

SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO SAZONAL DO CLIMA COM UM MODELO ACOPLADO BIOSFERA-ATMOSFERA COM HIDROLOGIA DE SOLO

MARIA ELISA SIQUEIRA SILVA¹, SÉRGIO H. FRANCHITO² e V. BRAHMANANDA RAO²

¹Departamento de Geografia – FFLCH/USP
Av Lineu Prestes, 338 – Cidade Universitária – 05508-900 – São Paulo – SP

²Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE
E-mail: elisasiq@usp.br, fran@cpotec.inpe.br, vbrao@cpotec.inpe.br

Recebido Agosto 2004 - Aceito Junho 2005

RESUMO

Uma parametrização detalhada da hidrologia do solo, baseada no Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme - BATS, é incluída no modelo estatístico-dinâmico MED, que apresenta resolução latitudinal de 10 graus. É investigada a capacidade do MED simular a variação sazonal média zonal climática. Com este propósito, os resultados do modelo são comparados com os dados da reanálise do NCEP/NCAR e com aqueles obtidos pelas simulações realizadas com o modelo de circulação geral do CPTEC, CPTEC/COLA, para o período de 1982 a 1991. Apesar de sua simplicidade, verificou-se, em geral, que o MED é capaz de reproduzir os principais aspectos médios sazonais do comportamento atmosférico e hidrológico. Embora haja concordância geral entre os resultados dos modelos ao se comparar com os dados da reanálise, algumas características do clima são mais bem simuladas pelo MED e outras, pelo modelo CPTEC/COLA. A inclusão da hidrologia de solo ao modelo permite a melhor definição do balanço de energia à superfície. Assim, o MED constitui uma ferramenta útil, complementar aos estudos feitos com MCGs mais complexos.

Palavras-chave: simulação climática, validação de um modelo estatístico-dinâmico, parametrização da hidrologia de solo.

ABSTRACT: SIMULATION OF THE SEASONAL VARIATION OF CLIMATE USING A COUPLED BIOSPHERE-ATMOSPHERE MODEL WITH SOIL HYDROLOGY

In this paper a parameterization of soil hydrology based on the Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme, BATS, is included in a coupled biosphere-atmosphere statistical-dynamical model, SDM. The ability of the SDM to simulate the zonally-averaged seasonal variation of climate is investigated. For this purpose, the model results are compared to the NCEP/NCAR reanalysis data. The SDM results are also compared with the CPTEC general circulation model, CPTEC/COLA, for the period 1982-1991. Despite its simplicity, in general the SDM is capable of reproducing the main mean seasonal aspects of atmospheric and hydrological behavior. Although there is an overall agreement between the results of the two models, in comparison to the reanalysis data some features of climate are better simulated with SDM, whereas others are better simulated with CPTEC/COLA model. Inclusion of soil hydrology allows a better statement of surface energy budget. Thus, the SDM is a useful tool for studies carried out with more complex GCMs.

Keywords: climate simulation, validation of a statistical-dynamical model, parameterization of soil hydrology.

1. INTRODUÇÃO

As variações sazonais da radiação solar, temperatura e chuva determinam o ciclo de vida da cobertura vegetal e esta, por sua vez, modifica as trocas de energia, massa e momento, entre a superfície e a atmosfera, possuindo um papel importante na variação sazonal da hidrologia superficial. A quantidade de umidade na superfície está fortemente associada à hidrologia do solo. A umidade do solo exerce uma influência determinante no balanço local de umidade e energia através de sua influência na evaporação superficial, no albedo do solo e na condutividade térmica. Assim, os processos de superfície estão associados ao clima através de várias interações. No caso de alterações da superfície, as trocas de água, calor e momento são modificadas. Desde o final da década de 60 e início dos anos 70 têm sido realizados estudos com mo-

delos atmosféricos no sentido de se avaliar o impacto climático decorrente das alterações da superfície.

Os Modelos de Circulação Geral (MCGs) acoplados a modelos de biosfera, tais como o Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) (Dickinson et al., 1986), o Simple Biosphere Model (SiB) (Sellers et al., 1986) e o Interaction between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) (Noilhan e Planton, 1989), têm sido utilizados para simular as variações climáticas decorrentes do desmatamento tropical (Dickinson e Henderson-Sellers, 1988; Nobre et al., 1991; Manzi e Planton, 1996; Sud et al., 1996; Lean e Rowntree, 1997). Os modelos de biosfera incluem esquemas para o prognóstico da umidade do solo e contém parametrizações do transporte de calor e umidade no dossel, na superfície e no solo. Assim, vários MCGs têm sido empregados para simular os efeitos de desmatamento no clima regional.

Apesar da utilidade dos MCGs, modelos climáticos mais simples, do tipo mecanístico, como, por exemplo, os Modelos Estático-Dinâmicos (MEDs), também são úteis para a investigação de mecanismos biogeofísicos de retro-alimentação.

Os MEDs, por serem mais simples, focalizam o entendimento de dependência entre um mecanismo particular e outros parâmetros do sistema. Adicionalmente, são computacionalmente mais econômicos do que os MCGs, sendo ainda relativamente mais fácil analisar as simulações e diagnosticar as causas de determinado comportamento atmosférico com um modelo mais simples. Numa série de artigos, Franchito e Rao e seus colaboradores têm mostrado a viabilidade do uso destes modelos em estudos de mudanças climáticas (Franchito e Rao, 1992, 1995; Rao e Franchito, 1991 e 1993; Franchito et al., 1998; Varejão-Silva et al., 1998; Rao et al., 2000; Moraes et al., 2004). Nesta série de trabalhos, o modelo original desenvolvido por Franchito e Rao em 1992 foi continuamente melhorado pela inclusão de processos físicos que permitem uma melhor representação do sistema climático. Em uma das versões mais recentes, Varejão-Silva et al. (1998) (referido aqui como VS) incorporaram um modelo de biosfera baseado no esquema BATS, tal como feito por Zhang (1994), ao MED originalmente desenvolvido por Franchito e Rao (1992). Apesar de modelos de biosfera, tal como o BATS, terem sido desenvolvidos para MCGs, o acoplamento com modelos atmosféricos mais simples é também relevante em estudos de interação entre a vegetação e o clima, o que permite a identificação de mecanismos biogeofísicos responsáveis pela retro-alimentação aliada à simplificação da análise dos resultados.

Apesar do modelo de VS conter um tratamento detalhado da interação biosfera-atmosfera, não possui, como também ocorre nas outras versões do MED, uma parametrização da hidrologia de solo. Como a umidade do solo afeta as condições atmosféricas não só pela influência no albedo do solo, mas também pela influência na evaporação e, portanto, diretamente no balanço de energia à superfície, existe a necessidade de um tratamento adequado dos processos hidrológicos nesta interface. Assim, neste trabalho, realizou-se a inclusão de parametrização detalhada da hidrologia do solo na versão de VS e investigou-se, posteriormente, sua capacidade de simular a variação sazonal do clima. A boa representação do clima sazonal em um modelo é um indicativo de que o mesmo pode ser utilizado em estudos de mudanças climáticas, visto que o ciclo sazonal da atmosfera é o tipo mais simples de mudança climática (Schneider e Dickinson, 1974). Portanto, no presente trabalho serão verificadas as potencialidades e limitações do MED com a hidrologia de solo acoplada. É investigado seu desempenho através de comparações com os dados da reanálise do National Centers for Environmental Predictions/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) (Kanay et al., 1996), bem como com simulações obtidas com o MCG do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), denominado CPTEC/COLA. As principais características do modelo acoplado ao esquema de hidrologia do solo, sua validação, discussões e as conclusões finais estão apresentadas nas seções seguintes.

2. MODELO CLIMÁTICO

2.1. Descrição do MED

O modelo usado neste estudo foi desenvolvido por Franchito e Rao (1992) e inicialmente modificado por VS. É um modelo média zonal representado por equações primitivas, possui duas camadas atmosféricas, usa a coordenada vertical sigma e apresenta resolução latitudinal de 10 graus. Inclui parametrizações para a fricção, para o aquecimento diabático e para os turbilhões de grande escala. As formulações das componentes atmosféricas e o aquecimento diabático são similares às propostas por Saltzman (1968) e Saltzman e Vernekar (1971) e, a parametrização relativa à liberação de calor latente é similar à usada por Gutman et al. (1984).

Os fluxos de energia são calculados separadamente para as frações continental e oceânica, para cada cinturão de latitudes. As parametrizações do modelo de biosfera, baseadas no BATS, são usadas para a fração de terra do cinturão de latitudes. O modelo de biosfera contém quatro domínios: a camada subsuperficial, a camada da folhagem, a camada de ar da folhagem e a camada atmosférica (da superfície ao topo da atmosfera). Envolve parametrizações do balanço de energia à superfície, dos balanços de umidade e energia na camada de ar da folhagem e do balanço de energia na folhagem. Na fração continental, o tipo de vegetação (de acordo com BATS) foi obtido através do arquivo preparado por Manzi e Planton (1994), com resolução espacial original de 1° x 1°. Os parâmetros superficiais, tais como albedo da superfície, coeficiente de arrasto, fração de cobertura vegetal, foram ponderados pela fração de área correspondente ao tipo de cobertura, usando valores específicos adotados no BATS para cada tipo de cobertura.

Para a fração restante do cinturão de latitudes, ou seja, para a superfície coberta por oceano-gelo-neve, são utilizadas parametrizações semelhantes às da fração continental. Neste caso, são considerados três domínios: a camada subsuperficial, a camada de ar adjacente à superfície e a camada atmosférica (da superfície até o topo). O fluxo de energia para todo o cinturão de latitudes é obtido pela média ponderada calculada entre as frações superficial continental e/ou aquelas delimitadas por oceano-gelo-neve. Detalhes adicionais sobre o modelo de biosfera e o acoplamento com o MED encontram-se, respectivamente, em Zhang (1994) e VS.

2.2. Parametrização da hidrologia de solo

O modelo de solo incorporado ao MED baseia-se nas formulações do BATS (versão 1E) (Dickinson et al., 1993). A camada superior do solo, a zona de raízes e a camada total apresentam o mesmo topo e as respectivas profundidades: 0,1 m, 1,0 a 2,0 m (a profundidade da zona de raízes depende do tipo de vegetação) e 3,0 m. As equações prognósticas para o conteúdo de água em cada uma das camadas e o armazenamento de água sobre a folhagem são dadas por:

$$\frac{\partial S_{sw}}{\partial t} = P_r(1 - \sigma_p) - R_s - \Gamma_{wl} - \beta E_{tr} - F_q + D_w$$

$$\partial S_{rw} / \partial t = P_r (1 - \sigma_f) - R_s - \Gamma_{w2} - E_{tr} - F_q + D_w$$

$$\partial S_{tw} / \partial t = P_r (1 - \sigma_f) - R_w - E_{tr} - F_q + D_w$$

$$\partial W_{dew} / \partial t = \sigma_f P_r - E_f + E_{tr}$$

em que P_r é a chuva; E_{tr} , a transpiração; β , a fração de transpiração relativa à camada superior do solo; F_q , a evaporação do solo desnudo; R_s , o escoamento de água superficial; R_w , a soma do escoamento superficial e gravitacional; Γ_{w2} , o fluxo vertical de água das camadas inferiores para as superiores; e D_w , o excesso de água que goteja das folhas. As parametrizações para os termos F_q , R_s , R_w e Γ_{w2} são baseadas no modelo multi-camadas e estão descritas em Dickinson (1984). A quantidade de água que goteja do dossel é adicionada à precipitação do solo, considerando-se a capacidade máxima de água armazenada por cada tipo de vegetação. O armazenamento máximo na vegetação é definido por $0,1 * \sigma_f * L_{ai}$, em que σ_f é a fração de cobertura vegetal e L_{ai} é o índice de área foliar para cada tipo de vegetação.

A textura do solo foi obtida pelo arquivo preparado por Reynolds et al. (1999), com resolução espacial original de 1/8 grau. As características do solo, tais como condutividade hidráulica, porosidade, expoente da curva de retenção (definido em Clapp e Hornberger, 1978) e máxima sucção do solo, são ponderadas de maneira similar às características da vegetação, ou seja, de acordo com a cobertura superficial. A classe de textura do solo varia entre os valores 1 e 12, do solo mais arenoso ao mais argiloso. O esquema de umidade do solo foi incorporado ao cinturão de latitudes definido pelos paralelos de 45° S e 55° N.

A temperatura de subsuperfície (T_{dl}) foi calculada pela formulação dada em Dickinson et al. (1986). Desprezando-se os efeitos de derretimento de neve, a temperatura da subsuperfície foi especificada por:

$$\partial T_{dl} / \partial t = -c_3 (T_{dl} - T_{sg}) / \tau_1,$$

em que c_3 é a taxa de relaxação do subsolo ($= 0,2$) e τ_1 é o período de aquecimento (1 dia).

O balanço de energia na interface solo-atmosfera é dado

$$\text{por } \sum_{i=1}^5 H_{sg} = 0, \text{ em que } H_{sg}(i), i=1,5 \text{ são os saldos dos fluxos de}$$

radiação de onda curta, longa, fluxos de calor sensível, latente e calor para a subsuperfície, respectivamente. As parametrizações para o fluxo de energia, as equações de balanço em cada um dos domínios juntamente com expressões para a razão de mistura à saturação produzem um sistema fechado com sete variáveis desconhecidas (temperatura do solo, da folhagem, do ar da folhagem, umidade do ar da folhagem, do solo à saturação, da folhagem à saturação e do ar da folhagem à saturação) que é resolvido pelo método iterativo Newton-Raphson. Mais detalhes sobre o modelo de solo são encontrados em Dickinson et al. (1993).

2.3. Estratégia de integração

O MED tem uma resolução latitudinal de 10 graus.

As equações diferenciais são resolvidas de acordo com o esquema de diferenças finitas centradas com um intervalo de tempo de integração de 30 minutos. A estratégia para a integração do MED solo-biosfera-atmosfera acoplado é similar ao utilizado por VS. Primeiramente, o MED é integrado sem a consideração das parametrizações de solo-biosfera, usando-se como condição inicial uma atmosfera isotérmica (270 K), em repouso. O MED é então integrado por um período de seis meses, forçado por médias mensais relativas ao mês de dezembro até que sejam obtidas soluções estacionárias. Até este ponto da integração, os fluxos de energia são calculados considerando-se características homogêneas para todo o cinturão de latitudes. Num segundo passo, o MED é integrado por mais seis meses considerando-se os efeitos da biosfera. Os valores da temperatura em 500 hPa e da velocidade do vento em 750 hPa são necessários para se integrar o modelo acoplado. Assim, a simulação da média mensal zonal para dezembro obtida anteriormente é usada como condição inicial no modelo acoplado biosfera-atmosfera, neste segundo passo. Os fluxos de energia são então obtidos tanto para a fração de terra como para a porção de oceano-gelo-neve. Neste estágio, as soluções do modelo referem-se à média mensal de dezembro, porém já se consideram os processos de retro-alimentação entre a biosfera e a atmosfera. A simulação média zonal para o mês de dezembro é usada como condição inicial para o modelo MED acoplado ao esquema de umidade do solo. O valor inicial de umidade para cada camada de solo varia entre 60 e 75 % da umidade máxima que cada camada suporta, sendo específico para cada faixa latitudinal. O modelo é então integrado por sete anos até alcançar o equilíbrio, uma vez que o valor inicial de umidade do solo não está ainda ajustado à climatologia do modelo. Neste estágio são incluídos os ciclos sazonal e diurno da radiação solar. A ausência de tendência interanual indica o momento em que o modelo atinge o equilíbrio. Os resultados apresentados neste trabalho referem-se ao último ano de integração, após o modelo ter alcançado o equilíbrio. O modelo acoplado às parametrizações da hidrologia de solo foi integrado para a faixa latitudinal entre 45° S e 45° N, uma vez que os processos associados à cobertura de gelo e neve não foram parametrizados.

A validação do modelo é feita pela comparação entre os dados simulados pelo MED, as simulações feitas com o CPTEC/COLA e o conjunto de dados da reanálise. O conjunto de dados da reanálise foi considerado, neste texto, como referência às simulações geradas pelo MED e pelo CPTEC/COLA, somente para facilitar a compreensão da análise (como é adotado na análise dos resultados e discussão). A reanálise não constitui a verdade absoluta sobre o escoamento atmosférico, mas sim, seu comportamento aproximado. Portanto, qualquer validação deve ser realizada com atenção, considerando-se as diferenças regionais de previsibilidade, de acordo como o modelo utilizado na geração desses dados. Apesar dos dados da reanálise e das saídas do modelo CPTEC/COLA apresentarem três dimensões e resolução da ordem de poucas dezenas de quilômetros (o que difere bastante das características do modelo média zonal utilizado), considerou-se este conjunto uma base de dados útil para comparação, uma vez que além de representar a

própria escala, deve bem representar escalas maiores (associadas a resoluções menores, eventualmente), pelo cálculo de médias (no caso deste trabalho, média zonal e temporal).

O MED, com as especificações adotadas neste experimento e considerando-se o intervalo de um ano, pode ser executado em aproximadamente dez minutos em um microcomputador pessoal equipado com um processador com frequência de 2,0 GHz e memória RAM de 256 MBy. Trata-se, portanto, de uma ferramenta barata e de uso relativamente fácil pela comunidade científica.

3. VALIDAÇÃO CLIMÁTICA SAZONAL

Os resultados apresentados a seguir referem-se à média sazonal das variáveis simuladas pelo MED e das obtidas com os dados da reanálise do NCEP/NCAR. O conjunto de dados da reanálise representa uma aproximação ao comportamento atmosférico pois é resultado de simulações feitas com modelo atmosférico que, obviamente, não é exato. Os modelos atmosféricos apresentam diferentes índices de previsibilidade para diferentes regiões do globo, o que pode ser resultado tanto das características intrínsecas dos modelos quanto do caráter natural não-linear da atmosfera, permitindo a existência de regiões com alta e baixa previsibilidade. Adicionalmente à variação espacial de previsibilidade do modelo, o processo de assimilação dos dados observados constitui outro fator que gera discrepâncias no resultado final da reanálise. Contudo, estes dados constituem uma boa base, viável de ser utilizada para a validação de simulações, por dois motivos principais: são dispostos globalmente, para todos os pontos de grade, o que é especialmente importante para regiões onde há falta de informações e; por terem sido gerados por uma mesma versão do modelo atmosférico, eliminando, assim, a variabilidade climática oriunda das sucessivas melhorias incluídas no modelo (Kalnay et al. 1996). Portanto, a validação de resultados de simulação com os dados da reanálise é factível, mas deve ser feita com cautela, considerando-se as diferenças regionais de previsibilidade. Neste estudo, os dados da reanálise representam a média climatológica para o período de 1950 a 2000.

Além da validação feita com os dados da reanálise, os resultados foram comparados com as simulações obtidas pelo modelo CPTEC/COLA, com os dados da “rodada longa” (produto da simulação feita com CPTEC/COLA para o período de 1982 a 1991, com nove membros, de acordo com Cavalcanti et al., 2002). A média sazonal climatológica simulada pelo MED foi obtida após a execução do modelo por sete anos, tal como descrito anteriormente, e os resultados apresentados referem-se ao último ano de integração. Algumas figuras apresentam apenas a comparação dos resultados simulados pelo MED comparados ou aos dados do NCEP/NCAR ou aos dados do CPTEC/COLA, conforme a disponibilidade de dados em cada um dos conjuntos. Em todos os casos, as figuras apresentam legendas que indicam a fonte dos dados mostrados. Como o modelo de biosfera é aplicado para a faixa latitudinal delimitada pelos paralelos de 45° S e de 45° N, de acordo com o utilizado em VS, algumas figuras são apresentadas somente para esta faixa.

Apesar do enfoque deste trabalho ser a validação do MED na escala sazonal, Silva (2002) verificou que a média anual

climática simulada pelo MED, usando estas mesmas especificações, representa bem as variáveis dinâmicas e termodinâmicas do modelo. Silva (2002) notou que a maioria das variáveis apresenta um comportamento médio anual menos intenso do que aquele apresentado pelos dados da reanálise do NCEP/NCAR, o que certamente deve estar associado às simplificações das parametrizações usadas no modelo, bem como ao fato do MED ser um modelo média zonal com baixa resolução espacial, o que contribui para a suavização dos resultados. A análise da avaliação sazonal foi subdividida em dois períodos: um que compreende os meses de abril a setembro e outro, os meses de outubro a março.

O comportamento médio sazonal para os períodos médios de abril a setembro e de outubro a março para o saldo de radiação à superfície, para a componente zonal vento em 250 hPa e para a velocidade vertical em 500 hPa é mostrado na figura 1. Há uma boa concordância entre os resultados simulados pelo MED e pelo CPTEC/COLA entre 15° e 45°, no hemisfério de inverno e, nas regiões próximas aos pólos no hemisfério de verão, tal como visto nas figuras 1a e 1b. É evidente a oscilação sazonal presente no saldo de radiação à superfície. Nas outras latitudes, em ambos os períodos, os valores simulados pelo MED são menores do que os simulados pelo CPTEC/COLA. Para o período de abril a setembro, a simulação realizada pelo MED mostra um valor máximo de aproximadamente 140 Wm⁻² na região tropical do hemisfério norte (HN) e, valores mínimos na região polar do hemisfério sul (HS), indicando uma perda radiativa superior a 50 Wm⁻². O saldo de radiação no HS, durante o período de outubro a março, é um pouco mais elevado do que o valor máximo no HN, o que concorda com os resultados do modelo CPTEC/COLA, alcançando máximos de 150 Wm⁻² nas regiões tropicais.

A componente zonal do vento em 250 hPa simulada pelo MED mostra bem a variação sazonal de sua intensidade entre os períodos de abril a setembro e de outubro a março (figuras 1c e 1d), decorrente do aquecimento diferencial observado nestas duas estações do ano. Comparando-se com os dados da reanálise, nota-se que no período de abril a setembro o MED superestima ligeiramente a intensidade do jato subtropical no HN e o desloca em direção ao pólo. A simulação feita pelo modelo CPTEC/COLA indica uma superestimativa do jato ainda maior, embora sua posição simulada esteja mais de acordo com os dados da reanálise. No HS, ambos os modelos simulam bem a posição do jato, havendo uma subestimativa no caso do MED e uma superestimativa no caso do CPTEC/COLA com relação aos dados da reanálise. As diferenças entre os valores simulados pelo MED e pelo CPTEC/COLA, em relação aos dados da reanálise, são comparáveis. No período de outubro a março, as posições dos jatos subtropicais são simuladas corretamente. No período de abril a setembro, o MED subestima a magnitude dos jatos subtropicais e o CPTEC/COLA os superestima. Os dois modelos simulam bem a posição do valor máximo dos ventos de leste na região equatorial em ambos os períodos, embora superestimem sua intensidade (a superestimativa é maior no caso do MED). No hemisfério de inverno, há uma boa concordância dos valores da componente zonal do vento em 250 hPa simulados pelo MED com os dados da reanálise e, com os valores simulados pelo CPTEC/COLA na

região subtropical. No hemisfério de verão, o MED subestima os valores em relação aos dados do NCEP/NCAR.

A velocidade vertical em 500 hPa simulada pelo MED (figuras 1e e 1f) evidencia o deslocamento sazonal da célula de Hadley, mostrando uma intensificação do movimento ascendente (descendente), com máximo em torno de 5 graus (25 graus) de latitude no hemisfério de verão (inverno). A concordância entre os valores simulados pelo MED para a velocidade vertical em 500 hPa e os dados da reanálise é maior durante o período de abril a setembro, sendo que a intensidade simulada é similar tanto aos dados da reanálise quanto aos resultados do CPTEC/COLA. Durante o período de outubro a março, o MED superestima o movimento vertical nos dois hemisférios, apesar de indicar bem a posição dos valores máximos e mínimos.

A temperatura em 500 hPa e as temperaturas de superfície e da folhagem apresentam, de forma geral, uma variação sazonal imposta pela variação da radiação solar incidente na atmosfera e superfície terrestres (figura 2). No MED, as temperaturas da superfície e da folhagem são calculadas considerando-se a superfície com capacidade térmica desprezível e, desta forma, estão diretamente associadas ao balanço de energia na superfície. Sazonalmente, a mesma análise feita para o comportamento do saldo de radiação na superfície pode ser aplicada ao comportamento das temperaturas de superfície e da folhagem, ou seja, apresentam valores médios maiores no hemisfério de verão e menores no hemisfério de inverno. Os valores simulados para temperatura em 500 hPa estão em boa concordância com os dados do NCEP/NCAR e também com os resultados do modelo CPTEC/COLA. A temperatura da superfície também apresenta boa concordância com as simulações do NCEP/NCAR e do CPTEC/COLA, embora sejam notadas maiores diferenças nas latitudes polares, superestimando os valores no HS e subestimando-os no HN. Com relação à temperatura da folhagem (figuras 2e e 2f), nota-se uma boa concordância dos valores simulados pelo MED àqueles simulados pelo CPTEC/COLA, principalmente no hemisfério de inverno. (O conjunto de dados da reanálise utilizados não continha valores para a temperatura da folhagem.)

A precipitação simulada pelo MED concorda, de forma geral, com os dados da reanálise do NCEP/NCAR e com as simulações feitas pelo CPTEC/COLA, apresentando um máximo principal na região equatorial e dois máximos secundários em latitudes médias (figuras 2g e 2h). Durante o período de outubro a março (figura 2h), a intensidade do máximo principal na região equatorial é bem simulada pelo MED, contudo sua posição está deslocada para a região tropical do HS, contrastando com os dados da reanálise. Este máximo simulado pelo MED está associado à superestimativa da velocidade vertical observada na figura 1f. Os máximos secundários são bem simulados, tanto em magnitude como em localização nesta época do ano. O deslocamento na posição do máximo equatorial também é evidenciado pelo modelo do CPTEC/COLA, sendo que sua intensidade é bastante superestimada em relação ao simulado pelo MED e em relação aos dados da reanálise.

Em geral, os resultados do MED, para o período de

outubro a março, apresentam maior concordância com os dados da reanálise se comparados com os valores simulados pelo CPTEC/COLA, exceto nas latitudes altas e polares do HN. Para o período de abril a setembro (figura 2g), o MED simula bem a posição do máximo equatorial de precipitação, embora o subestime ligeiramente. Apesar do modelo CPTEC/COLA também simular corretamente a posição do máximo principal equatorial, superestima bastante sua intensidade. Neste período, a simulação do máximo secundário do HS feita pelo MED concorda tanto em intensidade como em posição com os dados da reanálise e os resultados do CPTEC/COLA. Por outro lado, os mínimos, próximos a 30 graus nos dois hemisférios, são superestimados em relação aos dados do NCEP/NCAR. Nas latitudes altas, além de 60 graus, os valores são subestimados. Os valores de precipitação simulados pelo CPTEC/COLA entre 30 graus e os pólos estão em boa concordância com os dados da reanálise.

As simulações referentes ao conteúdo de água no solo e ao escoamento total de água estão mostradas na figura 3. A média sazonal dos valores simulados pelo MED para o conteúdo de água na camada superficial do solo (figuras 3a e 3b) e na zona de raízes (figuras 3c e 3d) apresenta comportamento similar àquele indicado pelos dados da reanálise e pelas simulações realizadas com o CPTEC/COLA. Os dados da reanálise e os resultados do CPTEC/COLA mostram uma sazonalidade mais pronunciada do que os valores simulados pelo MED. Pode-se notar que o MED superestima o conteúdo de água no solo principalmente nas regiões subtropicais, o que deve estar associado à superestimativa da precipitação nestas regiões, conforme apresentado pelas figuras 2g e 2h. Os valores mínimos do conteúdo de água no solo nas várias faixas latitudinais encontram-se deslocados para regiões de latitudes mais altas se comparados aos dados da reanálise. O conteúdo de água na zona de raízes, tanto pela simulação com o MED como pelos dados da reanálise, concordam melhor no período de verão, especialmente para o HS. Tal aspecto pode estar associado à melhor simulação da precipitação pelo MED neste período, conforme mostrado na figura 2h.

De forma geral, o escoamento total de água (figuras 3e e 3f) é bem simulado pelo MED. É possível identificar a variação sazonal principalmente na região tropical. O escoamento total é subestimado em relação aos dados da reanálise e às simulações do modelo CPTEC/COLA. As simulações realizadas pelo MED para as regiões temperadas mostram uma subestimativa do escoamento total que pode estar associada também ao desprezo do efeito de mudança de fase da água (gelo e neve), além de estar associada à subestimativa da precipitação. Como no caso da precipitação, as diferenças entre os valores simulados pelo MED e os dados da reanálise são menores do que as diferenças entre os valores simulados pelo MED e aqueles simulados pelo modelo CPTEC/COLA. Em geral, o MED subestima os valores do escoamento total de água e, em contrapartida, o CPTEC/COLA os superestima, em relação aos dados da reanálise. O escoamento total simulado pelo MED entre 5 e 25 graus de latitude, para o hemisfério de inverno, concorda muito bem com os dados da reanálise.

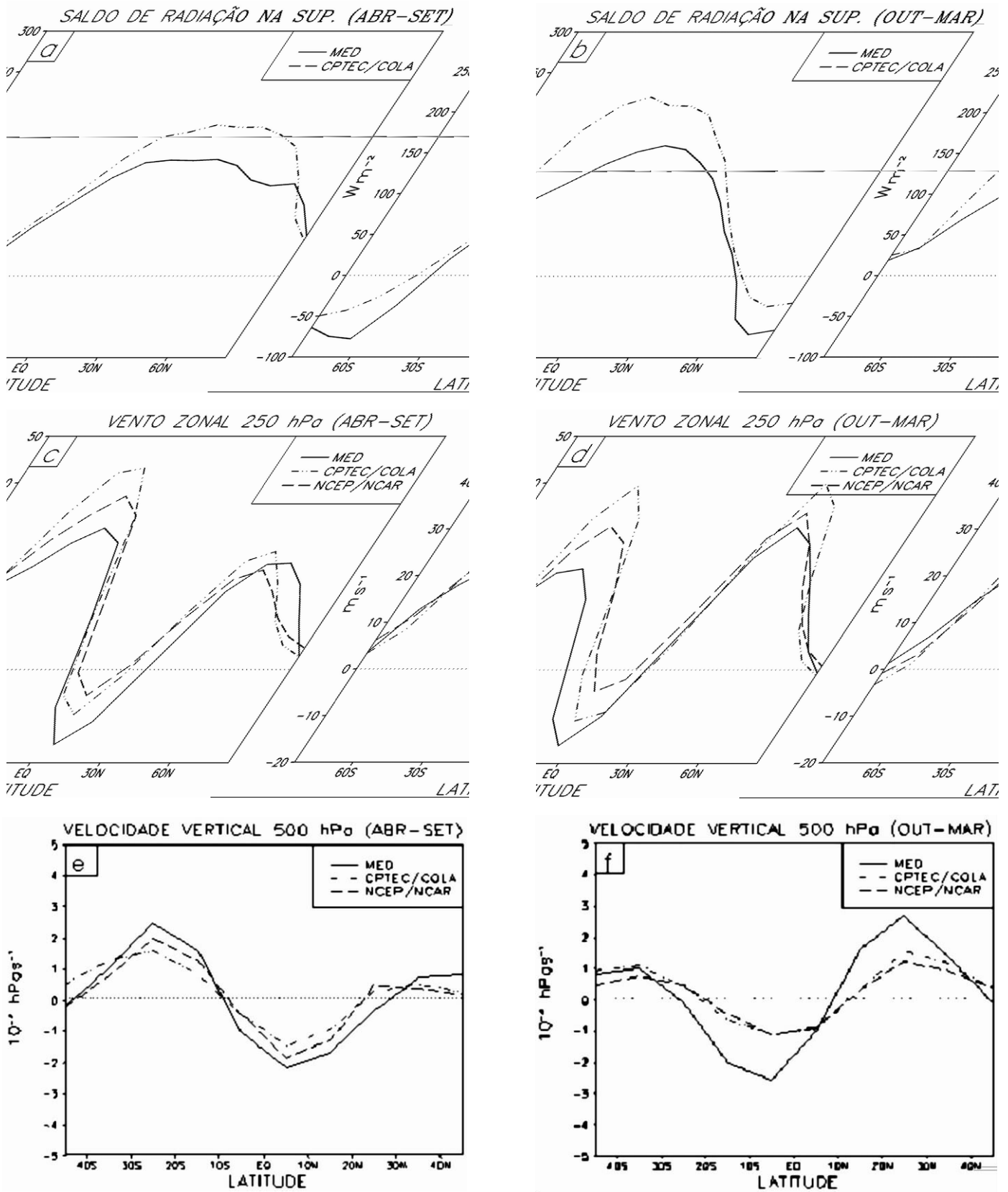


Figura 1: Média sazonal (a) e (b) do saldo de radiação à superfície (Wm^{-2}); (c) e (d) da componente zonal do vento em 250 hPa (ms^{-1}); (e) e (f) da velocidade vertical em 500 hPa ($10^{-4} hPa s^{-1}$). A linha cheia indica os resultados obtidos pelo MED; a linha tracejada, os dados da reanálise e a linha traço-ponto-ponto, os resultados do modelo CPTEC/COLA. Os gráficos do lado esquerdo da figura representam o período de abril a setembro e os do lado direito representam o período de outubro a março.

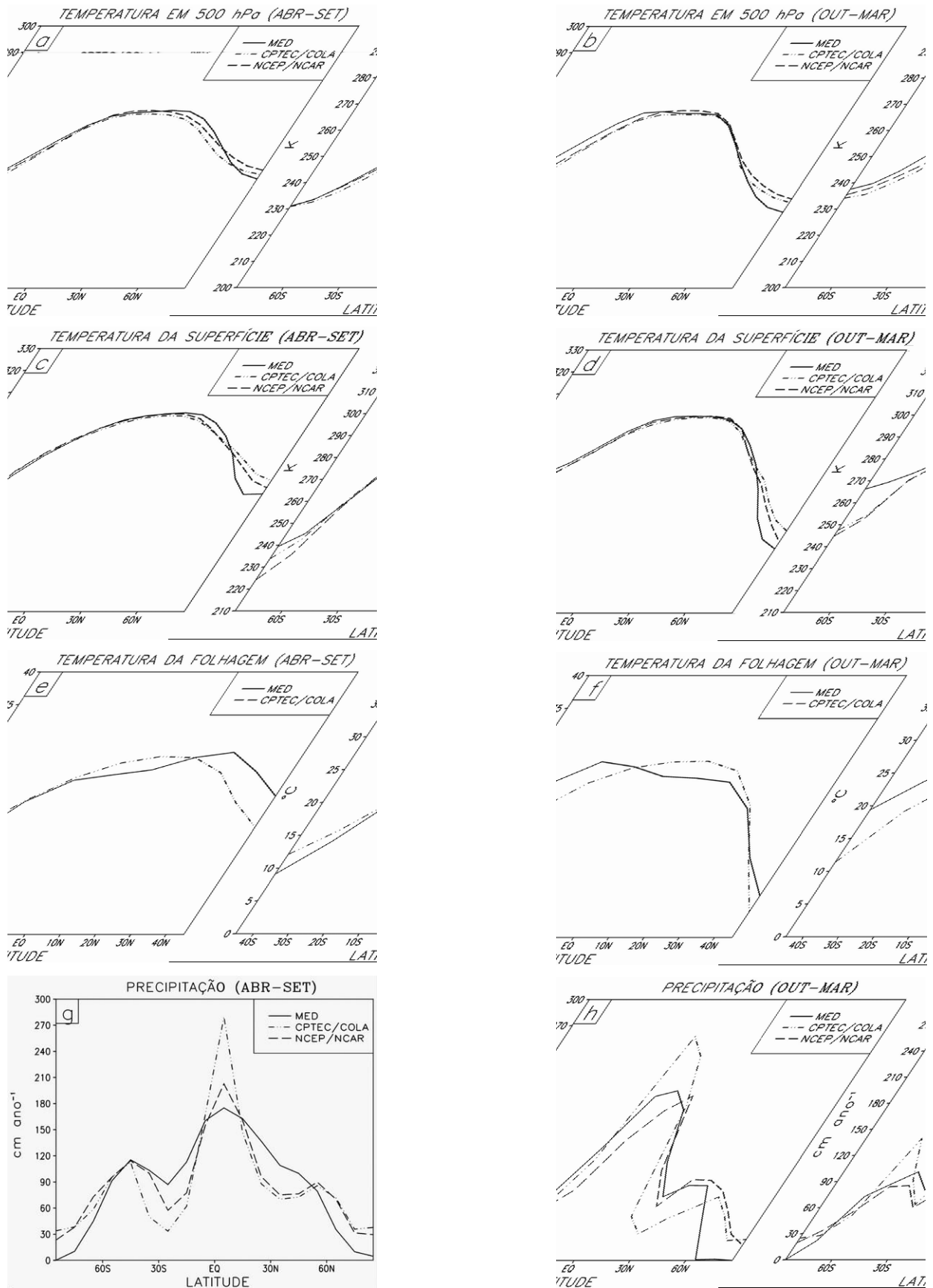


Figura 2: Idem à figura 1, mas para (a) e (b) a temperatura em 500 hPa (K); (c) e (d) a temperatura na superfície (K); (e) e (f) a temperatura da folhagem (°C) e (g) e (h) a precipitação total (cm ano⁻¹).

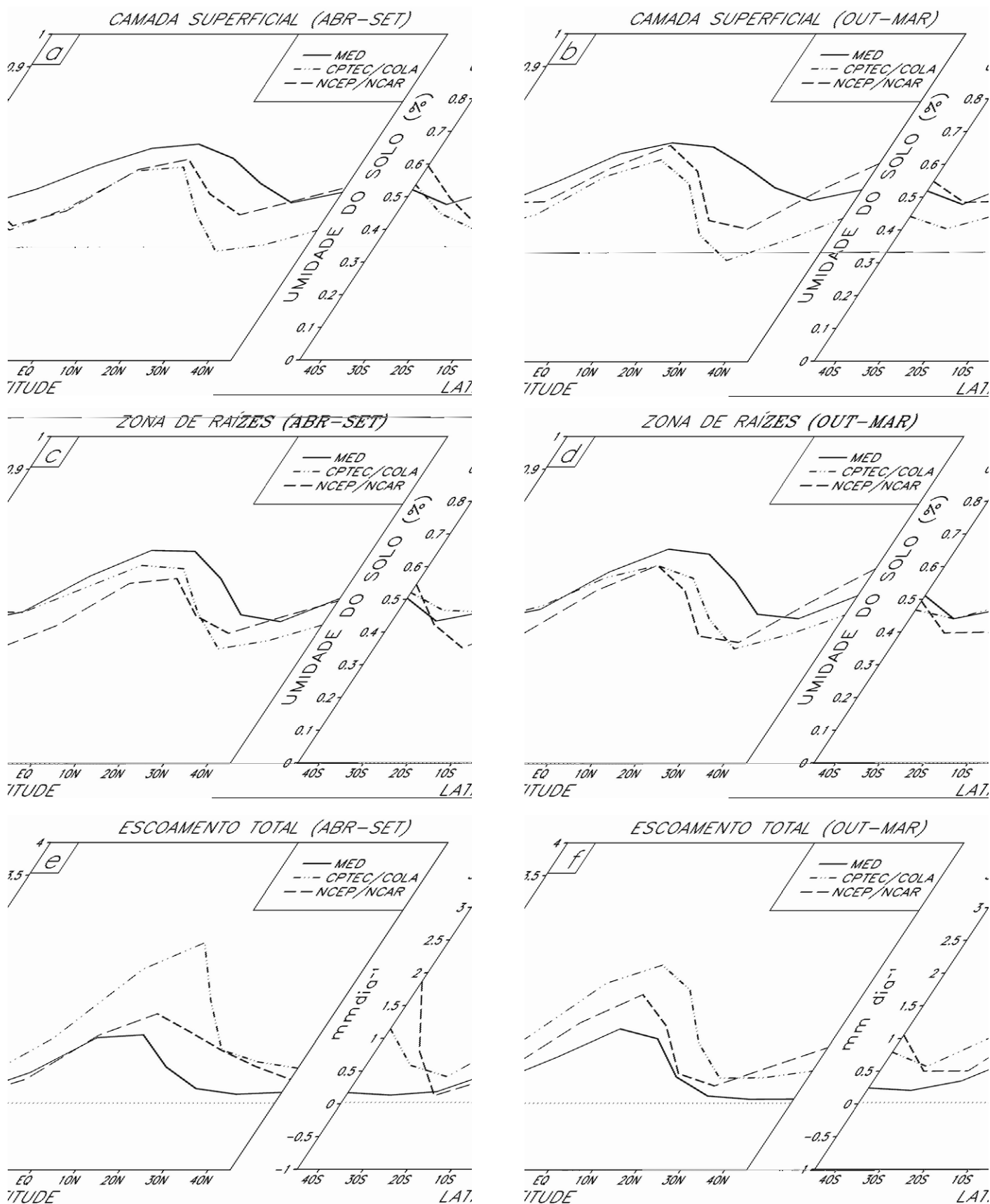


Figura 3: Idem à figura 1, mas para o conteúdo de água no solo e (a) e (b) na camada superior; (c) e (d) na zona de raízes e para (e) e (f) o escoamento total de água no solo (mm dia⁻¹).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho é resultado de uma contínua pesquisa na qual o MED desenvolvido originalmente por Franchito e Rao (1992) tem sido aprimorado com a inclusão de parametrizações físicas que melhor representam o sistema climático. O modelo foi construído para calcular médias zonais e não os aspectos climáticos regionais exatos, entretanto, permite obter isoladamente simulações para as porções continental e oceânica de um mesmo cinturão de latitudes. Neste trabalho, foi introduzida uma parametrização detalhada da hidrologia do solo ao MED. O esquema de umidade do solo baseado no BATS foi incorporado ao MED biosfera-atmosfera para que os mecanismos de retro-alimentação entre a superfície e a atmosfera fossem contemplados de maneira mais realista. Portanto, o presente modelo, adicionalmente ao desenvolvido por Varejão-Silva et al. (1998), é capaz de estimar o conteúdo de água no solo nas três camadas consideradas pelo esquema de superfície, o escoamento superficial, o escoamento gravitacional, assim como o armazenamento de água nas folhas, além dos vários parâmetros incluídos nos cálculos de cada uma destas variáveis. Desta forma, permite especificar a quantidade de água armazenada na camada superficial do solo e sobre a vegetação, o que está diretamente relacionado ao conteúdo de água disponível em superfície para a estimativa da precipitação, pelo cálculo da evapotranspiração. A compactação do solo, por exemplo, caracterizada pela diminuição da condutividade hidráulica na camada superficial do solo, provoca a redistribuição da água disponível para evaporação e, conseqüentemente, para a precipitação. Experimentos realizados por Silva (2002) mostram que a redistribuição do fluxo vertical de água no solo provê alterações no comportamento do escoamento superficial e, portanto, no conteúdo de água do solo. O armazenamento de água na superfície vegetal é outro parâmetro que permite a modificação do conteúdo de água que atinge o solo, o que altera o escoamento superficial e vertical no solo. Assim, a inclusão de parametrizações para a estimativa específica de processos hidrológicos em superfície provê maior precisão na partição de energia na interface biosfera-atmosfera, alterando, em última instância, a precipitação simulada pelo modelo.

De forma geral, a maior resolução espacial dos modelos permite a consideração de processos dinâmicos e termodinâmicos relacionados a fenômenos pertencentes a escalas menores, contemplando a interação entre diferentes escalas e, sendo assim, uma representação mais fidedigna da realidade. Apesar das restrições impostas ao esquema de superfície, da falta de tratamento explícito da convecção, da baixa resolução espacial (10 graus de latitude) e da ausência de tratamento detalhado da camada limite planetária, verificou-se que a inclusão da parametrização da hidrologia do solo ao MED permitiu a reprodução dos principais aspectos médios sazonais dos comportamentos atmosférico e hidrológico médios zonais. Embora haja uma concordância geral entre os resultados obtidos com as fontes de dados avaliadas, algumas características do clima são mais bem simuladas com o MED e outras o são com o modelo CPTEC/COLA, em comparação com os dados da

reanálise. Assim, conclui-se que os MEDs constituem uma ferramenta útil complementar aos MCGs, podendo ser utilizados para elaboração de experimentos de sensibilidade em relação às mudanças climáticas, tal como realizado por Silva (2002) e Varejão-Silva et al. (1998); bem como experimentos mecânicos para a verificação de parametrizações mais adequadas à representação dos processos físicos do sistema climático.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Humberto Ribeiro da Rocha (IAG/USP) pelas discussões acerca do tema. Os agradecimentos são extensivos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido para a realização da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALCANTI, I.F.A.; MARENGO, J.; SATYAMURTY P.: Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. *J. Climate*, v. 15, n. 21, p. 2965-2988, 2002.

CLAPP, R.B.; HORNBERGER, G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, n. 14, p. 601-604, 1978.

DICKINSON, R.E.: Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models. In *Climate Process and Climate Sensitivity*. J. E. Hansen and T. Takahashi, eds., American Geophysical Union, Washington, DC, p. 58-72, 1984.

DICKINSON, R.E., A. HENDERSON-SELLERS, P.J. KENNEDY; M.F. WILSON: Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note 275+STR, 1986.

DICKINSON, R.E.; A. HENDERSON-SELLERS: Modeling tropical deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 114, n. 48, p. 439-462, 1988.

DICKINSON, R.E.; A. HENDERSON-SELLERS; P.J. KENNEDY; M.F. WILSON: Biosphere-Atmosphere-Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN 387+STR, 72 p., 1993.

FRANCHITO S.H.; V.B. RAO: Climatic change due to land surface alterations. *Clim. Change*, 22, p. 1-34, 1992.

FRANCHITO, S.H.; V.B. RAO: On the simulation of sea surface temperature with a zonally averaged model. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 3, p. 35-53, 1995.

FRANCHITO, S.H.; V.B. Rao; R.R. Silva: A parameterization of radiative fluxes suitable for use in a statistical-dynamical model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 69, p. 23-38, 1998.

- GUTMAN, G.; G. OHRING; J.H. JOSEPH: Interaction between the geobotanic state and climate: a suggested approach and a test with a zonal model. *J. Atmos. Sci.*, 41, p. 2663-2678, 1984.
- KALNAY E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; et al.: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 77, n. 3, p. 437-471, Mar. 1996.
- LEAN, J.; P.R. ROWNTREE: Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics. *J. Climate*, v. 10, n. 6, p. 1216-1235, 1997.
- MANZI A.O.; PLANTON, S. Implementation of the ISBA scheme for land surface processes in a GCM - an annual cycle experiment. *J. Hydrology*, n. 155, p. 353-387, 1994.
- MANZI, A.O.; S. PLANTON: A simulation of Amazonian deforestation using a GCM calibrated with ABRACOS and ARME data. In: *Amazonian Deforestation and Climate*. Gash. J. H. C., C. A. Nobre J. M. Roberts e R. L. Victoria, Eds. John Wiley & Sons Ltd: p. 505-529, 1996.
- MORAES, E.C.; S. H. FRANCHITO; V. B. RAO: Effects of biomass burning in Amazonia on climate: a numerical experiment with a statistical-dynamical model. *Journal of Geophysical Research*, 109, D05109, doi: 10.1029/2003JD003800, 2004.
- NOBRE, C.A; P.J. SELLERS; J. SHUKLA: Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Climate*, 4, p. 957-987, 1991.
- NOILHAN, J.; S. PLANTON: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, p. 536-549, 1989.
- RAO, V.B.; S.H. FRANCHITO: Studies of climatic change with zonally-averaged models. *Fisica de la Tierra*, 3, p. 375-398, 1991.
- RAO, V.B.; S.H. FRANCHITO: Response of a simple model to the sea surface anomalies. *Annales Geophys.*, 11, p. 846-856, 1993.
- RAO, V.B.; J.P.R. FERNANDEZ; S.H. FRANCHITO: Monsoon-like circulations in a zonally-averaged numerical model with topography. *Mon. Wea. Review.*, 128, p. 779-794, 2000.
- REYNOLDS, C.A., T.J. JACKSON; W.J. RAWLS: Estimating Available Water Content by Linking the FAO Soil Map of the World with Global Soil Profile Databases and Pedo-transfer Functions. *Proceedings of the AGU 1999 Spring Conference*, Boston, MA. May 31-June 4, 1999.
- SALTZMAN, B.: Steady-state solutions for the axially-symmetric variables. *Pure Appl. Geophys.*, 69, p. 237-259, 1968.
- SALTZMAN, B.; A.D. VERNEKAR: An equilibrium solution for the axially-symmetric components of the Earth's macroclimate. *J. Geophys. Res.*, 76, p. 1498-1524, 1971.
- SELLERS, P.J.; Y. MINTZ, Y.C. SUD; A. DALCHER: A simple biosphere (SiB) model for use in general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 43, p. 505-531, 1986.
- SCHNEIDER, S.H.; R.E. DICKINSON: Climate modeling. *Rev. Geophys. Space Phys.*, v. 12, p. 447-492, 1974.
- SILVA, M. E. S.: Impacto climático do desmatamento na região Amazônica, incluindo a hidrologia de superfície a um modelo estatístico-dinâmico. Tese de doutoramento, INPE, São José dos Campos, SP, 2002.
- SUD, Y. C.; R. YANG; G.K. WALKER: Impact of in situ deforestation in Amazonia on the regional climate: general circulation model simulation study. *J. Geophys. Res.*, v. 101, n. D3, p. 7095-7109, 1996.
- VAREJÃO-SILVA, M.A.; S.H. FRANCHITO; V.B. RAO: A coupled biosphere-atmosphere climate model suitable for use in climatic studies due to land surface alterations. *J. Climate*, v. 11, n. 7, p. 1749-1767, 1998.
- ZHANG, T.: Sensitivity properties of a biosphere model based on BATS and a statistical-dynamical climate model. *J. Climate*, v. 7, p. 891-913, 1994.