



Impacto da Duplicação de CO₂ no Clima Global Simulado por um Modelo de Circulação Geral da Atmosfera

Felipe das Neves Roque da Silva & José Ricardo Almeida França

*LAMMA - Laboratório de Modelagem de Processos Marinhos e Atmosféricos
Departamento de Meteorologia da UFRJ, Av. Brigadeiro Trompowsky, S/N,
sala H2-012 - I. do Fundão - CEP: 21949-900 - Rio de Janeiro - Brasil
feliper@acd.ufrj.br, jricardo@ufrj.br*

Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar as mudanças no clima causadas pela duplicação da concentração de CO₂ na atmosfera. Foi utilizado o modelo de circulação geral da atmosfera do LMD (Laboratório de Meteorologia Dinâmica - França), na versão LMD-Z. O modelo foi integrado por um período de cinquenta anos. Para as análises só foram utilizados os últimos quarenta anos com o propósito de dar tempo suficiente para o modelo de atingir o equilíbrio. O modelo utilizou uma grade em resolução variável, com máxima resolução centrada no Rio de Janeiro. Foram feitas duas simulações: a primeira usando o nível atual da concentração de CO₂ (caso controle) e a segunda usando esse nível dobrado (caso de duplicação). Para verificar as mudanças no clima foi feita uma análise dos campos de anomalia gerados pelo modelo. Esses campos são obtidos através da comparação entre o caso de duplicação de CO₂ e a climatologia (caso de duplicação menos caso controle). Foi possível observar alguns efeitos característicos desse tipo de experimento, como um grande aquecimento à superfície nas regiões polares e na alta troposfera nas baixas latitudes, um resfriamento na estratosfera e uma intensificação do ciclo hidrológico.

Palavras-chave: mudanças climáticas, duplicação de CO₂, modelagem atmosférica

Abstract

Impact of CO₂ Doubling in The Global Climate Simulated by a Atmosphere General Circulation Model With Variable Grid

The objective of this work is to evaluate climate changes caused by atmospheric CO₂ concentration duplication. The LMD-Z atmosphere general circulation model (AGCM) was used (Laboratoire de Météorologie Dynamique - France). The model was integrated for a fifty years period and only the last forty years were used for analyses. This experiment have made two simulations: the first using the current CO₂ concentration (control case) and the second using this concentration doubled (duplication case). Both were made with a variable spatial resolution with maximum of it centered in Rio de Janeiro. This way, there is a significant increase of model resolution in this region. To verify climate changes, anomaly fields generated by the model (duplication case minus control) were studied. It was possible to observe some characteristic effects of this type of experiment, such as great temperature increasing at surface in polar regions and in upper levels at low latitudes, cooling in stratosphere and intensification of hydrological cycle.

Keywords: climate changes, CO₂ doubling, atmospheric modeling

1 Introdução

Há uma boa evidência de que a atividade humana tenha resultado num aumento do conteúdo atmosférico de muitos gases de efeito estufa, que são capazes de absorver a radiação de onda longa emitida pela superfície, causando um aquecimento na troposfera. Entre estes gases antropogênicos, o dióxido de carbono é o que possui o maior efeito direto sobre o balanço radiativo entre a superfície e a atmosfera (Bounoua *et al.*, 1999). A concentração do dióxido de carbono atmosférico aumentou de cerca de 280 ppm no período pré-industrial para 365 ppm em 1998 e está crescendo numa taxa de 1,5 ppm/ano (Houghton *et al.*, 2001).

O dióxido de carbono é considerado o maior causador do efeito estufa e tem recebido grande atenção no que diz respeito a mudanças climáticas (Trenberth, 1992). Os níveis de CO₂ têm mudado ao longo da história da Terra e essas mudanças têm sido associadas com variações da temperatura do ar, assim como eras glaciais e com grandes alterações no nível dos oceanos (Houghton *et al.*, 2001). Medições realizadas no gelo da Antártica por Petit *et al.* (1999) mostram que, ao longo de milhares de anos, as variações da concentração de CO₂ foram acompanhadas por variações muito semelhantes de temperatura, o que mostra a dependência desta em relação à concentração de CO₂.

Os impactos climáticos e sociais do aumento da concentração do CO₂ atmosférico têm preocupado a comunidade científica por mais de um século. Inúmeras simulações feitas com modelos de circulação geral (MCG) concordam que a duplicação da concentração de CO₂ resultaria num aquecimento global médio na superfície da Terra entre 1,5 e 4,5 °C (Levis *et al.*, 2000 e Kattenberg *et al.*, 1996). Na maioria das simulações o aquecimento é acompanhado por um ciclo hidrológico global intensificado e também por mudanças profundas no clima regional. Entretanto, Le Treut & McAvaney (2000) constataram que existe uma considerável diferença quantitativa entre resultados de MCG's de vários centros de pesquisa.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC; Houghton *et al.*, 2001) sobre as mudanças climáticas ocorreu um aumento significativo da temperatura média global à superfície desde o início do século 20 (cerca de 0,6°C). Houve também uma redução de cerca de 10 % na extensão da cobertura de neve desde o fim da década de 60 e uma elevação do nível médio do mar entre 10 e 20 centímetros durante o século 20. Em relação às projeções do IPCC para o século 21, a temperatura deve subir entre 1,4 e 5,8 °C e o nível médio dos oceanos deve subir entre 9 e 88 centímetros, ambos no período de 1990 a 2100. Além disso, a cobertura de neve e gelo continuará a diminuir, principalmente no Hemisfério Norte.

Nesse trabalho são apresentados resultados globais de duas simulações (1 X CO₂ e 2 X CO₂) realizadas com o modelo de circulação geral da atmosfera do LMD- \bar{Z} acoplado a um modelo *slab ocean* (mo-

delo oceânico de camada de mistura). Futuramente, pretende-se fazer uma análise mais focada dos impactos da duplicação de CO₂ sobre o Brasil e, principalmente, sobre a região Sudeste. Na seção seguinte é feita uma breve descrição do modelo LMD-Z e também do experimento realizado. A seção 3 mostra e discute as conseqüências globais sobre algumas variáveis meteorológicas devido à duplicação de CO₂. Finalmente, as conclusões e perspectivas desse estudo são apresentadas na seção 4.

2 Modelo e Experimentos

2.1 Descrição do Modelo

A primeira versão do modelo de circulação geral da atmosfera do LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique - França) foi descrita por Sadourny & Laval (1984). O modelo é baseado em diferenças finitas e utiliza a grade tipo C ("staggered") de Arakawa (Arakawa & Lamb, 1977). O detalhamento do módulo das parametrizações físicas é descrito com detalhes em Li (1995) e Li (1998).

A versão do modelo (LMD-Z 3.2) utilizada nesse experimento possui resolução espacial horizontal de 73 pontos em longitude e 46 em latitude, sendo que a distância entre eles é variável em ambas direções. A coordenada vertical é a coordenada sigma ($\sigma = p/p_s$), que é a pressão normalizada de acordo com seu valor na superfície. Na versão atual, o modelo possui 15 níveis irregularmente espaçados na vertical, com o maior detalhamento é na baixa atmosfera (Harzallah & Sadourny, 1995).

O modelo de superfície é muito simples e consiste de apenas uma camada homogênea de 150 mm. O cálculo da temperatura da superfície é incorporado na camada limite e baseado na equação de balanço de energia da superfície, seguindo Arakawa & Mintz (1974). A capacidade térmica da superfície depende da natureza da mesma. Para a umidade da superfície, um simples "bucket model" é usado, no qual a

capacidade de armazenamento é de 150 mm de água, e toda água acima desse valor é perdida como escoamento superficial.

O código de transferência radiativa é composto de duas partes: a componente solar é uma versão melhorada do esquema descrito em Fouquart & Bonnel (1980) e a componente terrestre é descrita em Morcrette (1991). Os fluxos de radiação de onda curta são computados para duas bandas correspondendo às frequências do visível e infravermelho próximo. O esquema para a radiação infravermelha calcula a transferência radiativa para seis intervalos do espectro, que correspondem à absorção pelo vapor d'água (dois intervalos), dióxido de carbono e a parte rotacional do espectro de vapor d'água, vapor d'água contínuo apenas (dois intervalos na janela atmosférica) e ozônio.

A condensação é parametrizada separadamente para nuvens convectivas e não convectivas. Uma equação prognóstica para a água da nuvem é incluída (Le Treut & Li, 1991), no qual as fontes e sumidouros da água condensada da nuvem são parametrizados e a advecção de grande escala da água da nuvem é explicitamente considerada.

A condensação não convectiva é tratada através de um simples algoritmo estatístico onde a distribuição do vapor d'água dentro de uma grade é considerada. A fração de nuvem usada para a radiação é diagnosticada como a fração da grade onde a condensação ocorre. A água condensada é separada em duas partes: uma parte precipita como chuva ou neve (de acordo com a temperatura da camada) e a outra permanece na atmosfera como água líquida de nuvem ou água sólida de nuvem. Essa água retida na atmosfera é então usada para determinar a espessura óptica da nuvem que é necessária para calcular os fluxos solares e a emissividade usada no cálculo da radiação infravermelha.

A parametrização da convecção utilizada é uma combinação do esquema de ajuste úmido (Manabe *et al.*, 1965) e o esquema de Kuo (1965). Basicamente, o primeiro é usado para eliminar a instabilidade condicional quando ocorre a saturação, e o segundo para levar em consideração a convergência de vapor d'água em grande escala e a evaporação da superfície (Li, 1998). Segundo França *et al.* (2000), o esque-

ma de Kuo é usado principalmente para compensar o defeito do esquema de ajuste úmido, que não é eficiente o bastante para transportar água e energia para a troposfera superior. A combinação desses esquemas de convecção é a forçante de convecção para disponibilizar a mistura vertical de água e energia (Li, 1998).

O modelo atmosférico é acoplado com o modelo "slab ocean" (modelo oceânico de camada de mistura), com profundidade uniforme de 50 metros. Segundo Le Treut *et al.* (1994) essa profundidade não afeta o equilíbrio do modelo. O gelo marinho é suposto ocorrer sempre que a temperatura da superfície do mar atinge um valor inferior a -2°C . A divergência do transporte horizontal de energia no oceano é diagnosticada como o fluxo de energia médio na interface oceano-atmosfera.

2.2 Descrição do Experimento

Para esse experimento foram feitas duas simulações: a primeira usando um nível próximo do atual da concentração de CO_2 (caso controle, isto é, $1 \times \text{CO}_2 - 330 \text{ ppm}$) e a segunda usando esse nível dobrado (caso de duplicação, isto é, $2 \times \text{CO}_2 - 660 \text{ ppm}$).

Em ambas as simulações o modelo foi integrado por cinquenta anos, sendo que, só foram utilizados os últimos quarenta anos para as análises. As condições iniciais são provenientes de uma simulação climatológica de dez anos utilizando a média mensal da temperatura da superfície do mar (TSM). O fato de se utilizar somente os últimos quarenta anos para análises foi feito para dar tempo suficiente ao modelo de atingir o equilíbrio. Além disso, as simulações foram executadas com grade em resolução variável, com máxima resolução centrada no Rio de Janeiro. A melhor resolução latitudinal é de 2° e a longitudinal é de $2,5^{\circ}$, localizada aproximadamente em $23^{\circ}\text{S} - 42^{\circ}\text{W}$, enquanto que a resolução latitudinal mais grosseira é de cerca 6° e a longitudinal é de $7,5^{\circ}$, situada aproximadamente em $69^{\circ}\text{N} - 139^{\circ}\text{E}$. Os dados de TSM correspondem à média mensal do período entre 1974-1994 e as outras condições de fronteira (gelo marinho, topografia, etc) são provenientes do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF).

Sendo assim, foram analisadas as anomalias no clima decorrentes da duplicação de CO_2 . Para isso foi feita uma comparação entre o caso de duplicação e o caso controle, ou seja, todos os resultados exibidos daqui a diante referem-se ao caso de duplicação menos o caso controle ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

3 Resultados

3.1 Média Anual Global e Hemisférica

A Tabela 1 apresenta a média anual de algumas variáveis para o globo, Hemisfério Norte e Hemisfério Sul em termos da diferença entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com a concentração de CO_2 normal ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

É possível observar na Tabela 1 que o ciclo hidrológico se intensifica num clima mais quente, já que há um aumento da temperatura à superfície, da precipitação (é importante salientar que a precipitação no modelo LMD-Z representa apenas a chuva), do conteúdo de vapor d'água entre 1000 e 500 mb e da evaporação. Este resultado está consistente com outras simulações deste tipo. O aumento da temperatura à superfície para o globo é de $2,38^\circ\text{C}$, $2,84^\circ\text{C}$ para o Hemisfério Norte e $1,90^\circ\text{C}$ para o Hemisfério Sul.

Variável (anomalia)	Globo	Hemisfério Norte	Hemisfério Sul
Temperatura à superfície ($^\circ\text{C}$)	2,38	2,84	1,90
Precipitação (mm/dia)	0,14	0,29	-0,01
Precipitação (%)	4,05	7,1	-0,28
Vapor d'água entre 1000-500 mb (%)	15,92	17,43	14,31
Evaporação (mm/dia)	0,14	0,15	0,14

Tabela 1 Anomalia média anual de algumas variáveis para o globo, Hemisfério Norte e Hemisfério Sul ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

A diferença na temperatura à superfície é compatível com resultados obtidos pelo modelo de circulação geral OSU (Schlesinger & Zhao, 1989). No entanto, o modelo OSU apresenta um ciclo hidrológico mais intenso para o Hemisfério Sul (HS), diferente dos resultados da Tabela 1, que mostram que a maior intensificação do ciclo hidrológico para um clima de CO₂ duplicado acontece no Hemisfério Norte (HN). Esta diferença pode ter várias explicações, como por exemplo, a diferença na resolução espacial entre o HS e o HN, além das diferenças nas parametrizações dos modelos.

Em comparação com outros modelos de circulação geral acoplados à slab oceans, o aumento global médio da temperatura à superfície de 2,38° C é menor do que os 2,84° C obtidos pelo modelo OSU (Schlesinger & Zhao, 1989), os 3,5° C obtidos pelo modelo NCAR (Washington & Meehl, 1984), os 4,0° C pelo modelo GFDL (Wetherald & Manabe, 1986), os 4,2° C pelo modelo GISS (Hansen *et al.*, 1984) e os 5,2° C obtidos pelo modelo UKMO (Wilson & Mitchell, 1987), mas encontra-se dentro da margem de previsão de aumento do IPCC (Houghton *et al.*, 2001), que é de 1,4° até 5,8° C.

As mudanças no conteúdo de vapor d'água na atmosfera são muito grandes; 15,92% para o globo, 17,43% para o Hemisfério Norte e 14,31% para o Hemisfério Sul. Esse aumento significativo do conteúdo de vapor d'água na atmosfera é consequência do aumento da temperatura, já que o primeiro é amplamente dependente da estrutura do segundo (Le Treut *et al.*, 1994). Resultados semelhantes também foram encontrados em Wilson & Mitchell (1987) e Schlesinger & Zhao (1989).

As taxas de aumento da média global de precipitação e evaporação são as mesmas (0,14 mm/dia), tendo em vista que o ciclo hidrológico requer equilíbrio em relação ao aumento do CO₂. Em relação aos hemisférios isso não acontece. No Hemisfério Norte a anomalia de precipitação é maior do que a de evaporação (0,29 mm/dia e 0,15 mm/dia, respectivamente), enquanto que no Hemisfério Sul a evaporação aumentou e a precipitação diminuiu (0,14 mm/dia e -0,01 mm/dia, respectivamente). Isso significa que houve um fluxo de vapor d'água ao longo do Equador do Hemisfério Sul para o Hemisfério Norte no caso 2

x CO₂ relativo ao caso 1 x CO₂. Já no experimento de Schlesinger & Zhao (1989) esse fluxo de vapor d'água ocorreu no sentido contrário. A diferença parece estar associada à precipitação no Hemisfério Sul; como visto na Tabela 1 a precipitação diminui -0,01 mm/dia enquanto que em Schlesinger & Zhao (1989) aumenta 0,23 mm/dia. Analisando a distribuição geográfica das anomalias (Figura 5), nota-se que a região tropical do Hemisfério Sul possui uma diminuição significativa da precipitação. Estas anomalias negativas parecem estar relacionadas à intensificação dos anticiclones subtropicais no Hemisfério Sul, como pode ser visto na Figura 2.

3.2 Média Geográfica Anual

As anomalias anuais de temperatura à superfície, pressão média ao nível do mar, precipitação e umidade específica em 1000 hPa para o caso de duplicação de gás carbônico menos o caso com a concentração normal do CO₂ são mostradas nas Figuras a seguir. Essas anomalias são baseadas na diferença entre a média anual do caso 2 X CO₂ menos a média anual do caso 1 X CO₂. A média anual, por sua vez, representa a média dos últimos quarenta anos em cada ponto de grande do modelo.

A Figura 1 mostra que a temperatura do ar à superfície aumenta em praticamente todas as regiões como consequência da duplicação da concentração de CO₂. O aquecimento é menor sobre os oceanos tropicais e maior nas altas latitudes, onde este aumento provocaria o derretimento de gelo e neve, semelhante aos estudos de Le Treut *et al.* (1998) e Wilson & Mitchell (1987). Sobre os oceanos tropicais, o aumento na temperatura à superfície é menor do que 3°C, resultado também obtido pelo modelo OSU (Schlesinger & Zhao, 1989). Sobre os continentes tropicais a anomalia é de 2 a 3 °C. Em direção aos pólos o aquecimento aumenta com a latitude e atinge um valor máximo de 7° C próximo ao Pólo Norte, e próximo ao Pólo Sul as anomalias não ultrapassam de 4°C. Essa diferença de anomalia entre os Pólos Norte e Sul está bastante consistente com a distribuição de oceanos (mais oceanos próximo ao Pólo Sul) e continentes (mais continentes próximo ao Pólo Norte) nessas regiões. Essa amplificação em direção aos pólos do aquecimento induzido pelo CO₂ também é mostrada pelos perfis de anomalias zonais anuais de temperatura (Figura 6).

Analisando o campo de anomalia de pressão média ao nível do mar (Figura 2) é possível notar uma redução da pressão sobre os continentes e um aumento sobre os oceanos nas regiões dos anticiclones subtropicais, em especial no Oceano Pacífico. A causa disso é que a anomalia de temperatura à superfície é maior sobre os continentes do que sobre os oceanos (Figura 1), o que gera uma diferença no campo de pressão. Além disso, observam-se valores negativos de anomalia de pressão média ao nível do mar nas altas latitudes de ambos os hemisférios causadas pelo aumento da temperatura à superfície nessas duas regiões. Na Antártica, observam-se valores de anomalias de até -6 hPa; análises e conclusões nessa região devem ser cautelosas pois ela possui um relevo bastante elevado (até cerca de 5000 metros de altitude), o que faz com que os resultados dos MCG's varie bastante. A Figura 3 mostra a topografia em metros utilizada pelo modelo LMD-Z.

O campo de anomalia de umidade específica em 1000 hPa (g/Kg) devido a duplicação de CO₂ é exibido na Figura 4. Nota-se valores positivos de anomalia acima de 2,5 g/Kg na região tropical, em especial nos Oceanos Índico e Pacífico oeste. Em direção as altas latitudes de ambos os hemisférios as anomalias positivas diminuem até valores da ordem de 0,5 g/Kg. Além disso, observa-se que próximo ao Pólo Norte as anomalias de umidade específica são mais significativas do que no Pólo Sul, fato que é comprovado também pelo perfil de anomalia zonal anual (Figura 7). Este fato pode estar relacionado à ocorrência de maiores anomalias de temperatura à superfície próxima ao Pólo Norte em comparação ao Pólo Sul, como mostrado na Figura 1.

As mudanças devidas à duplicação de CO₂ no campo de precipitação são exibidas na Figura 5a. Pode-se observar que as maiores modificações ocorrem sobre a região tropical. Segundo Le Treut *et al.* (1994), estas grandes modificações parecem estar relacionadas aos deslocamentos da posição dos ramos ascendentes e descendentes das células de Hadley e Walker, que estão associadas às modificações no campo de pressão. A Figura 5 mostra que, diferente da temperatura à superfície, o campo de precipitação mostra regiões com aumento e com diminuição, com pequenos aumentos (menores que 1 mm/dia) a partir de 30° de latitude em direção aos pólos em ambos os hemisférios e aumentos e decréscimos (+ e -2 mm/dia) mais significativos entre 30°

S e 30° N. O trabalho de Le Treut & McAvaney (2000) com diversos modelos de circulação geral mostra resultados bem semelhantes, principalmente na região tropical e subtropical. Essas mudanças geográficas também estão evidentes no campo de anomalia de precipitação zonal anual (Figura 9). Um importante fato que se observa nesse campo (Figura 5a) é a presença de uma faixa de anomalias positivas (até 2 mm/dia) ao norte do Equador sobre o Oceano Pacífico e negativas até -2 mm/dia logo ao sul dessa região, o que pode estar relacionado a uma possível intensificação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

Também se observam anomalias negativas na região subtropical dos dois hemisférios, principalmente no Hemisfério Sul. Essas anomalias negativas estariam associadas ao aumento da pressão média ao nível do mar (Figura 2), favorecendo a redução da precipitação. Essa diminuição da precipitação é tão significativa que gera uma anomalia de precipitação para todo o HS, como pode ser observado na Tabela 1.

De fato, como já citado, o posicionamento do zoom parece ter alguma relação com essas anomalias, mas outros estudos precisam ser feitos para avaliar melhor o seu impacto. Além disso, existe uma região de anomalias positivas que se estende desde o noroeste da América do Sul até o sul do Oceano Atlântico, passando pela parte central do Brasil.

Le Treut *et al.* (1994), Schlesinger & Zhao (1989) e Wilson & Mitchell (1987) mostram que apesar das anomalias de precipitação nos pólos serem bem menores do que na região tropical, o aumento relativo delas é bem maior. Isto pode ser comprovado pela Figura 5b, que exhibe a anomalia relativa de precipitação (anomalia proporcional ao valor da precipitação na simulação 1 X CO₂). Nota-se que na região tropical a anomalia de precipitação varia entre -40 % e 20 % em relação à simulação controle (1 X CO₂). Já para as altas latitudes esses índices são bem maiores, atingindo valores entre 40 e 60 % no Hemisfério Sul e entre 60 e 80 % no Hemisfério Norte.

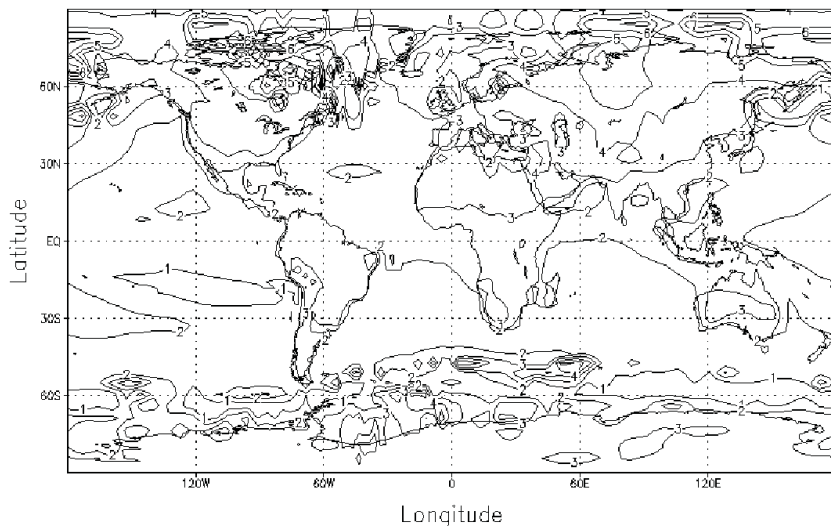


Figura 1 Anomalia anual de temperatura à superfície (°C) entre o caso com duplicação de CO₂ e o caso com concentração normal de CO₂ (2 X CO₂ - 1 X CO₂).

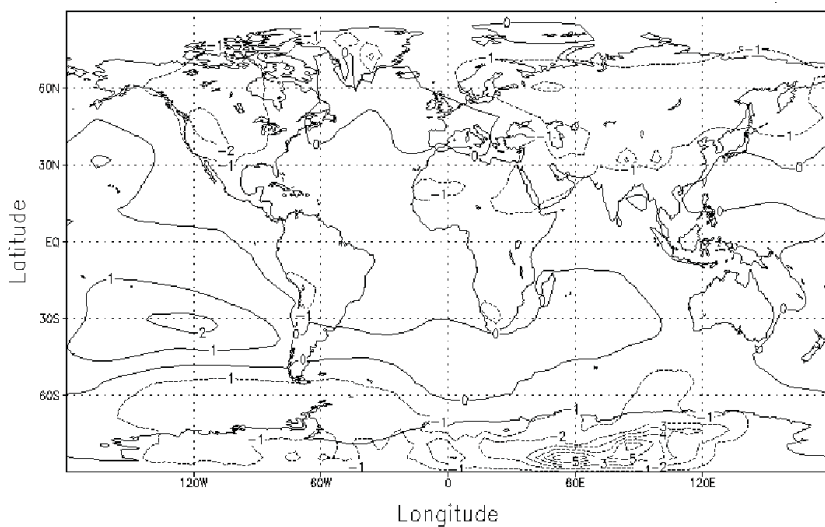


Figura 2 Anomalia anual de pressão média ao nível do mar (hPa) entre o caso com duplicação de CO₂ e o caso com concentração normal de CO₂ (2 X CO₂ - 1 X CO₂).

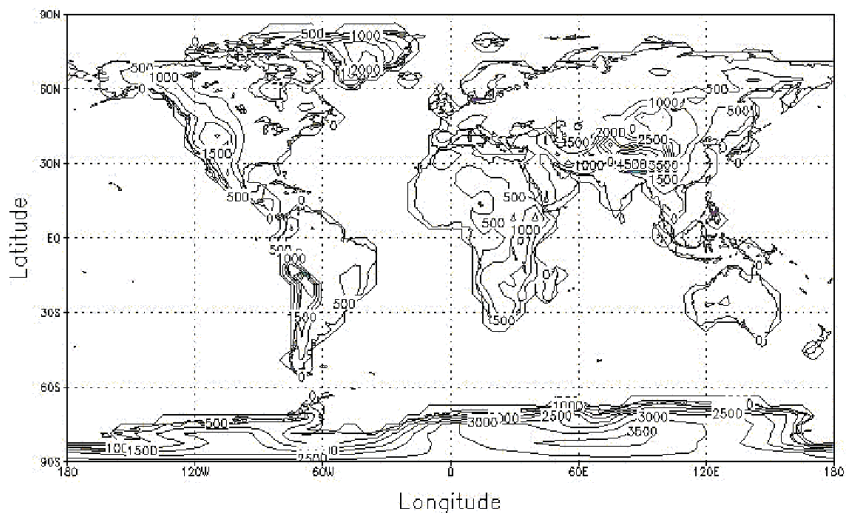


Figura 3 Topografia em metros utilizada pelo modelo LMD-Z

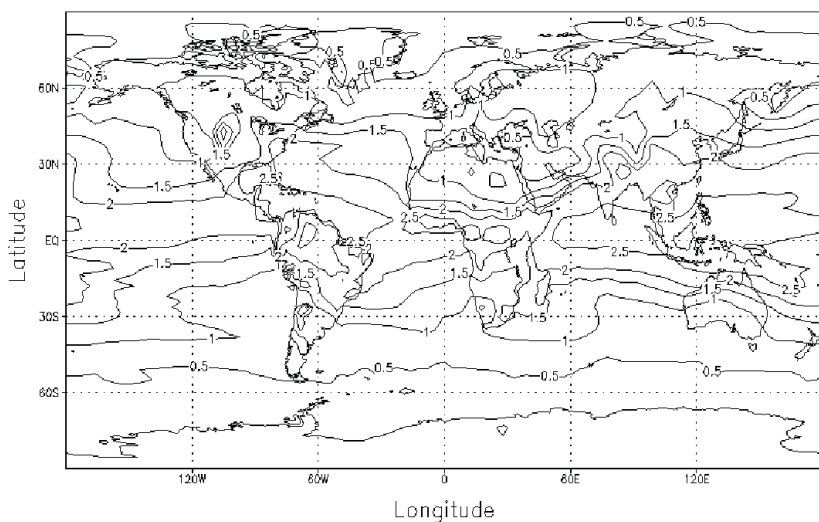


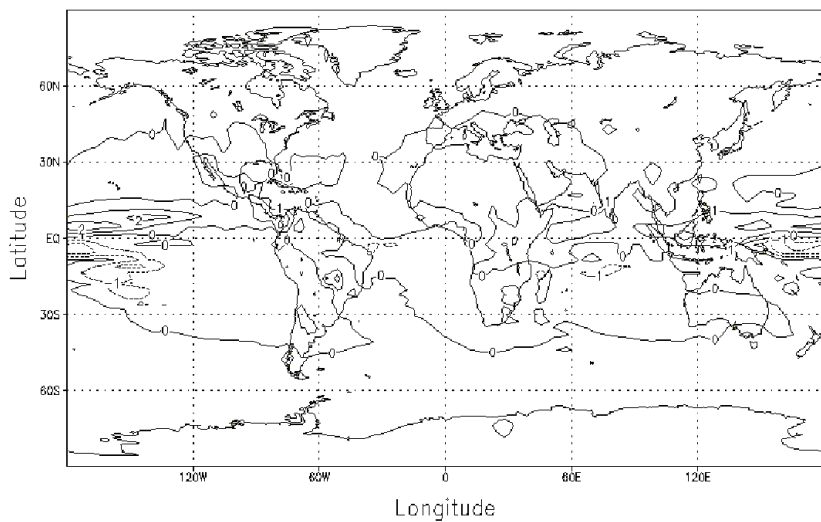
Figura 4 Anomalia anual de umidade específica em 1000 hPa (g/Kg) entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com concentração normal de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

3.3 Média Zonal Anual

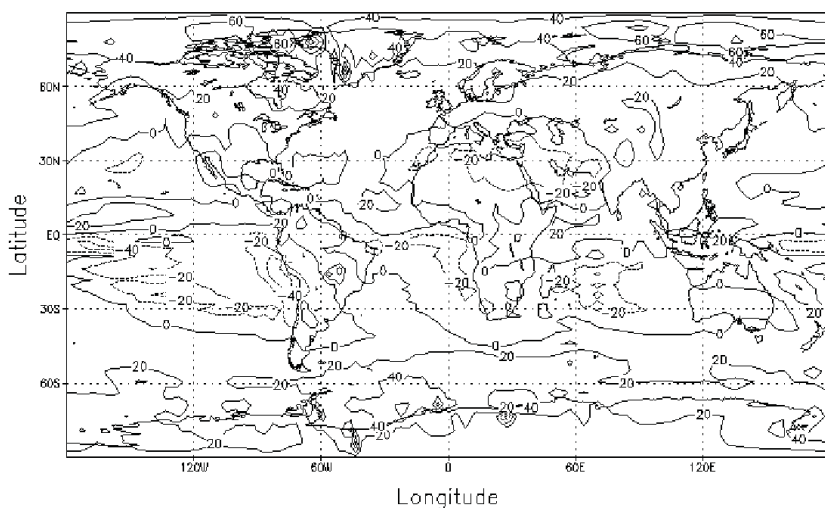
As anomalias zonais anuais são baseadas na diferença entre a média zonal anual do caso 2 X CO₂ menos a média zonal anual do caso 1 X CO₂. A média zonal anual, por sua vez, representa a média dos últimos quarenta anos em cada latitude (em todos os meridianos) em todos os níveis verticais do modelo.

Em relação às mudanças zonais anuais na temperatura (Figura 6), é possível notar a ocorrência de características usuais, isto é, resfriamento na estratosfera, aquecimento generalizado na troposfera, principalmente em altos níveis nas baixas latitudes, e à superfície. O resfriamento na estratosfera se deve basicamente a maior emissão de radiação por parte do CO₂, já que o balanço radiativo nessa região se dá basicamente pela absorção de radiação solar pelo O₃ e emissão de radiação pelo CO₂ (Trenberth, 1992). O aquecimento na alta troposfera tropical e nas altas latitudes próximo à superfície do Hemisfério Norte é superior a 4°C. O primeiro está de acordo com a tendência dos processos úmidos do modelo de ajustarem o perfil vertical ao gradiente adiabático úmido; esse gradiente torna-se menor com o aumento da temperatura e então amplifica as mudanças de temperatura com altura (Wilson & Mitchell, 1987). O segundo está relacionado ao processo de retroalimentação positivo no sistema climático devido a mudanças no albedo da neve e gelo. De fato o mecanismo é simples; superfícies cobertas por neve e gelo marítimo ou terrestre têm um albedo alto. Qualquer aquecimento resulta em derretimento, ou seja, expondo o solo nu ou mar aberto. Isso reduzirá drasticamente o albedo dessa região, o que irá favorecer a absorção de radiação solar à superfície e, dessa forma, aumentará o aquecimento. A Figura 6 mostra que a anomalia de temperatura à superfície é maior no Hemisfério Norte do que no Hemisfério Sul, fato que está coerente com a Figura 1.

O trabalho de Le Treut & McAvaney (2000) mostra que as anomalias de temperatura de diversos MCG's são bem semelhantes às



(a)



(b)

Figura 5 Anomalia anual de precipitação entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com concentração normal de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$). (a) Em mm/dia e (b) em %.

apresentadas aqui. Alguns modelos exibem dois máximos de anomalia de temperatura (altas latitudes do HN e alta troposfera tropical), o que coincide com o resultado na Figura 6. No entanto, outros modelos apontam para três máximos de anomalia de temperatura, os já citados acima e também as altas latitudes do HS (Wilson & Mitchell, 1987; Le Treut *et al.*, 1994; Schlesinger & Zhao, 1989). Vale ressaltar também a dispersão quantitativa entre as previsões dos modelos; o aquecimento na alta troposfera tropical varia de 2 °C até 8 °C e nas altas latitudes exibe uma dispersão de 5 °C, dependendo do modelo (Le Treut & McAvaney, 2000).

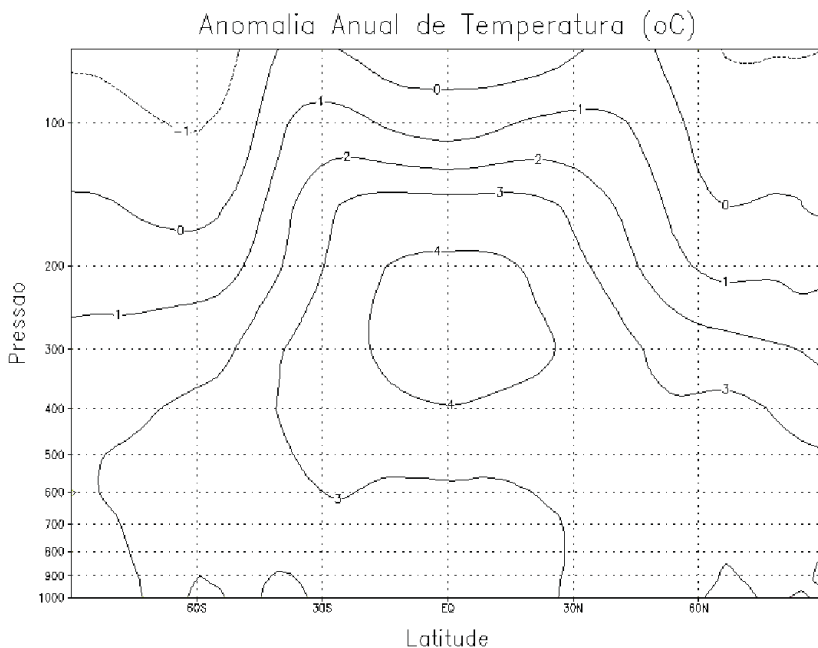


Figura 6 Diagrama latitude-pressão para as mudanças de temperatura (°C) entre o caso com e sem duplicação de CO₂ (2 X CO₂ - 1 X CO₂, média zonal anual).

O aumento da umidade atmosférica está relacionado ao aumento da temperatura, já que a primeira é amplamente dependente da estrutura da segunda. Os maiores aumentos estão localizados à superfície próximos ao Equador e decrescem com a latitude e altitude (como mostra a Figura 7). Segundo Le Treut & McAnaney (2000), os máximos à superfície próximos ao Equador refletem o aumento marcante da convergência de vapor d'água em baixos níveis. Os autores ainda abordam a alta diversidade de resultados para as altas latitudes, o que pode refletir tanto a variabilidade nas respostas na temperatura nas altas latitudes, quanto a grande variedade no tratamento do gelo nos modelos.

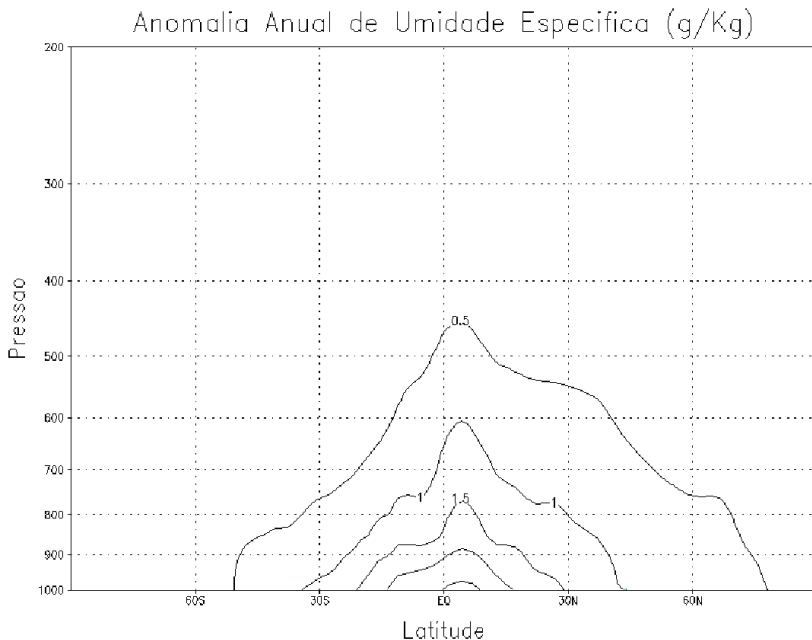


Figura 7 Diagrama latitude-pressão para as mudanças de umidade específica (g/kg) entre o caso com e sem duplicação de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$, média zonal anual).

O aumento relativo da umidade específica (aumento proporcional ao valor da umidade específica na simulação $1 \times \text{CO}_2$), exibido na Figura 8, tem seu valor máximo no nível de 200 mb e decresce em

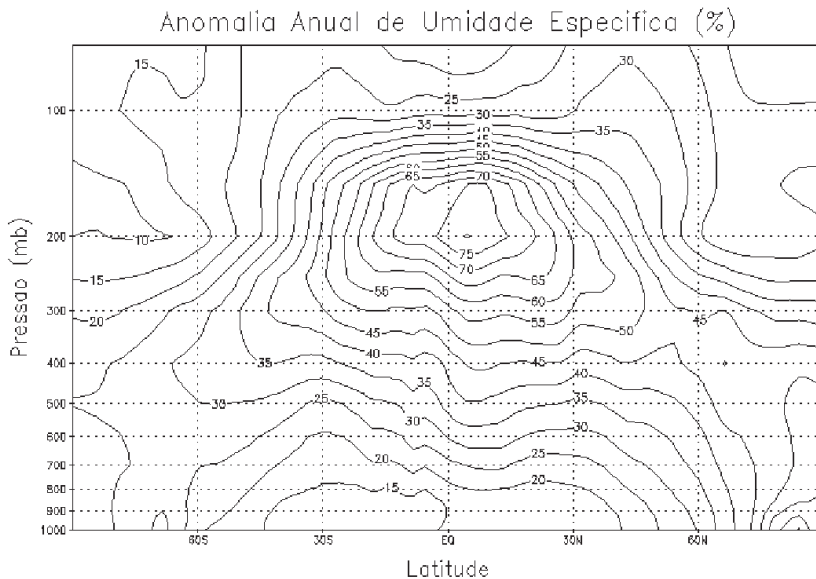


Figura 8 Diagrama latitude-pressão para as mudanças relativas de umidade específica (%) entre o caso com e sem duplicação de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$, média zonal anual).

direção a superfície e aos pólos. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Mitchell & Ingram (1992), Le Treut *et al.* (1994) e Le Treut & McAnavey (2000). De acordo com Le Treut & McAnavey (2000), as mudanças relativas de vapor d'água em altas altitudes são geralmente maiores do que nas baixas altitudes devido a mais intensa resposta da temperatura.

A Figura 9 mostra a média zonal anual de precipitação para o caso $2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$. As maiores anomalias (positivas) ocorrem nas principais regiões de convergência, ou seja, no Equador e nas latitudes médias. Nota-se também um aumento da precipitação nas altas latitudes do Hemisfério Norte. Além disso, observam-se anomalias negativas na região subtropical do Hemisfério Sul, associadas ao aumento da pressão média ao nível do mar nessa região (Figura 2), favorecendo a redução da precipitação. Outro fato importante é que as anomalias de precipitação são maiores próximo ao Pólo Norte que próximo ao Pólo Sul, o que também foi obtido por Le Treut & McAnavey (2000).

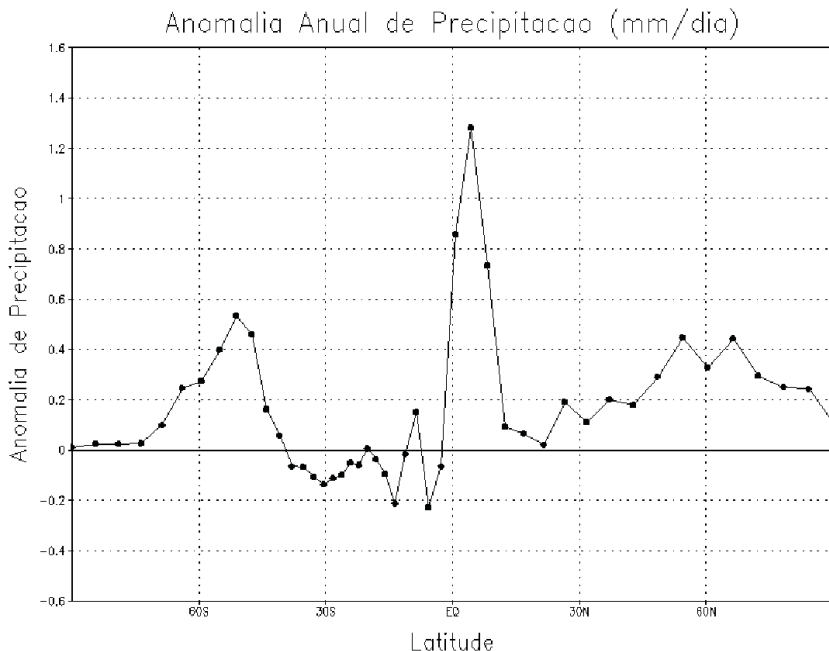


Figura 9 Anomalia zonal anual de precipitação (mm/dia) entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com concentração normal de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2$ - $1 \times \text{CO}_2$).

A Figura 10 mostra a anomalia zonal anual de radiação infravermelha no topo da atmosfera (W/m^2). É possível relacionar a anomalia desta variável (radiação infravermelha) à anomalia de nebulosidade, que está diretamente ligada à anomalia de precipitação, pois havendo nuvens, menos radiação infravermelha é emitida para o espaço devido a menor temperatura do topo das nuvens em relação ao solo abaixo delas. Desta forma, onde há anomalia negativa de radiação infravermelha, encontra-se mais nebulosidade e conseqüentemente mais precipitação, e vice-versa. Essa relação entre a radiação infravermelha e a nebulosidade não é muito aplicável nas altas latitudes por causa das baixas temperaturas à superfície nessas regiões. Às vezes a presença de nuvens pode ser confundida com a superfície fria, dificultando uma análise mais correta dos fenômenos físicos.

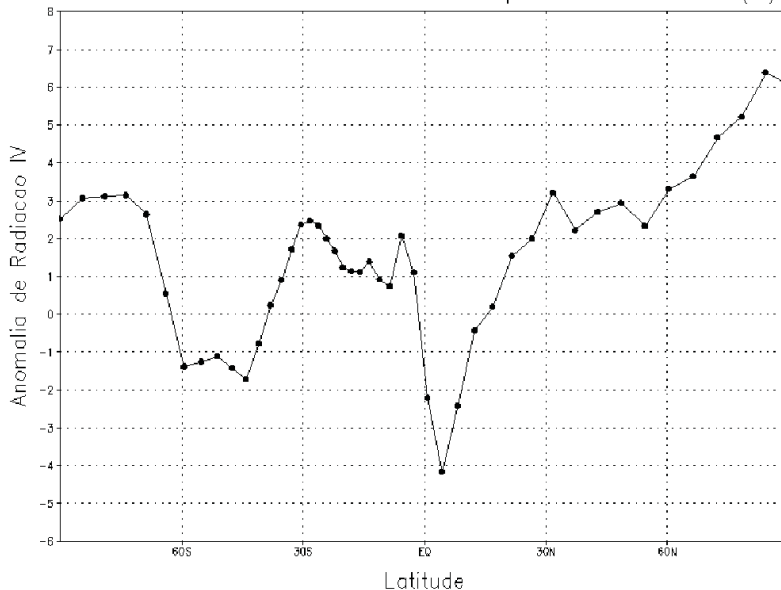
Anomalia Anual de Radiação IV no Topo da Atmosfera (W/m^2)

Figura 10 Anomalia zonal anual de radiação infravermelha no topo da atmosfera (W/m^2) entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com concentração normal de CO_2 ($2 \times CO_2$ - $1 \times CO_2$).

Como era de se esperar, o padrão de anomalia de radiação infravermelha está bem relacionado à anomalia de precipitação, principalmente em baixas e médias latitudes. Nota-se que nas latitudes entre $0-30^\circ S$ há diminuição da precipitação (Figura 9) e um aumento da radiação infravermelha (Figura 10). Já entre 0 e $15^\circ N$ e entre 35 e $60^\circ S$ existe um aumento na precipitação e uma diminuição da radiação infravermelha. A partir de $15^\circ N$ até $90^\circ N$ e nas latitudes mais altas do Hemisfério Sul, apesar da anomalia anual de precipitação ser positiva, a anomalia de radiação infravermelha não apresenta valores negativos. Isso se deve principalmente a presença de desertos na região subtropical do Hemisfério Norte e ao aumento da temperatura e derretimento de gelo e neve nas altas latitudes em ambos os pólos. Por estes resultados, o derretimento de gelo e neve e aquecimento da superfície contribuem mais positivamente para a radiação infravermelha do que o aumento de nebulosidade contribui negativamente. Na região subtropical do He-

4 Conclusões

A sensibilidade do clima global à duplicação da concentração de CO_2 foi investigada utilizando um modelo de circulação geral (MCG) da atmosfera acoplado a um modelo "slab ocean" (modelo oceânico de camada de mistura). O modelo utilizado foi o LMD-Z 3.2 que possui resolução espacial variável e com máxima resolução centrada no estado do Rio de Janeiro. Foram realizadas duas simulações de cinquenta anos, sendo que, só foram utilizados os últimos quarenta anos de cada para as análises. A primeira foi feita com um nível próximo do atual da concentração de CO_2 (caso controle - 330 ppm) e a segunda usando esse nível dobrado (caso de duplicação - 660 ppm). Dessa forma, foi feita uma comparação entre o caso de duplicação e o caso controle (2 X CO_2 - 1 X CO_2).

A temperatura global média à superfície aumentou 2,38 °C. Esse aumento é menor do que os obtidos com outros modelos de circulação geral (2,84 °C, OSU; 3,5 °C, NCAR; 4,0 °C, GFDL; 4,2 °C, GISS; e 5,2 °C, UKMO), mas está dentro da margem de previsão de aumento do IPCC de 1995 (Kattenberg *et al.*, 1996), entre 1,5 e 4,5 °C, e do IPCC de 2001 (Houghton *et al.*, 2001), entre 1,4 ° até 5,8 °C. No Hemisfério Norte (HN) o aumento foi de 2,84 °C e no Hemisfério Sul (HS) foi de 1,90 °C. Isto é explicado em grande parte pelo maior aquecimento que ocorre nas médias e altas latitudes do HN quando comparadas com as do HS.

As taxas de aumento da média global de precipitação e evaporação são as mesmas (0,14 mm/dia). Os resultados para os hemisférios indicam que a duplicação de CO_2 acarretou num fluxo de vapor d'água ao longo do Equador do HS para o HN, tendo em vista que no HN a precipitação cresceu mais do que a evaporação (0,29 mm/dia e 0,15 mm/dia, respectivamente), enquanto que no HS a evaporação aumentou e a precipitação diminuiu (0,14 mm/dia e -0,01 mm/dia, respectivamente). Essa diminuição da precipitação pode estar associada a maior resolução espacial em torno de 23 °S (centro da grade variável) ao longo de todos os meridianos. Vale lembrar que 23 °S é bem próximo da

misfério Norte, mesmo com o aumento da precipitação, a nebulosidade dessa faixa latitudinal diminui (Figura 11) e, como a temperatura na superfície aumenta nesta área, o resultado é uma anomalia positiva de radiação infravermelha.

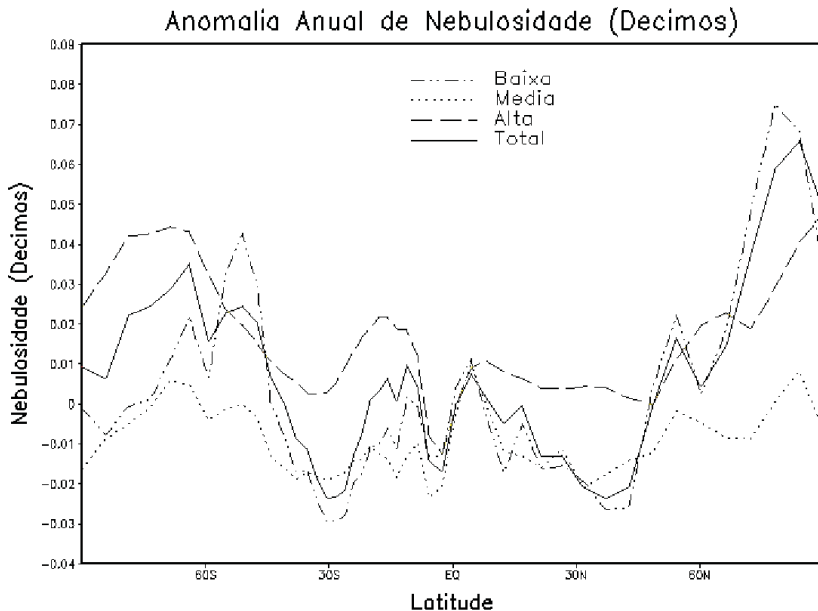


Figura 11: Anomalia zonal anual de Nebulosidade (Décimos) entre o caso com duplicação de CO_2 e o caso com concentração normal de CO_2 ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

A Figura 11 mostra as anomalias zonais de nebulosidade baixa, média, alta e total (décimos). Assim como em Wilson & Mitchell (1987), observa-se uma clara diminuição das nuvens médias, um aumento das nuvens altas em todas as latitudes (exceto próximo ao Equador, e em 30°S e 30°N) e aumento das nuvens baixas nas médias e altas latitudes dos dois hemisférios. Segundo Le Treut & McAvaney (2000), muitos MCG's mostram um aumento da nebulosidade alta principalmente nas altas latitudes e uma diminuição da mesma na alta troposfera das baixas latitudes onde ocorre uma forte anomalia de temperatura (Figura 6). Esse tipo de comportamento também pode ser notado na Figura 11.

posição climatológica dos centros dos anticiclones subtropicais do HS. De fato, como foi visto, estes anticiclones do HS se intensificaram significativamente, o que pode ter gerado uma diminuição excessiva de precipitação nessa região (efeito direto), fazendo com que na média do HS a anomalia também fosse negativa. A intensificação dos anticiclones no HS, por sua vez, acarretou no aumento do transporte de umidade do HS para o HN (efeito indireto). Em relação à resolução variável, são necessários mais estudos para analisar até que ponto esse tipo de grade melhora ou piora as simulações, tanto próximas ao local de máxima resolução quanto no resto do domínio.

Na comparação com outros MCG's, que duplicam o CO_2 , observou-se que há um certo consenso qualitativo em relação às mudanças atmosféricas de grande escala, tanto na distribuição vertical quanto na latitudinal. Entretanto, ainda existe um grande desacordo quanto à amplitude dessas mudanças, e mais ainda, quanto aos detalhes em relação às menores escalas espaciais. Dessa forma, fica claro que estamos bem longe de prognosticar com um maior nível de certeza os efeitos da duplicação da concentração de CO_2 atmosférico em relação à magnitude e distribuição das mudanças climáticas.

Apesar de existirem inúmeros trabalhos de mudanças climáticas globais envolvendo a duplicação da concentração de CO_2 , poucos analisaram as conseqüências sobre o Hemisfério Sul e, principalmente, sobre as regiões do Brasil. Futuramente, pretende-se fazer uma análise mais focada dos impactos da duplicação de CO_2 sobre o Brasil e, principalmente, sobre a região Sudeste, que é de fato o objetivo principal desse trabalho.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Núcleo de Atendimento em Computação de Alto Desempenho (NACAD) da COPPE/UFRJ, onde as simulações foram realizadas, pelo excelente suporte técnico oferecido, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado conferida a Felipe das Neves Roque da Silva,

ao projeto CAPES-COFECUB (nº 251/98-II) e a Musat Ionela, Laurent Fairhead, Laurent Li e Hervé Le Treut pelos valiosos comentários e sugestões sobre o trabalho.

6 Referências

- Arakawa, A. & Lamb, V. R. 1977. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. *In: J. CHANG (ed.). Methods in Computational Physics*, Academic Press, New York, p. 173-265.
- Arakawa, A. & Mintz, Y. 1974. The UCLA atmospheric general circulation model. *In: WORKSHOP ON THE UCLA ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL*, Los Angeles, 1974. UCLA Dept of Meteorology.
- Bounoua, L.; Collatz, G. J.; Sellers, P. J.; Randall, D. A.; Dazlich, D. A.; Los, S. O.; Berry, J. A.; Fung, I.; Tucker, C. J.; Field, C. B. & Jensen, T. G. 1999. Interactions between vegetation and climate: Radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂. *J. Climate*, 12: 309-324.
- Fouquart, Y. & Bonnel, B. 1980. Computations of solar heating of the earth's atmosphere: a new parameterisation. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 53: 35-62.
- França, J. R. A.; Li, L. Z.; Silva, F. N. R. & Junior, A. R. T. 2000. Sensibilidade do modelo de circulação geral do LMD às variações na temperatura da superfície do mar no Pacífico Tropical. *In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA*, Rio de Janeiro, 2000. Anais, Rio de Janeiro, SBMET, p. 3685-3693.
- Hansen, J.; Lacis, A.; Rind, D.; Russel, G.; Stone, P.; Fung, I.; Ruedy, R. & Lerner, J. 1984. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. *In: HANSEN & TAKAHASHI(eds.). Climate Process and Climate Sensitivity*, Amer. Geophys. Union, Washington, p. 130-163.
- Harzallah, A. & Sadourny, R. 1995. Internal versus sea surface temperature forced atmospheric variability as simulated by an atmospheric general circulation model. *J. Climate*, 8: 474-495.

- Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguer, M.; Van der Linden, P. J.; Da, X.; Maskell, K. & Johnson, C. A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. New York, Cambridge University Press. 881 p.
- Kattenberg, A. & Coauthors 1996. Climate Models - Projections of Future Climate. In: HOUGHTON *et al.* (eds.). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, New York, p. 285-358.
- Kuo, H.L. 1965. On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, 22: 1482-1497.
- Le Treut, H. & Li, L.Z. 1991. Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes: feedbacks effects associated with the simulation of cloud optical properties. *Climate Dyn*, 5: 175-187.
- Le Treut, H.; Li, L. Z. & Forichon, M. 1994. Sensitivity of the LMD general circulation model to greenhouse forcing associated with two different cloud water parametrizations. *J. Climate*, 7: 1827-1841.
- Le Treut, H.; Forichon, M.; Boucher, O. & Li, Z. X. 1998. Sulfate aerosol indirect effect and CO₂ greenhouse forcing: equilibrium response of the LMD GCM and associated cloud feedbacks. *J. Climate*, 11: 1673-1684.
- Le Treut, H. & McAvaney, B. 2000. A model intercomparison of equilibrium climate change in response to CO₂ doubling. Institut Pierre Simon Laplace des Sciences de l'Environnement Global, Paris, Notes du Pôle de Modélisation.
- Levis, S.; Foley, J. A. & Pollard, D. 2000. Large-scale vegetation feedbacks on a doubled CO₂ climate. *J. Climate*, 13: 1313-1325.
- Li, L.Z. 1995. Les paramétrisation physique du modèle terrestre. LMD-CNRS, Paris, Technical Report.
- Li, L.Z. 1998. Ensemble atmospheric GCM simulation of climate interannual variability from 1979 to 1994. LMD-CNRS, Paris, Technical Report.
- Manabe, S.; Smagorinsky, J. & Strickler, R.F. 1965. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. *Mon. Wea. Rev.*, 93: 769-798.

- Mitchell, J. F. B. & Ingram, W. J. 1992. Carbon dioxide and climate: mechanisms of changes in cloud. *J. Climate*, 5: 5-21.
- Morcrette, J.-J. 1991. Radiation and cloud radiative properties in the ECMWF operational weather forecast model. *J. Geophys. Res.*, 96D: 9121-9132.
- Petit, J.R.; J. Jouzel; D. Raynaud; N.I. Barkov; J.-M. Barnola; I. Basile; M. Benders; J. Chappellaz; M. Davis; G. Delayque; M. Delmotte; V.M. Kotlyakov; M. Legrand; V.Y. Lipenkov; C. Lorius; L. Pépin; C. Ritz; E. Saltzman & M. Stievenard. 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399: 429-436.
- Sadourny, R. & Laval, K. 1984. January and July performance of the LMD general circulation model. In: BERGER & NICOLIS (eds.). *New Perspectives in Climate Modelling*, Elsevier Press, Amsterdam, p. 173-197.
- Schlesinger, M. E. & Zhao, Z. 1989. Seasonal climate changes induced by doubled CO₂ as simulated by the OSU atmospheric GCM/mixed-layer model. *J. Climate*, 2: 459-495.
- Trenberth, K.E. 1992. *Climate System Modeling*. New York, Cambridge University Press. 788 p.
- Washington, W. M. & Meehl, G. A. 1984. Seasonal cycle experiment on the climate sensitivity due to a doubling of CO₂ with an atmospheric general circulation model coupled to a simple mixed layer ocean model. *J. Geophys. Res.*, 89: 9475-9503.
- Wetherald, R. T. & Manabe, S. 1986. An investigation of cloud cover change in response to thermal forcing. *Clim. Change*, 8: 5-24.
- Wilson, C. A. & Mitchell, J. F. B. 1987. A doubled CO₂ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. *J. Geophys. Res.*, 92: 13315-13343.