

COMPARAÇÕES *OFF-LINE* DE CÓDIGOS RADIATIVOS DE ONDAS CURTAS

Júlio C. S. Chagas
Dezembro de 2006

1 Introdução

1.1 No mundo

Testes e validações dos códigos radiativos que integram modelos de circulação geral são usualmente feitos por comparação com resultados de referência obtidos com o uso de modelos linha-a-linha, que consideram explicitamente as características, obtidas experimentalmente, das centenas de milhares de linhas de absorção dos gases atmosféricos nas faixas espectrais relevantes aos modelos. Desde os anos oitenta têm ocorrido esforços internacionais de intercomparação de códigos radiativos usados em modelos de circulação geral, materializados, por exemplo, no programa ICRCM, *InterComparison of Radiation Codes used in Climate Models* (Luther et al., 1988). Na componente de ondas curtas dessa intercomparação (Fouquart et al., 1991), dois modelos linha-a-linha foram considerados, mas havia diferenças entre os seus resultados pois diferentes intervalos espectrais foram usados.

Os resultados de uma fase mais recente do ICRCM, focalizada em ondas curtas e nuvens, foram apresentados e analisados por Barker et al. (2003). Foi um estudo de grande abrangência, que comparou códigos radiativos de ondas curtas usados em dezenove instituições de pesquisa e operacionais espalhadas por nove países. Houve uma preocupação em escolher cuidadosamente os resultados de referência e em demonstrar que poderiam ser de fato considerados como tal. Esses resultados de referência foram obtidos com a combinação dos modelos LBLRTM, *Line-by-Line Radiative Transfer Model*, (Clough et al., 1992; Clough and Iacono, 1995) e CHARTS, *Code for High-resolution Accelerated Radiative Transfer with Scattering*, (Moncet and Clough, 1997), desenvolvidos no AER (*Atmospheric and Environmental*

Research, Inc.), Estados Unidos, instituição com liderança internacional na área de modelagem de transferência radiativa (Clough et al., 2005). Por razões explanadas no artigo, Barker et al. (2003) concluíram que é seguro dizer que LBLRTM+CHARTS representa o padrão de modelagem para o céu claro, lembrando que tal padrão não foi possível durante fases anteriores do ICRCM.

1.2 No CPTEC

Atualmente, dois novos códigos de ondas curtas foram implantados no modelo global do CPTEC: o código de Chou and Suarez (1999) modificado por Tarasova and Fomin (2000), conhecido como CLIRAD-SW-M, e o código de Edwards and Slingo (1996) proveniente do UK Met Office, conhecido como UKMO-SW.

Até recentemente, os resultados de cálculos linha-a-linha feitos por Fomin and Gershonov (1996) no *Kurchatov Institute* de Moscou têm sido usados como referência para os testes dos códigos de ondas curtas em operação e em implementação no modelo global. Para esses cálculos, usaram-se os dados espectroscópicos da edição de 1992 da base de dados HITRAN, *High-resolution TRANsmission molecular absorption database*, (Rothman et al., 1992) e a versão CKD_0 da largamente utilizada formulação para o *continuum* do vapor de água desenvolvida por Clough, Kneizys e Davies (Clough et al., 1989). Quanto ao uso desses resultados como referência para validar os novos códigos em implementação no modelo global do CPTEC, há dois aspectos a serem considerados. **Primeiro:** nos últimos dez anos as bases de dados espectroscópicas que fornecem o *input* aos cálculos linha-a-linha têm passado por sucessivas e significativas atualizações (Rothman et al., 1998, 2003, 2005) e a formulação do *continuum* do vapor de água tem sido constantemente melhorada. Novas versões do CKD foram disponibilizadas em 1993, 1994, 1996, 1999 e 2002; houve uma reformulação maior em 2002 e surgiu em seu lugar o MT_CKD (Mlawer et al., 2004), que está hoje em sua versão 1.2, vinda a público em 2004. É portanto desejável, caso seja possível, que se usem, para testes e validações, valores de referência obtidos com dados espectroscópicos e formulações do *continuum* mais recentes. **Segundo:** Fomin and Gershonov (1996) mencionam que os seus resultados de referência foram obtidos com procedimentos linha-a-linha e técnicas de interpolação desenvolvidas por Fomin et al. (1993, 1994) e Fomin (1995). A formulação de Tarasova and Fomin (2000) para a absorção de radiação solar pelo vapor de água se baseou em ajustes a valores obtidos com os mesmos procedimentos e técnicas (embora tenha usado a edição de 1996 da base de dados HITRAN). Assim, usar Fomin and Gershonov (1996) para validar resultados do CLIRAD-SW-M, que usa os coeficientes de Tarasova and Fomin (2000) para o vapor de água, não constitui uma validação independente e isso pode ter contribuído de alguma forma para que os desvios em relação à referência sejam pequenos em Tarasova et al. (2006) e em Barbosa and Tarasova (2006),

para o CLIRAD-SW-M, e maiores em Chagas and Barbosa (2006), para o UKMO-SW. Assim, para dirimir dúvidas, é também desejável que se usem valores de referência obtidos com o uso de técnicas independentes de um ou de outro código.

1.3 Novos resultados de referência

Em julho último, participei da *12th Conference on Atmospheric Radiation*, realizada em Madison, Wisconsin, Estados Unidos, pela *American Meteorological Society*, onde apresentei alguns resultados de comparações entre o código de ondas curtas operacional do modelo global do CPTEC e o UKMO-SW (Chagas and Barbosa, 2006). Tive então a oportunidade de conversar com Eli Mlawer, do Grupo de Radiação e Clima do AER, iniciando um intercâmbio entre CPTEC e AER. Como resultado dessa primeira conversa, o AER enviou ao CPTEC, em agosto, um conjunto de resultados obtidos com o LBLRTM+CHARTS, que constituem os primeiros casos de referência independentes de que dispomos para testar a acurácia dos códigos de ondas curtas em operação e em implantação no CPTEC. Ainda em agosto, o CPTEC recebeu a visita de Karen Cady-Pereira, também do Grupo de Radiação e Clima do AER, que se colocou à nossa disposição para colaborar no uso e aplicação dos valores de referência fornecidos e de outros disponíveis no *website* do AER, e para discutir possível colaboração futura entre as duas instituições. Agora o CPTEC já dispõe de alguns casos de referência obtidos com dados espectroscópicos e formulações do *continuum* mais recentes, com um modelo linha-a-linha independente e que, além disso, é atualmente considerado pela comunidade internacional como o padrão de modelagem para a transferência de ondas curtas na atmosfera (Barker et al., 2003).

No presente documento, eu descrevo os principais resultados dos primeiros testes comparativos, em versão *off-line*, entre os códigos de ondas curtas do modelo global do CPTEC (CPTEC-old e CPTEC-new) e os códigos CLIRAD-SW-M e UKMO-SW, tomando como referência os resultados obtidos com o LBLRTM+CHARTS de que dispomos até o momento. CPTEC-old se refere ao código que foi operacional até março de 2004 e que integra a climatologia do modelo global do CPTEC descrita por Cavalcanti et al. (2002). CPTEC-new se refere ao esquema modificado que está em operação desde então (Chagas et al., 2004). Nas tabelas e no texto, salvo menção explícita ao contrário, CLIRAD é usado no lugar de CLIRAD-SW-M, UKMO no lugar de UKMO-SW e LBLRTM no lugar de LBLRTM+CHARTS.

2 Extinção gasosa

Para cálculos levando em conta apenas a extinção de ondas curtas pelos gases atmosféricos, há quatro casos com resultados de referência obtidos com o uso combinado dos modelos LBLRTM e CHARTS. A Tabela 1 mostra as principais características desses casos. Os casos tro00, tro60 e tro75 são os valores

de referência do trabalho de Barker et al. (2003), têm por base a edição 2000 da HITRAN e usam o MT_CKD. O caso mls00 faz parte do conjunto enviado pelo AER ao CPTEC em agosto último, usa a edição 2004 da HITRAN e o MT_CKD.

Table 1: Casos usados para as comparações em condições de céu claro (sem nuvens) e limpo (sem aerossóis). TRO: atmosfera tropical, MLS: atmosfera de verão em latitudes médias.

Caso	Perfil	Ângulo zenital solar ($^{\circ}$)	Albedo da superfície
tro00	TRO	0,0	0,2
tro60	TRO	59,9730	0,2
tro75	TRO	75,4629	0,2
mls00	MLS	0,0	0,2

Os cálculos de referência, além dos principais gases absorvedores nas ondas curtas (H_2O , CO_2 , O_3 e O_2), incluem também as contribuições menores do N_2O , do CO e do CH_4 . De acordo com a nota técnica de Chou and Suarez (1999), os cálculos com o CLIRAD consideram o H_2O , o CO_2 e o O_2 , usando parâmetros da edição de 1996 do HITRAN, e também o O_3 , usando coeficientes de absorção tirados de WMO (1986). Entendo que os parâmetros usados aqui para o H_2O foram os calculados por Tarasova and Fomin (2000), que incluem o *continuum* CKD (Clough et al., 1989). Os cálculos com o UKMO consideram o H_2O , o CO_2 , o O_3 e o O_2 , usando dados espectroscópicos da edição 2000 do HITRAN e a versão 2.4, de 2002, do CKD.

As comparações foram feitas de quatro modos: 1) Para checar alguns resultados de Barker et al. (2003), selecionou-se a banda espectral de $0,2 \mu m$ a $5,0 \mu m$, tomaram-se os fluxos nessa banda como referência e usou-se o fluxo solar nessa banda segundo o espectro de Kurucz (1992), $1362,3 W m^{-2}$, como entrada pra os códigos de banda larga; 2) Para um teste imediato da performance dos quatro códigos, usaram-se como referência os fluxos sobre a banda espectral completa dos dados fornecidos, $0,2 \mu m$ a $\sim 12,2 \mu m$, e o fluxo solar nessa banda, $1368,2 W m^{-2}$, como entrada para os códigos de banda larga; 3) Para um teste mais refinado, usaram-se como referência os fluxos sobre a banda espectral completa e diferentes entradas (correspondentes às bandas espectrais sobre as quais cada código foi construído) para os diferentes códigos de banda larga ($1365,0 W m^{-2}$ para os códigos do CPTEC, $1367,0 W m^{-2}$ para o CLIRAD e $1367,8 W m^{-2}$ para o código do UKMO); 4) Para um teste de como rodam os códigos hoje no CPTEC, usaram-se como referência os fluxos sobre a banda espectral completa e o valor de $1365,0 W m^{-2}$ como entrada para os códigos de banda larga.

Como as diferenças entre os resultados para os quatro modos de comparação foram pequenas, eu

mostro e analiso a seguir os resultados para o segundo modo. É o modo mais imediato pois os valores de referência representam os fluxos de radiação de ondas curtas esperados para os perfis atmosféricos considerados e os valores para os quatro códigos de banda larga foram obtidos usando-se o mesmo valor da referência para a radiação incidente normal no topo da atmosfera.

2.1 Comparações com banda inteira

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 organizam informações detalhadas dos resultados dos quatro casos de céu claro. A primeira parte de cada tabela mostra os fluxos de radiação de ondas curtas incidente no topo da atmosfera, refletida no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera e absorvida pela superfície. São mostrados os valores de referência obtidos com LBLRTM+CHARTS, os valores obtidos com cada um dos códigos de banda larga e as diferenças desses últimos em relação aos valores de referência. Há redundância de informações (as diferenças) para facilitar ao leitor a estimativa de quanto os resultados parametrizados são diferentes dos valores de referência. A segunda parte das tabelas é toda redundante pois a informação que apresenta já está incluída na primeira parte. Apenas julgo mais adequado, para fins de comparação, apresentar, para cada caso e código, como se distribui, ou se particiona, a radiação incidente no topo da atmosfera, em três partes: uma que é refletida, outra que é absorvida pela atmosfera e outra que é absorvida pela superfície. Uma desvantagem da apresentação em $W m^{-2}$ é que diferenças de mesmo valor podem ser importantes ou não dependendo do valor da radiação incidente. Também a segunda parte das tabelas tem informações redundantes pois contém, entre parênteses, diferenças em relação aos valores de referência. Assim, para as análises e comparações, os resultados essenciais das Tabelas 2, 3, 4 e 5 foram reorganizados na Tabela 6 (Seção 2.2).

2.2 Sumário dos casos de céu claro

A Tabela 6 sumariza os resultados dos casos com céu claro e limpo. Na seqüência da análise, a expressão “tal código é melhor do que o outro código nesse caso” significa: “os resultados obtidos com o uso de tal código são mais próximos dos valores de referência do que os resultados obtidos com o uso do outro código nesse caso”. Inspeção na Tabela 6 permite tirar algumas conclusões para os valores obtidos pelos diferentes códigos para cada termo da partição de ondas curtas.

Refletância no topo da atmosfera: para sol a pino, a refletância no topo da atmosfera é superestimada pelo CPTEC-old, tem essa diferença reduzida à metade com o CPTEC-new, mantém essa diferença ou a aumenta ligeiramente com o CLIRAD e passa a ter uma ligeira subestimação com o UKMO. Aumentando-se o ângulo zenital solar, as diferenças aumentam para os quatro códigos e as diferenças do CLIRAD e do UKMO ficam comparáveis em valores absolutos, embora de sinais contrários.

Table 2: **Caso tro00.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 0,0 graus e albedo da superfície de 0,2.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	1368,16	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)
ReTA	233,16	241,47	(+8,31)	236,84	(+3,68)	237,67	(+4,51)	231,98	(-1,18)
AbAtm	283,79	231,23	(-52,56)	250,96	(-32,83)	266,40	(-17,39)	275,39	(-8,40)
AbSfc	851,21	895,46	(+44,25)	880,36	(+29,15)	864,09	(+12,88)	860,79	(+9,58)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,1704	0,1765	(+0,0061)	0,1731	(+0,0027)	0,1737	(+0,0033)	0,1696	(-0,0008)
α_{atm}	0,2074	0,1690	(-0,0384)	0,1834	(-0,0240)	0,1947	(-0,0127)	0,2013	(-0,0061)
α_{sfc}	0,6222	0,6545	(+0,0323)	0,6435	(+0,0213)	0,6316	(+0,0094)	0,6292	(+0,0070)

Table 3: **Caso tro60.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 59,9730 graus e albedo da superfície de 0,2.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	684,64	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)
ReTA	129,58	134,49	(+4,91)	131,87	(+2,38)	132,25	(+2,67)	127,81	(-1,77)
AbAtm	168,74	137,28	(-31,46)	148,26	(-20,48)	157,47	(-11,27)	162,52	(-6,22)
AbSfc	386,32	412,86	(+26,54)	404,51	(+18,19)	394,92	(+8,60)	394,30	(+7,98)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,1893	0,1964	(+0,0071)	0,1926	(+0,0033)	0,1932	(+0,0039)	0,1867	(-0,0026)
α_{atm}	0,2465	0,2005	(-0,0460)	0,2166	(-0,0299)	0,2300	(-0,0165)	0,2374	(-0,0091)
α_{sfc}	0,5643	0,6030	(+0,0387)	0,5908	(+0,0265)	0,5768	(+0,0125)	0,5759	(+0,0116)

Table 4: **Caso tro75**. Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 75,4629 graus e albedo da superfície de 0,2.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	343,42	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)
ReTA	74,00	77,86	(+3,86)	76,29	(+2,29)	75,83	(+1,83)	72,42	(-1,58)
AbAtm	100,32	81,47	(-18,85)	88,47	(-11,85)	93,77	(-6,55)	96,03	(-4,29)
AbSfc	169,10	184,08	(+14,98)	178,66	(+9,56)	173,82	(+4,72)	174,97	(+5,87)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,2155	0,2267	(+0,0122)	0,2222	(+0,0067)	0,2208	(+0,0053)	0,2109	(-0,0046)
α_{atm}	0,2921	0,2372	(-0,0549)	0,2576	(-0,0345)	0,2730	(-0,0191)	0,2796	(-0,0125)
α_{sfc}	0,4924	0,5360	(+0,0436)	0,5202	(+0,0278)	0,5061	(+0,0137)	0,5095	(+0,0171)

Table 5: **Caso mls00**. Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera de verão em latitudes médias, ângulo zenital solar de 0,0 graus e albedo da superfície de 0,2.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	1368,16	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)
ReTA	236,13	242,94	(+6,81)	238,79	(+2,66)	240,34	(+4,21)	235,77	(-0,36)
AbAtm	264,84	219,13	(-45,71)	238,50	(-26,34)	251,56	(-13,28)	258,51	(-6,33)
AbSfc	867,19	906,08	(+38,89)	890,87	+23,68)	876,26	(+9,07)	873,88	(+6,69)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,1726	0,1776	(+0,0050)	0,1745	(+0,0019)	0,1757	(+0,0031)	0,1723	(-0,0003)
α_{atm}	0,1936	0,1602	(-0,0334)	0,1743	(-0,0193)	0,1839	(-0,0097)	0,1889	(-0,0047)
α_{sfc}	0,6338	0,6623	(+0,0285)	0,6511	(+0,0173)	0,6405	(+0,0067)	0,6387	(+0,0049)

Table 6: Frações de partição da radiação de onda curta incidente entre radiação refletida no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera e absorvida pela superfície para os casos de céu claro. Para os códigos de banda larga CPT-old, CPT-new, CLIRAD e UKMO, são mostradas as diferenças em relação aos resultados do código linha-a-linha LBLRTM+CHARTS, que aparecem na segunda coluna. A descrição dos casos está na Tabela 1.

Caso	LBLRTM	CPT-old	CPT-new	CLIRAD	UKMO
<i>Refletância no topo da atmosfera:</i>					
tro00	0,170	+0,006	+0,003	+0,003	-0,001
mls00	0,173	+0,005	+0,002	+0,003	-0,000
tro60	0,189	+0,007	+0,003	+0,004	-0,003
tro75	0,216	+0,011	+0,007	+0,005	-0,005
<i>Absortância da atmosfera:</i>					
tro00	0,207	-0,038	-0,024	-0,013	-0,006
mls00	0,194	-0,033	-0,019	-0,010	-0,005
tro60	0,247	-0,046	-0,030	-0,017	-0,009
tro75	0,292	-0,055	-0,035	-0,019	-0,013
<i>Absortância da superfície:</i>					
tro00	0,622	+0,032	+0,021	+0,009	+0,007
mls00	0,634	+0,029	+0,017	+0,007	+0,005
tro60	0,564	+0,039	+0,027	+0,013	+0,012
tro75	0,492	+0,044	+0,028	+0,014	+0,017

Em resumo, o CLIRAD é ligeiramente melhor do que o CPTEC-new para calcular a refletância no topo da atmosfera e o UKMO é melhor do que o CLIRAD.

Absortância da atmosfera: para sol a pino, a absortância da atmosfera é subestimada pelo CPTEC-old, tem essa diferença reduzida com o CPTEC-new, mais reduzida com o CLIRAD, e ainda mais com o UKMO, que reduz pela metade as diferenças do CLIRAD. Aumentando-se o ângulo zenital solar, as diferenças aumentam para os quatro códigos de forma proporcional. Em resumo, o CLIRAD é melhor do que o CPTEC-new para calcular a absortância da atmosfera e o UKMO é melhor do que o CLIRAD.

Absortância da superfície: para sol a pino, a absortância da superfície é superestimada pelo CPTEC-old, tem essa diferença reduzida com o CPTEC-new, reduzida à metade com o CLIRAD, e reduzida um pouco mais com o UKMO. Aumentando-se o ângulo zenital solar, as diferenças aumentam para os quatro códigos. As diferenças do CLIRAD continuam em torno da metade das diferenças do CPTEC-new mas as diferenças do UKMO crescem mais rápido e chegam a ser um pouco maiores do que as do CLIRAD para grandes ângulos zenitais. Em resumo, o CLIRAD é bem melhor do que o CPTEC-new para calcular a absortância da superfície, o UKMO é um pouco melhor que o CLIRAD para pequenos ângulos zenitais e um pouco pior para grandes ângulos zenitais.

3 Extinção por nuvens

O casos com nuvem são descritos com detalhes no trabalho de Barker et al. (2003), que considera separadamente duas nuvens cobrindo todo o céu, uma alta e uma baixa, e faz cálculos para cada uma delas com três diferentes ângulos zenitais solares, resultando seis casos. A Tabela 7 mostra as principais características de cada um dos casos.

Os códigos CPTEC-old e CPTEC-new usam como entrada a fração de cobertura de nuvem e a combinam com variáveis do modelo para daí estimar a espessura óptica da nuvem. O código CLIRAD precisa também como entrada, além da fração de cobertura de nuvem, do raio efetivo das partículas da nuvem (gotas ou cristais de gelo) e, na implementação feita no CPTEC, adota um valor fixo desse parâmetro para a água líquida e outro para o gelo. Para as comparações descritas aqui usou-se o valor de $10 \mu\text{m}$ dos cálculos de referência. O código UKMO, além da fração de cobertura de nuvem e do raio efetivo das partículas, precisa da razão de mistura da água condensada. Como o atual esquema de nuvens do modelo global só gera a fração de nuvem, a implementação do UKMO necessitou de que fosse implantado um esquema de nuvens que parametrizasse os outros parâmetros. Foi então implantado o esquema do CCM3, *NCAR Community Climate Model*, (CCM3, 2004). Nos cálculos descritos aqui, usou-se o valor de $10 \mu\text{m}$ para o raio efetivo e os valores da Tabela 7 para a razão de mistura.

Table 7: Casos usados para as comparações em condições com nuvens. Em todos os casos usou-se perfil de atmosfera tropical, albedo da superfície igual a 0,2 e nuvens formadas por gotículas de água líquida com raio efetivo de $10 \mu m$ e com fração de cobertura igual a 1.

Caso	Ângulo zenital solar ($^{\circ}$)	base-topo (km)	razão de mistura (g/kg)
high00	0,0	10,5–11,0	0,034
high60	59,9730	10,5–11,0	0,034
high75	75,4629	10,5–11,0	0,034
low00	0,0	3,5–4,0	0,159
low60	59,9730	3,5–4,0	0,159
low75	75,4629	3,5–4,0	0,159

3.1 Nuvem alta

Pelas razões explicitadas na Seção 2.1, são apresentadas as tabelas 8, 9 e 10 com informações detalhadas dos resultados dos três casos com nuvem alta. As informações essenciais dessas tabelas são então reorganizadas na Tabela 14 (Seção 3.3).

3.2 Nuvem baixa

Pelas razões explicitadas na Seção 2.1, são apresentadas as tabelas 11, 12 e 13 com informações detalhadas dos resultados dos três casos com nuvem baixa. As informações essenciais dessas tabelas são então reorganizadas na Tabela 14 (Seção 3.3).

Como feito para os casos de céu claro, as análises comparativas e conclusões serão baseadas principalmente na Tabela 14. Entretanto, é oportuno ressaltar um padrão presente nos três casos com nuvem baixa (Tabelas 11, 12 e 13): os erros do CPTEC-old, do CPTEC-new e do CLIRAD no cálculo da radiação refletida no topo da atmosfera e da radiação absorvida pela superfície são muito grandes. Para a radiação refletida no topo da atmosfera, os erros do CPTEC-old e do CPTEC-new variam entre 23 e 45 % do valor de referência e os erros do CLIRAD variam entre 26 e 45 %, enquanto os erros do UKMO ficam entre 1,6 e 2,4 %! Para a radiação absorvida pela superfície, os erros do CPTEC-old e do CPTEC-new variam entre 54 e 89 % do valor de referência (!) e os erros do CLIRAD variam entre 50 e 84 % (!), enquanto os erros do UKMO ficam entre 3,7 e 13 %!

Table 8: **Caso high00.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 0,0 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 10,5 e 11,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	1368,16	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)
ReTA	256,95	247,94	(-9,01)	243,36	(-13,59)	249,97	(-6,98)	258,17	(+1,22)
AbAtm	287,81	231,45	(-56,36)	251,23	(-36,58)	267,64	(-20,17)	280,35	(-7,46)
AbSfc	823,40	888,76	(+65,36)	873,56	(+50,16)	850,54	(+27,14)	829,64	(+6,24)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,1878	0,1812	(-0,0066)	0,1779	(-0,0099)	0,1827	(-0,0051)	0,1887	(+0,0009)
α_{atm}	0,2104	0,1692	(-0,0412)	0,1836	(-0,0268)	0,1956	(-0,0148)	0,2049	(-0,0055)
α_{sfc}	0,6018	0,6496	(+0,0478)	0,6385	(+0,0367)	0,6217	(+0,0199)	0,6064	(+0,0046)

Table 9: **Caso high60.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 59,9730 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 10,5 e 11,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	684,64	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)
ReTA	197,24	170,55	(-26,69)	167,95	(-29,29)	164,28	(-32,96)	186,38	(-10,86)
AbAtm	153,91	129,50	(-24,41)	139,94	(-13,97)	149,28	(-4,63)	149,15	(-4,76)
AbSfc	333,49	384,59	(+51,10)	376,75	(+43,26)	371,08	(+37,59)	349,11	(+15,62)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,2881	0,2491	(-0,0390)	0,2453	(-0,0428)	0,2399	(-0,0482)	0,2722	(-0,0159)
α_{atm}	0,2248	0,1892	(-0,0356)	0,2044	(-0,0204)	0,2180	(-0,0068)	0,2179	(-0,0069)
α_{sfc}	0,4871	0,5617	(+0,0746)	0,5503	(+0,0632)	0,5420	(+0,0549)	0,5099	(+0,0228)

Table 10: **Caso high75.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 75,4629 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 10,5 e 11,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	343,42	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)
ReTA	146,04	116,48	(-29,56)	114,96	(-31,08)	110,25	(-35,79)	129,61	(-16,43)
AbAtm	72,95	69,29	(-3,66)	75,09	(+2,14)	80,11	(+7,16)	74,44	(+1,49)
AbSfc	124,43	157,64	(+33,21)	153,37	(+28,94)	153,06	(+28,63)	139,37	(+14,94)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,4253	0,3392	(-0,0861)	0,3347	(-0,0906)	0,3210	(-0,1043)	0,3774	(-0,0479)
α_{atm}	0,2124	0,2018	(-0,0106)	0,2187	(+0,0063)	0,2333	(+0,0209)	0,2167	(+0,0043)
α_{sfc}	0,3623	0,4590	(+0,0967)	0,4466	(+0,0843)	0,4457	(+0,0834)	0,4058	(+0,0435)

Table 11: **Caso low00.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 0,0 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 3,5 e 4,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	1368,16	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)	1368,16	(0,00)
ReTA	529,78	294,42	(-235,36)	289,24	(-240,54)	291,67	(-238,11)	517,10	(-12,68)
AbAtm	307,72	242,37	(-65,35)	262,62	(-45,10)	278,22	(-29,50)	300,59	(-7,13)
AbSfc	530,66	831,37	(+300,71)	816,30	(+285,64)	798,27	(+267,61)	550,48	(+19,82)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,3872	0,2152	(-0,1720)	0,2114	(-0,1758)	0,2132	(-0,1740)	0,3779	(-0,0093)
α_{atm}	0,2249	0,1772	(-0,0477)	0,1919	(-0,0330)	0,2034	(-0,0215)	0,2197	(-0,0052)
α_{sfc}	0,3879	0,6077	(+0,2198)	0,5966	(+0,2087)	0,5835	(+0,1956)	0,4023	(+0,0144)

Table 12: **Caso low60.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 59,9730 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 3,5 e 4,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	684,64	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)	684,64	(0,00)
ReTA	350,14	229,19	(-120,95)	225,43	(-124,71)	221,05	(-129,09)	344,09	(-6,05)
AbAtm	155,65	131,04	(-24,61)	141,48	(-14,17)	149,19	(-6,46)	148,53	(-7,12)
AbSfc	178,85	324,41	(+145,56)	317,73	(+138,88)	314,41	(+135,56)	192,02	(+13,17)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,5114	0,3348	(-0,1766)	0,3293	(-0,1821)	0,3229	(-0,1885)	0,5026	(-0,0088)
α_{atm}	0,2274	0,1914	(-0,0360)	0,2067	(-0,0207)	0,2179	(-0,0095)	0,2169	(-0,0105)
α_{sfc}	0,2612	0,4738	(+0,2126)	0,4641	(+0,2029)	0,4592	(+0,1980)	0,2805	(+0,0193)

Table 13: **Caso low75.** Radiação de onda curta (W/m^2) incidente (InTA) e refletida (ReTA) no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera (AbAtm) e absorvida pela superfície (AbSfc) e frações de partição correspondentes ($\alpha_p = \text{ReTA}/\text{InTA}$, $\alpha_{atm} = \text{AbAtm}/\text{InTA}$ e $\alpha_{sfc} = \text{AbSfc}/\text{InTA}$) para atmosfera tropical, ângulo zenital solar de 75,4629 graus, albedo da superfície de 0,2 e uma nuvem na camada entre 3,5 e 4,0 km.

	LBLRTM	CPT-old		CPT-new		CLIRAD		UKMO	
<i>Fluxos(W/m^2):</i>									
InTA	343,42	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)	343,42	(0,00)
ReTA	194,83	149,64	(-45,19)	147,01	(-47,82)	144,00	(-50,83)	191,81	(-3,02)
AbAtm	83,07	69,73	(-13,34)	75,19	(-7,88)	78,82	(-4,25)	77,51	(-5,56)
AbSfc	65,52	124,04	(+58,52)	121,21	(+55,69)	120,60	(+55,08)	74,10	(+8,58)
<i>Frações de partição:</i>									
α_p	0,5673	0,4357	(-0,1316)	0,4281	(-0,1392)	0,4193	(-0,1480)	0,5585	(-0,0088)
α_{atm}	0,2419	0,2031	(-0,0388)	0,2190	(-0,0229)	0,2295	(-0,0124)	0,2257	(-0,0162)
α_{sfc}	0,1908	0,3612	(+0,1704)	0,3530	(+0,1622)	0,3512	(+0,1604)	0,2158	(+0,0178)

3.3 Sumário dos casos com nuvens

Inspeção na Tabela 14, que sumariza os resultados dos casos com nuvens, permite tirar algumas conclusões para os valores obtidos pelos diferentes códigos para cada termo da partição de ondas curtas.

Refletância no topo da atmosfera. Nuvem alta: para os quatro códigos, os erros aumentam com o ângulo zenital solar; os erros do CPTEC-old, do CPTEC-new e do CLIRAD têm valores próximos, sendo os do CLIRAD um pouco maiores do que os outros dois; os erros do UKMO são menores e não chegam à metade dos erros do CLIRAD. Nuvem baixa: os erros do CPTEC-old, do CPTEC-new e do CLIRAD têm mesma ordem de grandeza e pequena variação com o ângulo zenital solar; os erros do UKMO não variam com o ângulo zenital solar e são bem menores que os dos outros três códigos, ficando em torno de 5 a 6% dos erros do CLIRAD. Resumo: UKMO melhor para nuvem alta e muito melhor para nuvem baixa.

Absortância da atmosfera. Nuvem alta: para ângulos zenitais solares de 0° e 60° , CLIRAD e UKMO têm erros comparáveis e são melhores que CPTEC-old e CPTEC-new; para grandes ângulos zenitais solares, UKMO é melhor do que CLIRAD. Nuvem baixa: para sol a pino, CLIRAD é melhor do que CPTEC-old e CPTEC-new mas UKMO é melhor do que CLIRAD; para grandes ângulos zenitais solares, CLIRAD é melhor do que CPTEC-old e CPTEC-new e ligeiramente melhor do que UKMO. Resumo: em média, UKMO um pouco melhor do que CLIRAD.

Absortância da superfície. Nuvem alta: para os quatro códigos, os erros aumentam com o ângulo zenital solar. Os erros decrescem na ordem CPTEC-old, CPTEC-new, CLIRAD e UKMO, os erros do UKMO chegam a pouco mais da metade dos erros do CLIRAD. Nuvem baixa: Os erros decrescem ligeiramente de CPTEC-old para CPTEC-new e para CLIRAD; os erros do UKMO são bem menores ficando em torno de 10% dos erros do CLIRAD. Resumo: UKMO melhor para nuvem alta e muito melhor para nuvem baixa.

4 Extinção por aerossóis

Os códigos CPTEC-old e CPTEC-new não estão preparados para calcular a extinção de radiação por aerossóis. No CLIRAD, as propriedades de espalhamento simples dos aerossóis (espessura óptica, albedo para espalhamento simples e fator de assimetria) não são parametrizados e precisam, portanto, ser especificados, para cada camada e para cada banda espectral, como parâmetros de entrada, para que a extinção pelos aerossóis seja calculada. O UKMO já possui parametrizações (no arquivo espectral atualmente em uso no CPTEC) para 13 diferentes tipos de aerossóis. O coeficiente de absorção, o albedo para espalhamento simples e o fator de assimetria, para cada uma das bandas de absorção,

Table 14: Frações de partição da radiação de onda curta incidente entre radiação refletida no topo da atmosfera, absorvida pela atmosfera e absorvida pela superfície para os casos com nuvem. Para os códigos de banda larga são mostradas as diferenças em relação aos valores do código linha-a-linha, que aparecem na segunda coluna.

Caso	LBLRTM	CPT-old	CPT-new	CLIRAD	UKMO
<i>Refletância no topo da atmosfera:</i>					
high00	0,188	-0,007	-0,010	-0,005	+0,001
high60	0,288	-0,039	-0,043	-0,048	-0,016
high75	0,425	-0,086	-0,091	-0,104	-0,048
low00	0,387	-0,172	-0,176	-0,174	-0,009
low60	0,511	-0,177	-0,182	-0,189	-0,009
low75	0,567	-0,132	-0,139	-0,148	-0,009
<i>Absortância da atmosfera:</i>					
high00	0,210	-0,041	-0,027	-0,005	-0,006
high60	0,225	-0,036	-0,020	-0,007	-0,007
high75	0,212	-0,011	+0,006	+0,021	+0,004
low00	0,225	-0,048	-0,033	-0,022	-0,005
low60	0,227	-0,036	-0,021	-0,010	-0,011
low75	0,242	-0,039	-0,023	-0,012	-0,016
<i>Absortância da superfície:</i>					
high00	0,602	+0,048	+0,037	+0,020	+0,005
high60	0,487	+0,075	+0,063	+0,055	+0,023
high75	0,362	+0,097	+0,084	+0,083	+0,044
low00	0,388	+0,220	+0,209	+0,196	+0,014
low60	0,261	+0,213	+0,203	+0,198	+0,019
low75	0,191	+0,170	+0,162	+0,160	+0,018

estão disponíveis para 9 tipos (*water soluble, dust-like, oceanic, soot, sulphuric acid, fresh soot, aged soot, biomass 1, biomass 2*) e os mesmos parâmetros, para cada banda de absorção e para 21 valores de umidade relativa (0 a 1 em intervalos de 0,05), estão disponíveis para 4 tipos (*accumulation mode sulphate, Aitken mode sulphate, NaCl film mode, NaCl jet mode*). Para se obter a espessura óptica total dos aerossóis em cada banda é necessário fornecer ao código as razões de mistura dos aerossóis em cada camada do modelo.

O que existe no momento já implantado, tanto para o CLIRAD quanto para o UKMO, é uma climatologia simplificada de aerossóis seguindo o trabalho de Cusack et al. (1998). Apenas dois perfis são usados, um para os pontos de grade sobre oceano ou gelo e outro para os pontos sobre o continente. Cada perfil é dividido em três regiões (camada limite, troposfera e estratosfera) com diferentes combinações dos cinco tipos básicos de aerossol da climatologia da WMO (WMO, 1982, 1983): *water-soluble, dust, soot, oceanic* e *stratospheric sulphates*.

O AER forneceu resultados obtidos com LBLRTM+CHARTS para oito casos, para céu claro com aerossóis, que se diferenciam pelo tipo de aerossol e sua distribuição vertical, pelo albedo de superfície e pelo ângulo solar zenital. Os tipos de aerossol são especificados pelo expoente de Ångström, pela espessura óptica em $1 \mu\text{m}$, pelo albedo para espalhamento simples e pelo fator de assimetria.

A princípio é possível comparar os resultados do CLIRAD e do UKMO para esses casos com aerossóis, o que exige alterações e testes cuidadosos em ambos os códigos, mas isso ainda não foi feito. Desse modo, as conclusões apresentadas nesse documento só levarão em conta os resultados acima descritos para extinção por gases (Seção 2) e por nuvens (Seção 3), além de outras considerações práticas feitas na Seção 5.

5 Outras características dos códigos

Além do que acaba de ser descrito na Seção 4, mostrando que, em relação à extinção por aerossóis, o UKMO está mais avançado que o CLIRAD, desde que sejam fornecidos ao modelo os campos tridimensionais da concentração de diversos tipos de aerossol, há outras considerações oportunas.

Arquivo espectral. O código UKMO é bastante flexível quanto ao número de bandas em que o espectro solar pode ser dividido, quais os gases podem ser considerados, quais formulações de *continuum* a serem usadas, quais as parametrizações a serem usadas para as nuvens, quais os aerossóis e respectivas parametrizações podem ser considerados. Todas essas informações são armazenadas num chamado “arquivo espectral” que está fora do código, o que permite atualizações sem necessidade de recompilação. Um programa para atualizar o arquivo espectral a partir de informações lidas diretamente de bases de dados espectroscópicos faz parte do pacote de programas fornecidos ao CPTEC pelo UK Met Office.

Desconheço os procedimentos para atualizar no CLIRAD informações espectroscópicas e formulações do *continuum*.

Radiâncias. Os códigos de radiação geralmente calculam fluxos de radiação e taxas de aquecimento que são usados na integração dos modelos em que estão inseridos. Existe entretanto outra possível aplicação desses códigos na validação de modelos de circulação geral. Consiste em obter, com o código de radiação, as radiâncias que seriam “vistas” por um canal específico de um determinado satélite. Comparações entre essa radiância calculada e a observada têm sido usadas com uma ferramenta de validação de modelos. Para isso é necessário que o código de radiação seja capaz de calcular radiâncias, além de fluxos e taxas de aquecimento. Dos quatro códigos em comparação, apenas o UKMO já está pronto para gerar radiâncias e já foi usado para o objetivo específico de validação do modelo unificado do UK Met Office por comparação entre radiâncias simuladas e observadas (Ringer et al., 2003).

BRDF (*Bidirectional Reflection Distribution Function*). Os códigos de radiação usualmente consideram a superfície com reflexão lambertiana (a intensidade da radiação refletida é independente da direção). Desse modo, é necessário fornecer valores do albedo da superfície. Em geral, os códigos estão preparados para lidar com diferentes valores de albedo para quatro tipos de radiação de ondas curtas (difusa e direta no UV+visível, difusa e direta no infravermelho próximo) na especificação do tipo de superfície. Isso é o que fazem os quatro códigos que estão sendo comparados aqui. O UKMO, entretanto, já é também capaz de lidar com superfícies definidas em termos de BRDFs (*Bidirectional Reflection Distribution Function*), funções que relacionam a radiação refletida em qualquer direção com a radiação incidente em qualquer direção.

Superfícies heterogêneas. O código UKMO tem a possibilidade de considerar a superfície, em cada ponto de grade, como sendo formada de três frações (continente, mar e gelo marítimo), cada qual com seus diferentes albedos. A radiação refletida pode então ser calculada com maior acurácia combinando-se as frações refletidas por cada tipo de superfície. A nota técnica de Chou and Suarez (1999) não menciona que o CLIRAD tenha funcionalidade semelhante.

Taxas de fotólise. Além de fluxos e radiâncias, o UKMO também calcula taxas de fotólise, o que, salvo engano, não é o caso dos outros códigos.

6 Conclusões

O primeiro objetivo desse documento é divulgar para a comunidade de modelagem do CPTEC alguns aspectos do estado atual dos trabalhos em desenvolvimento na área de parametrização da transferência radiativa no modelo global. Está focalizado nos dois códigos de ondas curtas recentemente implantados, CLIRAD-SW-M e UKMO-SW. O segundo objetivo é contribuir com informações úteis para embasar a

tomada de decisão que o CPTEC deverá fazer num futuro próximo sobre qual dos dois códigos deverá substituir operacionalmente o atual CPTEC-new.

As conclusões a que pude chegar, e que resumirei abaixo, se baseiam nos resultados numéricos e considerações que apresentei nas Seções anteriores. Considerando que, para o progresso de uma instituição como o CPTEC, a cooperação é muito mais valiosa do que a competição, acredito ser importante que outros profissionais que têm trabalhado na implantação desses códigos externem suas considerações técnicas e também que outros envolvidos nos problemas de modelagem (os membros do Comitê de Modelagem e quem mais possa contribuir) apresentem a sua visão de questões práticas e problemas mais amplos que me escaparam à consideração. Considero as conclusões curtas e resumidas que apresento abaixo como o primeiro passo de uma conversa a ser continuada. Todos os programas e valores de referência que utilizei para obter os números mostrados nesse documento estão à disposição de quem porventura se interessar.

CLIRAD x UKMO. Em resumo, a conclusão principal da Seção 2 é que o UKMO é melhor do que o CLIRAD para simular os fluxos de ondas curtas em condições de céu claro e limpo. A conclusão principal da Seção 3 é que o UKMO é melhor do que o CLIRAD para simular os fluxos de ondas curtas na presença de nuvens altas e incomparavelmente melhor do que o CLIRAD se nuvens baixas estiverem presentes. A conclusão principal da Seção 4 é que o UKMO está à frente do CLIRAD quanto à parametrização da extinção de ondas curtas por aerossóis. A conclusão principal da Seção 5 é que o UKMO tem diversas características e funcionalidades, desejáveis em um código de radiação, que o CLIRAD no momento não tem. Assim, para que o CPTEC continue seu progresso em direção à meta de equiparar-se aos grandes centros de modelagem mundiais, no aspecto de modelagem de transferência radiativa, o código que reúne hoje as melhores condições para substituir o atual código operacional do modelo global do CPTEC é o código UKMO.

References

- Barbosa, H. M. J. and T. A. Tarasova, 2006: New solar radiation parameterization in CPTEC/COLA GCM. *Proceedings of 8 ICSHMO*, INPE, ed., 493–494, Foz do Iguaçu, Brazil.
- Barker, H. W., G. L. Stephens, P. T. Partain, J. W. Bergman, B. Bonnel, K. Campana, E. E. Clothiaux, S. Clough, S. Cusack, J. Delamere, J. Edwards, K. F. Evans, Y. Fouquart, S. Freidenreich, V. Galin, Y. Hou, S. Kato, J. Li, E. Mlawer, J.-J. Morcrette, W. O’Hirok, P. Räisänen, V. Ramaswamy, B. Ritter, E. Rozanov, M. Schlesinger, K. Shibata, P. Sporyshev, Z. Sun, M. Wendish, N. Wood, and F. Yang, 2003: Assessing 1D atmospheric solar radiative transfer models: Interpretation and handling of unresolved clouds. *J. Climate*, **16**, 2676–2699.

- Cavalcanti, I. F. A., J. A. Marengo, P. Satyamurty, C. A. Nobre, I. Trosnikov, J. P. Bonatti, A. O. Manzi, T. Tarasova, L. P. Pezzi, C. D’Almeida, G. Sampaio, C. C. Castro, M. B. Sanches, and H. Camargo, 2002: Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM. *J.Climate*, **15**, 2965–2988.
- CCM3, 2004: TN-420 description of the NCAR Community Climate Model. <http://www.cgd.ucar.edu/cms/ccm3/TN-420/>.
- Chagas, J. C. S. and H. M. J. Barbosa, 2006: Impact of UKMO’s shortwave scheme on CPTEC’s global model. *The 12th Conference on Atmospheric Radiation*, American Meteorological Society, Madison, Wisconsin, USA.
- Chagas, J. C. S., M. Malagutti, and P. Nobre, 2004: Modificações no esquema de radiação do modelo global do CPTEC. *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Sociedade Brasileira de Meteorologia, Fortaleza, Ceará.
- Chou, M. D. and M. J. Suarez, 1999: A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) for atmospheric studies. Technical report, NASA, TM-1999-104606, 40 pp, series on Global Modeling and Data Assimilation, **15**.
- Clough, S. A. and M. J. Iacono, 1995: Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates, 2, Application to carbon dioxide, ozone, methane, nitrous oxide, and the halocarbons. *J.Geophys.Res.*, **100**, 16519–16535.
- Clough, S. A., M. J. Iacono, and J.-L. Moncet, 1992: Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *J.Geophys.Res.*, **97**, 15761–15785.
- Clough, S. A., F. X. Kneizys, and R. W. Davies, 1989: Line shape and the water vapor continuum. *Atmos.Res.*, **23**, 229–241.
- Clough, S. A., M. W. Shephard, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, M. J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukbarara, and P. D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. *J.Quant.Spec.Radiat.Transf.*, **91**, 233–244.
- Cusack, S., A. Slingo, J. M. Edwards, and M. Wild, 1998: The radiative impact of a simple aerosol climatology on the Hadley Centre atmospheric GCM. *Quart.J.Roy.Meteorol.Soc.*, **124**, 2517–2526.
- Edwards, J. M. and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large-scale model. *Q.J.Roy.Meteorol.Soc.*, **122**, 689–719.
- Fomin, B. and Y. Gershonov, 1996: Tables of the benchmark calculations of atmospheric fluxes for the ICRCCM test cases, Part II: Short-wave results. Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia, volume IAE-5990/1, 42pp.
- Fomin, B., A. N. Rublev, and A. N. Trotsenko, 1993: Line-by-line procedures to compute radiative transfer parameters in scattering atmosphere. *IRS’92: Currente Problems in Atmospheric Radiation*, S. Keevalik and O. Warner, eds., A. Deepak Publishing, Hampton, VA, USA, 524–527.

- Fomin, B. A., 1995: Effective interpolation technique for line-by-line calculations of radiation absorption in gases. *J.Quant.Spec.Radiat.Transf.*, **53**, 663–669.
- Fomin, B. A., S. V. Romanov, and A. N. Trotsenko, 1994: Benchmark calculations of solar radiation transfer characteristics in a clear, clean atmosphere by the method of direct integration (In Russian). *Izv.Russ.Acad.Sci.Atmos.Oceanic Phys.*, **29**, 50–59.
- Fouquart, Y., B. Bonnel, and V. Ramaswamy, 1991: Intercomparing shortwave radiation codes for climate studies. *J.Geophys.Res.*, **96**, 8955–8968.
- Kurucz, T. L., 1992: Synthetic infrared spectra. *Infrared Solar Physics, IAU Symp.*, D. M. Rabin and J. T. Jefferies, eds., Kluwer, Acad., Norwell, Massachusetts.
- Luther, F. M., R. G. Ellingson, Y. Fouquart, S. Fels, N. A. Scott, and W. J. Wiscombe, 1988: Intercomparison of radiation codes in climate models (ICRCCM): longwave clear-sky results — a workshop summary. *Bull.Am.Meteorol.Soc.*, **69**, 40–48.
- Mlawer, E. J., D. Tobin, and S. A. Clough, 2004: A new water vapor continuum model: MT_CKD_1.0. In preparation.
- Moncet, J.-L. and S. A. Clough, 1997: Accelerated monochromatic radiative transfer for scattering atmospheres: Application of a new model to spectral radiance observations. *J.Geophys.Res.*, **102**, 21853–21866.
- Ringer, M. A., J. M. Edwards, and A. Slingo, 2003: Simulation of satellite channel radiances in the Met Office Unified Model. *Q.J.R.Meteorol.Soc.*, **129**, 1169–1190.
- Rothman, L. S., A. Barbe, D. C. Benner, L. R. Brown, C. Camy-Peyret, M. R. Carleer, K. Chance, C. Clerbaux, V. Dana, V. M. Devi, A. Fayt, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, D. Jacquemart, K. W. Jucks, W. J. Lafferty, J.-Y. mandin, S. T. Massie, V. Nemtchinov, D. A. Newnham, A. Perrin, C. P. Rinsland, J. Schroeder, K. M. Smith, M. A. H. Smith, K. Tang, R. A. Toth, J. V. Auwera, P. Varanasi, and K. Yoshino, 2003: The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001. *J.Quant.Spec.Radiat.Transf.*, **82**, 5–44.
- Rothman, L. S., R. R. Gamache, R. H. Tipping, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, D. C. Benner, V. M. Devi, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Perrin, A. Goldman, S. T. Massie, L. R. Brown, and R. A. Toth, 1992: The HITRAN molecular database: editions of 1991 and 1992. *J.Quant.Spec.Radiat.Transf.*, **48**, 469–507.
- Rothman, L. S., D. Jacquemart, A. Barbe, D. C. Benner, M. Birk, L. R. Brown, M. R. Carleer, C. C. Jr, K. Chance, L. H. Coudert, V. Dana, V. M. Devi, J.-M. Flaud, R. R. Gamache, A. Goldman, J.-M. Hartmann, K. W. Jucks, A. G. Maki, J.-Y. Mandin, S. T. Massie, J. Orphal, A. Perrin, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, J. Tennyson, R. N. Tolchenov, R. A. Toth, J. V. Auwera, P. Varanasi, and G. Wagner, 2005: The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database. *J.Quant.Spec.Radiat.Transf.*, **96**, 139–204.

- Rothman, L. S., C. P. Rinsland, A. Goldman, S. T. Massie, D. P. Edwards, J.-M. Flaud, A. Perrin, C. Camy-Peyret, V. Dana, J.-Y. Mandin, J. Schroeder, A. McCann, R. R. Gamache, R. B. Watson, K. Yoshino, K. V. Chance, K. W. Jucks, L. R. Brown, V. Nemtchinov, and P. Varanasi, 1998: The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS (HITRAN atmospheric workstation): 1996 edition. *J. Quant. Spec. Rad. Trans.*, **60**, 665–710.
- Tarasova, T. and B. Fomin, 2000: Solar radiation absorption due to water vapor: Advanced broadband parameterizations. *J. Appl. Met.*, **39**, 1947–51.
- Tarasova, T. A., J. P. R. Fernández, I. A. Pisnichenko, J. A. Marengo, J. C. Ceballos, and M. J. Bottino, 2006: Impact of new solar radiation parameterization in the Eta model on the simulation of summer climate over South America. *J. Appl. Met.*, **45**, 318–333.
- WMO, 1982: Report of the meeting of JSC experts on aerosol and climate. Technical report, World Meteorological Organization, WCP-12.
- 1983: Report of the experts meeting on aerosol and their climatic effects. Technical report, World Meteorological Organization, WCP-55.
- 1986: Atmospheric Ozone 1985, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. Technical report, World Meteorological Organization, Report No. 16, Geneva.