

Previsão do Tempo e Clima

Avanços Alcançados em Estudos Climáticos

Dois tipos distintos de avanços conceituais foram conseguidos nos últimos 30 meses. O primeiro, de natureza mais teórica, foi a descoberta de múltiplos equilíbrios estáveis do sistema bioma-clima para a América do Sul Tropical, na linha de investigações recentes sobre mudanças abruptas de ecossistemas para estados estáveis contrastantes. Utilizando o modelo de circulação geral da atmosfera do CPTEC, acoplado a um modelo de biomas recentemente desenvolvido no Centro (Oyama and Nobre, 2004b), encontrou-se dois estados de equilíbrio estáveis ao se iniciar a integração numérica do sistema acoplado com duas CI diferentes com respeito à especificação dos biomas (Oyama and Nobre, 2003): quando todos os biomas foram especificados inicialmente como floresta tropical, após 5 iterações do modelo atmosférico com o modelo de biomas, chegou-se à distribuição de biomas global muito semelhante à atual, como seria de se esperar, já que a distribuição atual de biomas é um estado de equilíbrio estável. Por outro lado, quando se iniciou a integração numérica com todos os biomas colocados como deserto, chegou-se a um segundo estado estável de equilíbrio bioma-clima para a América do Sul tropical, com savanas cobrindo a maior parte da Amazônia Oriental e semi-desertos substituindo grande parte da vegetação de caatinga do Nordeste do Brasil. Um teste de sensibilidade foi conduzido (Oyama and Nobre, 2004a) substituindo, no modelo global atmosférico do CPTEC, a vegetação de caatinga por deserto e o resultado mostrou tendência a diminuição das chuvas, o que suporta qualitativamente o resultado encontrado para o segundo estado estável para o Nordeste. Reconstruções paleoclimáticas do último período glacial 21 mil anos antes do presente mostram savanas dominando a Amazônia Oriental, dando algum suporte à possibilidade da existência do segundo estado estável também para a Amazônia. Enfatiza-se que, antes deste achado teórico, somente tinha sido proposto a existência de equilíbrios múltiplos bioma-clima para o deserto do Sahara-Sahel. A continuidade das investigações busca estudar o problema transiente, isto é, quais as condições de forçantes externas que poderiam causar uma mudança “catastrófica” ao segundo estado estável, sejam forçantes estocásticas (e.g., período de secas pronunciadas na região) ou perturbações externas (e.g., aquecimento global ou desmatamento), em interação com a dinâmica interna do sistema, lembrando que uma série de fatores está levando a uma diminuição da resiliência do sistema. Por exemplo, vários cenários de aquecimento global para o final deste século indicam mudanças substanciais do bioma floresta tropical na América do Sul (Nobre et al., 2004), com tendência à “savanização” de porções da Amazônia. Existe considerável interesse teórico em saber se tais mudanças aconteceriam gradual e lentamente ou, alternativamente, poderiam acontecer abruptamente, com possíveis repercussões práticas sobre política de conservação e dos usos dos recursos naturais da Amazônia e do Nordeste.

O segundo avanço é de natureza mais técnica e advém de duas teses de doutorado recentemente defendidas na UFRJ e CPTEC-INPE, ambas orientadas por Carlos Nobre. Numa delas (Dereczynski, 2004), estudou-se os erros sistemáticos do modelo de circulação geral do CPTEC associados a sistemas transientes e que levam à redução da previsibilidade sazonal das chuvas do Nordeste. Entre outros fatores, além da intrínseca imprevisibilidade associada à dinâmica interna representada pelas ondas baroclínicas, observou-se que erros sistemáticos na simulação destes sistemas, propagando-se em direção ao Nordeste, contribuem fortemente para erros de previsão. Um dos resultados da segunda tese de doutorado (Santos, 2004), no qual se compararam duas parametrizações de convecção profunda (Kuo Modificado e Arakawa-Schubert Relaxado) para buscar a redução do conhecido erro sistemático de modelos atmosféricos espectrais

sobre a Amazônia (falta de chuva na Amazônia central e excesso de chuva no Nordeste), mostrou que este erro sistemático não está unicamente relacionado ao esquema de convecção profunda, o que indica a necessidade de uma nova estratégia de modelagem para simular corretamente os padrões de circulação e chuvas tropicais, estratégia esta ainda por desenvolver.

Avanços Alcançados em Previsão do Tempo

O Grupo de Previsão de Tempo e Clima continua a focalizar o trabalho na melhoria da eficiência dos métodos numéricos aplicados nos modelos de simulação e nos aspectos teóricos do escoamento atmosférico. Em particular, vem sendo enfatizados os estudos sobre os efeitos não lineares associados às perturbações do escoamento atmosférico.

Desenvolvimento de um esquema semi-Lagrangeano para modelagem do escoamento global

Esta parte do projeto tem como objetivo prover o Centro de Previsão de Tempo e Clima no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) de um modelo com código computacional eficiente e moderno. A colaboração entre o CPTEC/INPE, IAG/USP, IME/USP e o IMPA está na fase final do projeto de modernização do modelo, com testes de eficiência e destreza do modelo. Este projeto também deu origem a pesquisas em Matemática Aplicada, abaixo descritas.

Este projeto é realizado por pesquisadores, professores, pos-doutorandos, alunos de pós-graduação e engenheiros/cientistas de computação. A equipe associada a este projeto é coordenada pelo Dr. J. Bonatti (CPTEC/INPE) com a coordenação local em cada instituição conduzida por: Dr. Pedro L. da Silva dias no IAG/USP, Dr. Jairo Panetta (CPTEC/INPE), Dr. Saulo Barros no IME/USP Dr. Dan Marchesin, Dr. A. Nachbin e Dra. M. Carmona no IMPA e Prof. B. Costa na UFRJ.

- **Modelos Acoplados**

Um modelo atmosférico de mesoescala foi acoplado com um modelo fotoquímico simplificado para simular os efeitos das emissões urbanas na formação do ozônio. Um conjunto de 20 equações prognósticas fortemente acopladas, altamente não-linear, tiveram que ser eficientemente resolvidas numericamente através de um código FORTRAN90 que pudesse ser usado num esquema operacional de previsão de qualidade do ar em São Paulo. A solução, numérica, com separação de escala levou a um esquema sem-implícito eficiente especificamente desenvolvido para um "cluster" de processadores PC com memória distribuída. Os experimentos numéricos indicam que os efeitos não lineares são responsáveis pelas altas concentrações de ozônio observadas corrente abaixo da cidade onde ocorrem as emissões urbanas mais intensas.

No ultimo ano o mesmo modelo atmosférico de mesoescala usado na simulação dos processos fotoquímicos foi acoplado a um módulo de emissão de gás/partículas para a simulação dos efeitos da queima de biomassa. Mais recentemente esse modelo foi acoplado um modelo de transferência radiativa que permite estudar o efeito termodinâmico de aerossóis produzidos pela queima de biomassa. Mostrou-se que a pluma produzida pela queima de biomassa no arco do desflorestamento da Amazônia tem o efeito de diminuir a precipitação a longa distância das fontes de emissão das queimadas. Um significativo resfriamento também foi modelado. Esse grupo é formado pela seguinte equipe: Dr. Saulo Freitas e Dra. Karla Longo (CPTEC) e Dr. Pedro Leite da

Silva Dias, Dra. Maria Assunção F. da Silva Dias e Dr. Edmilson D. Freitas do IAG/USP. O desenvolvimento dos esquemas numéricos foi baseado em discussões com Dr. Saulo Barros do IME/USP. Os alunos associados a este projeto são: Eder Paulo Vendrasco: “Efeito dos aerossóis associados à queima de biomassa na poluição fotoquímica (bolsa da FAPESP) . Leila. D. Martins: Acoplamento de modelos fotoquímicos e atmosféricos (Bolsa CNPQ) .

Um modelo dinâmico de vegetação foi acoplado com sucesso ao modelo de mesoescala com o módulo de emissão de gás/aerossóis produzidos por queimadas. Foi demonstrado que os efeitos não lineares no acoplamento entre os aerossóis, radiação e vegetação são responsáveis por alterações significativas das propriedades da vegetação e do regime de precipitação durante o período de transição entre a estação seca e chuvosa no sudoeste da Amazônia.

- **Interações Não-Lineares em Modelos Simplificados**

O trabalho sobre ressonância não linear entre ondas tropicais na atmosfera levou a uma possível explicação do pico espectral observado na escala temporal intrasazonal (20-60 dias). Mostrou-se que a interação entre dois tripletos ressonantes acoplados por uma única onda de alta frequência (onda de gravidade inercial que representa o forçamento convectivo, associado à liberação de calor no processo de formação da precipitação) pode levar a uma significativa resposta em baixa frequência (escala intrasazonal) Um método de solução Galerkiniana baseado das autofunções do operador linear foi usado para estudar o fluxo de energia entre os vários tipos de ondas permitidas pelo operador linear associado ao problema.

Uma extensão deste trabalho está em andamento como parte da pesquisa de doutoramento do aluno Carlos F.M. Raupp do IAG/USP, em colaboração com pesquisadores do LNCC. Este trabalho deverá explorar os mecanismos não lineares associados à interação entre modos verticais de um modelo atmosférico mais completo.

A identificação dos efeitos não lineares em modelos atmosféricos complexos foi explorada através de técnicas numéricas. Em particular, foi estudado o efeito combinado da ilha de calor, topografia e aerossóis na região urbana de São Paulo através da integração de um complexo modelo atmosférico de mesoescala, acoplado a um módulo de emissão de partículas urbanas e modelo de transferência radiativa.

- **Otimização de Simuladores Atmosféricos em Computação Paralela**

Esta atividade teve como objetivo final o aumento da eficiência numérica da versão paralela do modelo denominado “Regional Atmospheric Modelling System – RAMS”, amplamente usado no Brasil em centros de pesquisa atmosférica no Brasil. Este trabalho continua sob a coordenação do Dr. Saulo Barros do IME/USP com a colaboração do Dra. Marcos Dimas Gubitoso. Foram identificadas algumas partes do código que requerem significativo esforço de otimização algorítmica e de código. Em particular, os esquemas de interpolação associados ao aninhamento de grades teve que ser modificado. Este esforço foi em grande parte financiado por um projeto financiado pela FINEP, cujo objetivo final era o de produzir um modelo eficiente para os centros regionais de meteorologia no Brasil, como parte de um programa do Ministério de Ciência e Tecnologia no Programa de Tempo e Clima, coordenado pelo CPTEC.

Avanços alcançados em Ondas em Meios Heterogêneos

Na área de Ondas em Meios Heterogêneos são considerados em particular ondas não-lineares. O contexto geral do tema proposto é o estudo de fenômenos não-lineares em sistemas modelados por equações diferenciais parciais, com aplicações sobretudo no âmbito da hidrodinâmica, visando aspectos de Meteorologia e Oceanografia. Este tema também faz parte do apoio do IM-AGIMB à integração com a Física Teórica. Foram obtidos os primeiros resultados matemáticos de interesse em sistemas não-lineares dispersivos (Fouque et al. 2004; Fouque, Garnier e Nachbin 2003, 2004; Muñoz e Nachbin 2004a, 2004b, Nachbin e Solna 2003) e/ou dissipativos (Garnier e Nachbin 2004) com atenção particular em fenômenos envolvendo a refocalização de ondas e a formação de estruturas localizadas estáveis. Um capítulo importante do estudo de ondas não-lineares trata de propagação destas em meios cujas características podem variar, seja no tempo (Alfaro et al. 2004), seja no espaço. A modelagem matemática se faz então através de equações diferenciais parciais com coeficientes dependentes do tempo e do espaço, ou seja, equações não-autônomas. Muitas vezes o interesse principal é estudar os efeitos destas não-homogeneidades sobre a dinâmica das ondas. Podem então ocorrer diversos fenômenos diretamente ligados às não-homogeneidades : ressonâncias, estabilização de soluções, seleção do número de onda, etc.

Eventos Organizados

Workshop on Ensemble Weather Forecasting. Como iniciativa do IM-AGIMB, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo IAG/USP e do Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada foi realizado entre 09-11/fevereiro de 2004, contando com a participação de cerca de 70 pessoas, incluindo 4 convidados estrangeiros.

Este workshop discutiu os três principais procedimentos na Previsão por Conjuntos: (a) o método do vetor singular, (b) o método de determinação dos modos crescentes e (c) o método baseado na determinação das funções ortogonais empíricas. Tópicos especiais sobre a interação não linear em modelos atmosféricos simplificados também serão discutidos assim como alguns temas relacionados com os desafios na visualização dos produtos numéricos.

Um produto final do workshop foi uma série de recomendações ao Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC) para pesquisas envolvendo aspectos matemáticos e visando a operacionalização da previsão por conjunto, e a melhoria da previsão de tempo no Brasil.

Produção Científica 2002-2004

1. Alfaro Vigo, D.G., Fouque, J.P., Garnier, J. e Nachbin, A., Robustness of time reversal for waves in time-dependent random media, aceito em *Stochastic Processes and their Applications*, 2004.
2. Artilles, W. e Nachbin, A., Nonlinear evolution of surface gravity waves over highly variable depth, aceito em *Physical Review Letters*, 2004.
3. Fouque, J.P., Garnier, J., Munoz Grajales, J.C. e Nachbin, A., Time reversing solitary waves, *Physical Review Letters*, 92(9), 094502-1, 2004.
4. Fouque, J.P., Garnier, J. e Nachbin, A., Shock structure due to stochastic forcing and the time reversal of nonlinear waves, aceito em *Physica D*, 2004.

5. Freitas S.R., K.M. Longo, M.A.F.Silva Dias, P.L. Silva Dias, F.S. Recuero, R. Chatfield, E. Prins, P. Artaxo. Monitoring the Transport of Biomass Burning Emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics*, 2004 (in press).
6. Garnier, J. e Nachbin, A., The eddy viscosity for time reversing waves in a dissipative environment, *Physical Review Letters*, 2004.
7. Muñoz Grajales, J.C. e Nachbin, A., Dispersive wave attenuation due to orographic forcing, *SIAM J. Appl. Math.*, 64(3), 977-1001, 2004.
8. Muñoz Grajales, J.C. e Nachbin, A., Stiff microscale forcing and solitary wave refocusing, *SIAM Multiscale Modeling and Simulation Journal*, 2004.
9. Oyama, M. D. e Nobre, C.A., Climatic consequences of a large scale desertification in Northeast Brazil: a GCM simulation study, *Journal of Climate*, 15/Agosto 2004a.
10. Oyama, M. D. e Nobre, C. A., A simple potential vegetation model for coupling with the Simple Biosphere Model (SiB), 2004b. *Revista Brasileira de Meteorologia* (in press).
11. Nobre, C. A., Oyama, M.D., Marengo, J.A., Oliveira, G.O., Salati, E. Impacts of Climate Change Scenarios for 2091-2100 on the Biomes of South America. First Clivar International Conference, Baltimore, 21-25 Junho, 2004 (poster).
12. Nachbin, A. e Solna, K., Apparent diffusion due to orographic microstructure in shallow water, *Phys. Fluids*, 15(1), 66-77, 2003.
13. Oyama, M.D. e Nobre, C.A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. *Geophysical. Res. Letters*, 30 (23), 2199-2203, Dezembro, 2003.
14. Fouque, J.P., Garnier, J. e Nachbin, A., Time reversal for dispersive waves in random media, accepted at *SIAM J. Appl. Math.*, 2003.

Doutores 2002-2004

1. Daniel G. Alfaro Vigo: Time-reversed acoustics in a randomly changing medium, IMPA, 2004. (Orientador Prof. A. Nachbin).
2. Maria Autora dos Santos, Convecção na Amazônia: Variabilidade, efeitos e resposta na circulação de grande escala. INPE, São José dos Campos, 2004. (Orientador Prof. C. Nobre).
3. William Artiles Roqueta: Modelagem de ondas não lineares através do operador Dirichlet-to-Neumann, IMPA, 2004. (Orientador Prof. A. Nachbin).
4. Claudine Dereczynski: Estudo dos Limites de Previsibilidade Climática para o Norte do Nordeste, COPEE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. (Orientador Prof. C. Nobre).
5. José de Arimatéia Fernandes: Grades heterogeneas na solução espectral das equações de águas rasas, IMPA, 2004. (Orientador Prof. D. Marchesin).
6. Milton dos Santos Brait: Métodos Semi-Lagrangeanos precisos para ondas de Rossby com Orografia, IMPA, 2002. (Orientador Prof. D. Marchesin).
7. Paul Krause: Escoamentos Friccionais do Ar, IMPA, 2002. (Orientador Prof. D. Marchesin).
8. Juan Carlos Muñoz Grajales: Dispersive wave attenuation and refocusing due to disordered orographic forcing, IMPA, 2002. (Orientador Prof. A. Nachbin).

9. Marcos Oyama: Conseqüências Climáticas da Mudança de Vegetação do Nordeste Brasileiro: Um Estudo de Modelagem. INPE, São José dos Campos, SP, 2002. (Orientador Prof. C. Nobre).