

Neste artigo faremos uma revisão pormenorizada das propriedades das cinco «esferas» que fundamentalmente constituem o nosso ambiente global, destacando em simultâneo a relação entre a compreensão dos processos que ocorrem nessas esferas e a aplicação das poderosas ferramentas da matemática aplicada moderna. Começando pelo interior da Terra, e deslocando-nos para o exterior, essas esferas são: a litosfera, a hidrosfera, a criosfera, a atmosfera e a biosfera, cuja composição essencial é, respectivamente, de rocha, água, gelo, ar e matéria viva. Em termos técnicos, a designação *litosfera* corresponde apenas à parte mais externa da Terra sólida, mas neste artigo usá-la-emos também para referir indirectamente os processos que ocorrem a um nível mais profundo.

Ao tratar matematicamente problemas das ciências do ambiente que envolvam estas cinco esferas, parte da sua complexidade deriva do largo espectro de escalas de tempo e de espaço envolvidas. Quanto às escalas temporais, esboça-se na figura 1 um espectro que se estende de dias até éons. Nesta figura indicam-se alguns exemplos em que se associam certos fenómenos a determinadas escalas de tempo. Sendo geralmente verdade que os processos na litosfera ocorrem ao longo de grandes intervalos de tempo, e na atmosfera durante curtos intervalos, tal verdade não é rígida e há muitas excepções a esta classificação simplista dos processos. No entanto, ela permite evidenciar que em qualquer tentativa para construir um modelo matemático que abarque a totalidade do sistema Terra é necessário ter em conta o problema do espectro incrivelmente largo de escalas de tempo em que os processos ocorrem.



Fig. 1 — Esquema do espectro de escalas de tempo tipicamente encontradas em problemas de ciências da Terra

Para além deste aspecto, os processos físicos que ocorrem nas várias esferas interagem uns com os outros, tornando o problema, em certa medida, menos «separável» em termos de escalas de tempo do que seria de supor à primeira vista. Por exemplo, considere-se a circulação do carbono através do sistema Terra, um elemento que está actualmente no centro da polémica em torno do aquecimento causado pelo efeito de estufa. A ciclagem do carbono envolve o seu transporte, relativamente rápido, sob a forma de dióxido de carbono através da atmosfera, influenciando claramente o balanço da radiação infravermelha da Terra, a sua captação pela vida vegetal, tanto nos continentes como nos oceanos, a sua subsequente acumulação em sedimentos nos fundos oceânicos, a sua subducção para o interior do manto por efeito de forças tectónicas, e, finalmente, a sua libertação para a atmosfera através de erupções vulcânicas, repetindo-se este ciclo a partir da atmosfera. Resumindo, o carbono circula através de quase todas as componentes do sistema Terra e em quase todas as escalas de tempo concebíveis.

Apesar do que acaba de se expor, há situações em que a separação por escalas de tempo é de facto bastante apropriada, dependendo, como é óbvio, dos pormenores do problema a tratar. Esta simplificação torna o estudo de alguns problemas em ciências do ambiente passíveis de um tratamento matemático. O exemplo mais conhecido é, provavelmente, o da previsão meteorológica, em que podem ser feitas, com alguma precisão, previsões sobre a evolução da atmosfera em escalas de tempo de alguns dias, ainda que se não considerem as variações no estado das outras esferas que compõem o sistema Terra.

A consideração de escalas espaciais assume a mesma importância que a de escalas temporais. Na figura 2 mostra-se um espectro de escalas que abrange a escala relativamente pequena de uma dada «região», a da superfície dos continentes e do planeta e, por fim, a do volume deste.

Seguem-se exemplos de processos que ocorrem em escalas muito diferentes em cada uma das esferas: o recuo dum glaciador de montanha, que é um fenómeno que pode ocorrer numa escala regional bastante pequena, já que pode ter origem em flutuações climáticas de carácter muito local; por outro lado, a convecção no interior da Terra, que decorre nas maiores escalas do planeta. À semelhança do que acontece na discussão das escalas temporais, é artificial classificar os processos que se desenvolvem em cada esfera associando-lhes uma escala espacial rígida; só é útil no sentido em que permite evidenciar a larga gama de escalas espaciais em que os processos ocorrem.

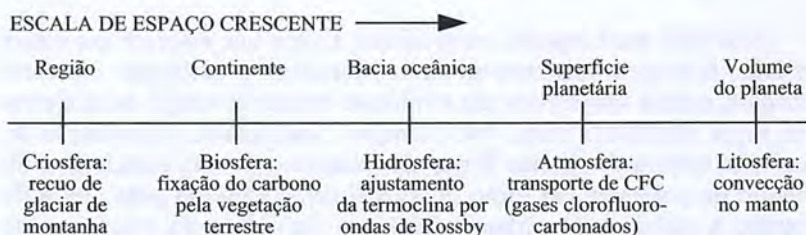


Fig. 2 — Esquema de espectro de escalas de espaço tipicamente encontradas em problemas de ciências da Terra

No que segue discutiremos alguns fenómenos interessantes que ocorrem em cada uma das cinco esferas (secção 2) e posteriormente apresentaremos algumas das ferramentas matemáticas (secção 3) desenvolvidas e aplicadas na resolução deste tipo de problemas. Na secção 4 serão apresentadas algumas conclusões.

2. A TERRA

O sistema Terra pode, num sentido muito lato, ser descrito como uma grande bola de rocha (a litosfera) que possui uma fina camada de água a cobrir parcialmente a sua superfície (a hidrosfera) e uma fina camada de gelo a cobrir, também parcialmente, a sua superfície (a criosfera), estando todas estas esferas envolvidas por ar (a atmosfera). A vida (a biosfera) existe em todas elas; provavelmente merecerá menos atenção a vida que existe em condições extremas — desde as colónias de bactérias que vivem em profundidade a temperaturas relativamente elevadas, até às algas que prosperam sob o manto de gelo de alguns mares. Analisaremos agora com

mais pormenor os processos físicos e biológicos que ocorrem nestas cinco esferas; como motivação de fundo, encaramos estes fenómenos únicos como problemas altamente relevantes do ponto de vista da aplicação das ferramentas da matemática aplicada moderna.

2.1 A litosfera

Tecnicamente, a palavra «litosfera» refere-se à camada externa rígida da Terra, situada acima da astenosfera; é constituída pelas crostas continental e oceânica e pelo manto superior, estendendo-se até uma profundidade que varia entre 100 km e 200 km. Para mais pormenores sobre os processos que ocorrem na Terra sólida e respectiva nomenclatura remetemos o leitor para a excelente monografia de Press e Siever (1978). Tendo em vista o nosso objectivo, salientamos o facto de a Terra abaixo de nós ser constituída essencialmente por rocha sólida, e de esta rocha sofrer transformações complexas em escalas de tempo geológico, as quais provocam alterações de fundo a nível da existência de água, gelo, ar e vida neste planeta. O inverso também é verdadeiro, já que, em certa medida, a água, o gelo, o ar e a vida podem erodir ou alterar as rochas expostas à superfície.

O melhor conhecimento da estrutura da Terra sólida (ver figura 3) revelou a existência de um núcleo metálico interno rodeado por um manto

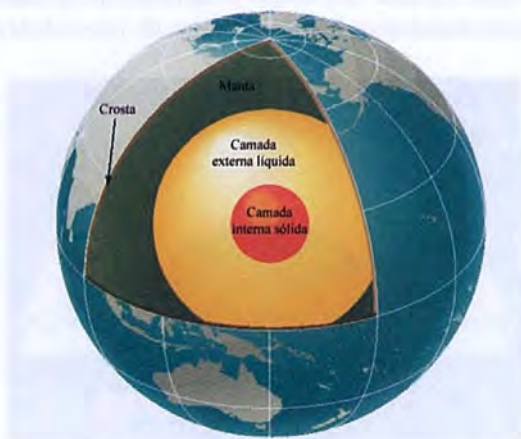


Fig. 3 — Esquema tridimensional, em corte, da Terra sólida (segundo Song e Richards, 1996). Observa-se o núcleo metálico (com uma camada interna sólida e uma externa líquida), o manto e a crosta

de rocha, a que se segue, no exterior, uma crosta, onde residem as bacias oceânicas e as massas continentais. Concluiu-se que os processos que se desenvolvem em cada uma destas três camadas da Terra sólida desempenham um papel fundamental na evolução de todo o sistema Terra. Sem dúvida que a revolução científica que anunciou a introdução e a aceitação da teoria das placas litosféricas oferece o exemplo mais evidente da importância destes processos. O facto de a crosta oceânica estar constantemente a ser consumida e regenerada e, em consequência, de a superfície dos continentes estar a mover-se, tem como resultado directo o afundamento de rochas (que são cristalinas) até uma profundidade de centenas de quilómetros. A figura 4 mostra um exemplo de convecção no manto; a cor vermelha simboliza material quente a subir em direcção à superfície; a azul representa material superficial mais frio a descer para o interior.

A escolha deste exemplo deve-se ao facto de ele representar adequadamente uma ampla classe de problemas do âmbito da ciência do ambiente, na resolução dos quais a metodologia da matemática aplicada moderna pode ser útil. No sentido mais geral, a classe de problemas a que nos referimos é aquela que envolve o movimento convectivo tridimensional de fluidos diversos. No caso específico da convecção no manto, o fluido é tratado como não-newtoniano, sendo, neste caso particular, apropriado considerá-lo com as propriedades reológicas da olivina. Há um tema que, pela sua importância, é comum a quase todas as subdisciplinas da ciência do ambiente: é o estudo dos movimentos convectivos. Nesta matéria, os avanços fundamentais dependem de se fazer uma interpretação matemática, com significado, da viscosidade de um fluido.

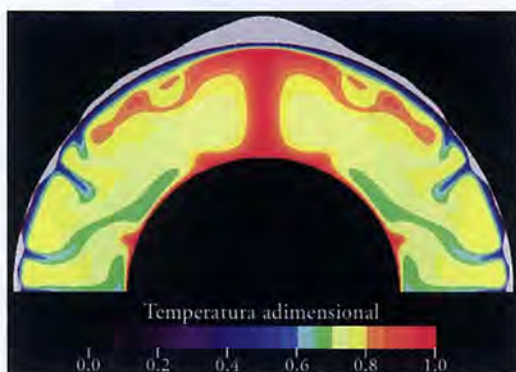


Fig. 4 — Representação parcial (pressuposta simétrica) dum corte no manto sólido, com plumas convectivas ascendentes (vermelho) e descendentes (azul) (segundo Kiefer e Kellog, 1998)

2.2 A hidrosfera

A hidrosfera é composta não só pela água das bacias oceânicas que constituem o oceano mundial, mas também pela dos numerosos lagos e rios e pelos recursos hídricos subterrâneos que existem nos continentes. Para o nosso objectivo, o termo é tomado apenas na acepção de água no estado líquido. O maior volume individual de água é, de longe, o reservatório do oceano mundial, não obstante tratar-se duma mistura salina. À superfície desse reservatório o fluido move-se por influências atmosféricas, quer mecanicamente, devido à força exercida pelo vento, quer termodinamicamente, por efeito directo do calor e da transferência de massa devida a variações de densidade. Ao contrário da convecção no manto, que é provocada por um aquecimento a partir de baixo, a convecção oceânica de grande escala é originada pelo arrefecimento a partir de cima, especialmente em regiões de latitude elevada. Um dos últimos grandes avanços em oceanografia foi a identificação de um padrão convectivo cíclico de escala global, actualmente designado por circulação termo-halina global.

Com base em simulações feitas através de modelos computacionais e em dados de sondagens efectuadas nas calotes geladas, crê-se que o padrão convectivo actual da circulação oceânica global terá sido muito diferente no passado, o que deixa antever que haverá múltiplos equilíbrios neste sistema de origem convectiva. Estamos, pois, em presença dum sistema dinâmico muito rico no sentido matemático.



Fig. 5 — Esquema da circulação termo-halina global (segundo Broecker, 1991). A circulação convectiva é originada em vários locais do Atlântico Norte, onde a água fria e salina da superfície se afunda, em virtude da sua densidade, movimentando-se lentamente para sul em profundidades abissais e entrando no Índico e no Pacífico (percurso a azul); nestes oceanos ascende, aquece, e retorna por níveis superficiais ao Atlântico Norte (percurso a vermelho)

Não obstante serem de salientar as semelhanças entre as esferas que compõem o sistema Terra, são também de referir óbvias e profundas diferenças. Um dos caracteres que marcam a diferença entre as descrições matemáticas da litosfera e as da hidrosfera é a existência de turbulência nesta última. Além disso, essa turbulência existe num ambiente altamente rotacional, que possui a capacidade surpreendente de gerar estruturas coerentes em larga escala a partir de escoamentos aparentemente desorganizados e turbulentos. Esta propriedade de auto-organização é, de facto, confirmada pelas equações utilizadas para descrever os escoamentos oceânicos e atmosféricos, mas o conjunto completo de soluções para o escoamento permanece por explorar devido ao largo espectro de regimes de escoamento que podem ocorrer nos oceanos e na atmosfera.

2.3 A criosfera

O abaixamento da temperatura à superfície do planeta com o aumento da altitude ou da latitude conduz à congelação de grandes reservatórios de água, formando o gelo que constitui a nossa criosfera. São subcomponentes da criosfera as enormes calotes de gelo da Antártida e da Gronelândia; a cobertura de gelo do Ártico e dos mares do Sul, com flutuações sazonais; os glaciares de montanha que fluem por encostas a grande altitude; o *permafrost* que existe em grandes extensões continentais; e o manto de neve, de espessura e extensão variáveis com as estações, que cobre vastas áreas continentais no hemisfério norte.

A importância da criosfera reside não só no seu impacto sobre o balanço global da radiação, em virtude da influência directa que tem no albedo da Terra, como também no facto de condicionar o nível do mar à escala global. A enorme massa de água doce armazenada no continente antártico sob a forma de gelo elevaria o nível global do mar umas dezenas de metros se todo esse gelo fundisse subitamente — um acontecimento potencialmente catastrófico mas improvável.

Tem havido grandes avanços na descrição matemática do manto de gelo que cobre alguns mares e das calotes geladas. Todavia, à semelhança do que acontece com a convecção no manto, a evolução temporal da criosfera está necessariamente dependente da descrição precisa da viscosidade do fluido, neste caso gelo sujeito a uma gama de pressões e temperaturas moderadas. Esta viscosidade é ainda mais difícil de descrever quando se trata dum fluido tão descontínuo como este. O manto de gelo de alguns mares apresenta à superfície fendas mais ou menos extensas; o mesmo acontece com o gelo que constitui a componente terrestre da

criosfera, as calotes geladas. Têm sido realizados vários estudos que consideram o gelo um material granular (ver figura 6), por forma a lidar com a natureza invulgarmente descontínua deste meio fluido (Hopkins, 1996).

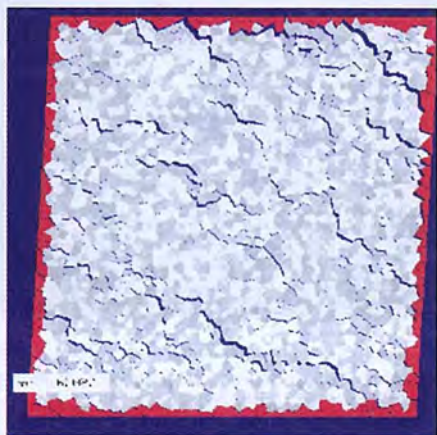


Fig. 6 — Tratamento, como material granular, do gelo de cobertura de um mar. Instantâneo duma simulação computacional em que um bloco de gelo tomado como modelo é sujeito a forças de cisalhamento. As áreas a azul mostram o aparecimento de fracturas de grande escala. Segundo Hopkins (1996)

2.4 A atmosfera

O fino véu de gases que envolve a superfície do nosso planeta e constitui a atmosfera pode considerar-se a componente mais bem estudada do sistema Terra. Isto resulta, em larga medida, do facto de haver uma rede global de observações que forneceu aos investigadores um conjunto relativamente rico de dados, os quais possibilitaram a construção de teorias matemáticas explicativas dos movimentos da atmosfera. Os modelos computacionais actuais, construídos após décadas de investigação cuidada, revelam uma notável capacidade para simular o comportamento real da atmosfera; a capacidade para simular a cobertura de nuvens é disto um claro exemplo (ver figura 7). No entanto, continua a colocar-se o problema do tratamento matemático de fenómenos de escoamento que ocorrem em escalas espaciais e temporais abaixo das admitidas por um modelo computacional, continuando, assim, por resolver a questão do tratamento de fenómenos que ocorrem numa escala abaixo de certo limite.

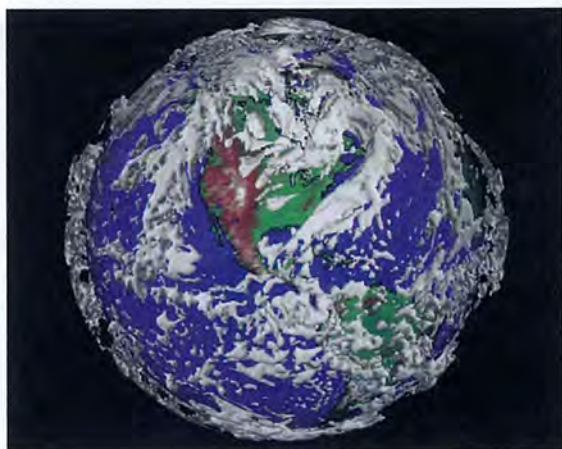


Fig. 7 — Simulação computacional da cobertura de nuvens a partir de um modelo atmosférico de circulação global. Retirada de páginas web do National Center for Atmospheric Research (<http://www.scd.ucar.edu>)

A atmosfera comporta uma grande variedade de instabilidades, que têm sido amplamente analisadas de um ponto de vista matemático relativamente rigoroso. A mais conhecida destas instabilidades é a chamada instabilidade baroclínica, um processo responsável pelas variações na localização das correntes atmosféricas de alta velocidade² que se movimentam sobre os hemisférios norte e sul. Há outras instabilidades ainda não completamente compreendidas, nomeadamente a que respeita ao processo explosivo que conduz à formação de tornados e tufões. A compreensão destes fenómenos numa perspectiva puramente matemática constitui um enorme desafio.

2.5 A biosfera

A biosfera é claramente a esfera mais distinta do sistema Terra, já que a complexidade dos mecanismos que governam o seu funcionamento é muito mais intrincada do que a observada em qualquer das outras esferas, caracterizadas essencialmente por mecanismos físicos. A compreensão da evolução e das flutuações da biosfera requer a compreensão e o

² Em língua inglesa: *jet stream*.

conhecimento profundos dos mecanismos químicos e biológicos, para além do arsenal físico e matemático correntemente usado em ciência do ambiente. A biosfera existe nos oceanos (ver figura 8) e nos continentes, e a sua descrição matemática tem progredido nos últimos anos. No entanto, um modelo matemático completo desta esfera e das suas interações com as outras componentes do sistema Terra está ainda por construir. A capacidade para formular um modelo matemático apropriado da biosfera e para prever a sua evolução continua a ser um desafio central na ciência do sistema Terra.

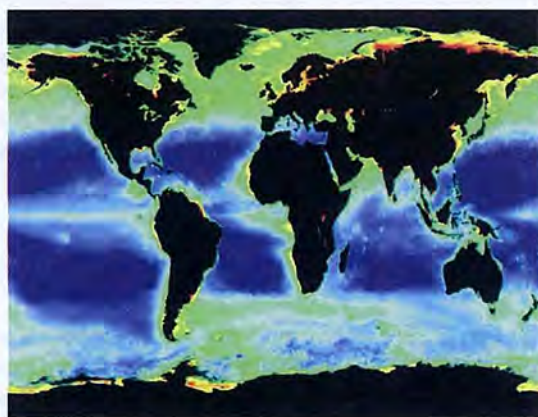


Fig. 8 — Distribuição da concentração de clorofila na biosfera oceânica, baseada em dados obtidos por satélite. As concentrações mais elevadas estão representadas por áreas a vermelho, as mais baixas a azul. Retirada de páginas da web da NASA (<http://earthobservatory.nasa.gov/>)

3. O QUADRO MATEMÁTICO

Uma discussão exaustiva do quadro matemático no qual a ciência do ambiente se desenvolveu ao longo das últimas décadas constitui matéria vasta que está muito para além do âmbito deste artigo. Podemos, contudo, descrever algumas características comuns aos diversos tipos de abordagem que foram bem sucedidos ao trazerem novas ideias e ao ajudarem a compreender o funcionamento do sistema Terra. Pode considerar-se estas características comuns dizem respeito a (i) modelos matemáticos, (ii) técnicas de solução, e (iii) propriedades das soluções. É o que a seguir se discutirá sucintamente.

3.1 Modelos matemáticos

Ao construir modelos matemáticos das várias componentes do sistema Terra, a maioria dos investigadores optou pela formulação dos problemas físicos recorrendo a equações com derivadas parciais (EDP). Esta abordagem resulta naturalmente da descrição das leis de conservação de massa, momento e energia, as quais são bastante semelhantes, não obstante se expressem de forma ligeiramente diferente nas várias subdisciplinas das ciências da Terra, como é o caso das equações da convecção no manto e na atmosfera. Recentemente, as equações diferenciais estocásticas (EDE) tornaram-se uma ferramenta corrente e têm sido aplicadas a problemas em que a acção sobre um sistema é descrita de modo mais preciso como processo aleatório. A título de exemplo, as previsões climáticas de longo prazo podem ser analisadas nesta perspectiva, considerando-se as flutuações de curto prazo no estado do tempo como essencialmente ligadas ao ruído aleatório do sistema.

3.2 Técnicas de solução

O desenvolvimento de técnicas analíticas de que resultem soluções para algumas das principais EDP da ciência do ambiente conheceu recentemente uma espécie de renascimento com os avanços significativos do *software* de álgebra computacional simbólica. Concretamente, estes avanços permitem hoje em dia obter expansões assintóticas e em série de potências de ordem muito mais elevada do que era anteriormente possível.

Nos últimos anos, os métodos de eleição utilizados para obter soluções de EDP na ciência do ambiente têm sido sobretudo os métodos numéricos. O crescimento explosivo das capacidades computacionais colocou os métodos espectrais e os das diferenças finitas e dos elementos finitos em lugar de destaque entre os muitos avanços que recentemente se verificaram na aplicação de técnicas matemáticas à ciência do ambiente. Alguns foram claramente ilustrados na secção 2. Por exemplo, a simulação da cobertura global de nuvens apresentada na figura 7 ilustra bem estes novos avanços.

3.3 Propriedades das soluções

Uma vez formulados os modelos matemáticos apropriados, e desenvolvidas as técnicas de solução adequadas, resta ainda um terceiro e muito importante aspecto do quadro matemático — a compreensão das

propriedades e do comportamento das soluções obtidas. Um exemplo elucidativo foi a descoberta de que mesmo um simples sistema de convecção térmica pode exibir as propriedades do caos. Outro exemplo é o de sistemas turbulentos capazes de se auto-organizarem, criando estruturas coerentes de escoamento em larga escala. Na verdade, é neste terceiro aspecto do quadro matemático que as poderosas ferramentas analíticas da matemática aplicada moderna podem ter um impacto bastante significativo no desenvolvimento de uma profunda compreensão do funcionamento do sistema Terra.

Outra ilustração mais específica deste facto, que não foi abordada na secção 2.1 a propósito dos processos litosféricos, é o fenómeno do campo magnético da Terra (o geodínamo), que resulta de correntes de convecção no núcleo exterior, composto de metal líquido; este caso constitui um problema matematicamente rico, que permanece, em larga medida, sem solução. Apesar de as equações que governam a magneto-hidrodinâmica num ambiente fluido convectivo serem conhecidas, a forma como as soluções poderão exibir oscilações auto-excitadas, compatíveis com a conhecida inversão não periódica do campo magnético da Terra, permanece algo misteriosa. É, sem dúvida, um exemplo, e há muitos outros, de um problema matemático extremamente rico e atractivo, que poderá, provavelmente, ser mais bem compreendido recorrendo explicitamente, por exemplo, às técnicas da teoria dos sistemas dinâmicos.

4. OBSERVAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi apresentada uma visão geral de alguns dos principais avanços registados no campo da ciência do ambiente ao longo das últimas décadas. A ciência do ambiente foi definida de modo a abranger o incrivelmente largo espectro de processos físicos e biológicos, os quais ocorrem numa gama de escalas espaciais e temporais ainda mais larga. Como se referiu na abordagem desses processos, o espectro pode estender-se do lento processo convectivo que ocorre no manto à escala planetária e em intervalos de tempo de éons, ao rápido processo convectivo de pequena escala associado a uma trovoadas de fim de tarde. No entanto, apesar das diferenças de escalas, quer espaciais quer temporais, tais processos, aparentemente díspares, partilham muitos elementos. Será sobretudo através do desenvolvimento de um quadro matemático consistente para o estudo de propriedades mecânicas e termodinâmicas dos diversos fluidos que constituem o nosso planeta que melhor compreenderemos muitos dos processos responsáveis pela evolução do

ambiente global e suas interações. Há um futuro promissor para a aplicação das poderosas técnicas analíticas da matemática aplicada moderna aos problemas mais importantes das ciências da Terra, alguns dos quais foram descritos ao longo deste artigo. Novos avanços nas técnicas numéricas e analíticas, bem como o aperfeiçoamento de técnicas já existentes e bem desenvolvidas, importadas de outras áreas de aplicação irão provavelmente criar o ímpeto para grandes avanços e sucessos nas ciências do ambiente no decurso deste século.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece reconhecido o apoio das bolsas OPP-9901039, OPP-9984966 e OPP-0084286 do Office of Polar Programs of the United States National Science Foundation e da bolsa NAG-5-8475 do Polar Research Program of the National Aeronautical Space Administration.

Referências

- Broecker, W. S. (1991) – The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4, 79-89.
- Kiefer, W., and L. Kellogg (1998) – Geoid Anomalies and Dynamics Topography from time-dependent, Spherical Axisymmetric Mantle Convection. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 106, 237-256.
- Hopkins, M. A. (1996) – On the mesoscale interaction of lead ice and floes. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 101, 18315-18325.
- Press, F., and R. Siever (1978) – Earth. W. H. Freeman and Company, São Francisco.
- Song, X., and P. G. Richards (1996) – Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core. *Nature*, 382, 221-224.

(Página deixada propositadamente em branco)

Instrumentos matemáticos complexos permitiram realizar com sucesso tarefas tão distintas como a programação de um voo a Marte, a previsão de resultados eleitorais, a explicação do funcionamento de alguns mecanismos do sistema nervoso, ou a abordagem crítica de obras de arte e de textos literários. Da ciência à sociedade, dos grandes avanços técnicos à solidez de uma argumentação lógica, a Matemática constrói teias de uma imensa flexibilidade resultante do carácter universal da sua linguagem.

Neste livro, personalidades de diferentes universos dão o seu testemunho sobre a forma como usam as teias matemáticas para tecer a sua própria visão do mundo.

MARIA PAULA SERRA DE OLIVEIRA é professora de Matemática na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

ISBN 972-662-970-5



9 789726 629702



gradiva



Imprensa da Universidade de Coimbra