



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## MODELAGEM NUMÉRICA DE PROCESSOS FÍSICOS NA ATMOSFERA (PQ020)



### SUA PROVA

- Além deste caderno contendo **5 (cinco)** questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



### TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



### NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



### INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**



### QUESTÃO 1

As interações entre aerossóis, nuvens e radiação são fontes importantes de incerteza nas projeções das mudanças climáticas globais. Essas interações são resultantes do espalhamento e absorção de radiação solar e terrestre pelos aerossóis, alterando o albedo planetário.

As mudanças no albedo das nuvens, decorrentes da atuação dos aerossóis como núcleos de condensação (CCN) ou núcleos de gelo (IN) em nuvens, também são fontes destas incertezas. Além disso, a mudança no albedo das nuvens também pode afetar o albedo da superfície terrestre. Todos os referidos processos alteram o balanço de radiação da Terra e têm ramificações importantes no clima regional e em escala global, afetando os padrões de precipitação, circulação atmosférica e variabilidade climática em todo o globo.

Os aerossóis atmosféricos, portanto, são considerados forçantes do clima devido ao seus efeitos sobre o equilíbrio radiativo da Terra. Seu impacto é quantificado pela forçante radiativa efetiva (ERF), medida em W/m². Os aerossóis provenientes da queima de biomassa, como o carbono negro (BC), têm uma ERF positiva, enquanto outros compostos têm uma ERF negativa. Globalmente, estima-se que os aerossóis de queimadas tenham uma ERF média de aproximadamente -1,1 [-1,7 a -0,4] W/m². No entanto, os efeitos regionais podem ser diferentes da média global.

A) Considere que o albedo total de duas camadas atmosféricas sobrepostas pode ser obtido a partir da seguinte equação:

$$A_T = A_M + A_0(1 - A_M)^2 + A_0^2 A_M(1 - A_M)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} A_0^{n+1} A_M^n (1 - A_M)^2 \tag{1}$$

em que  $A_T$  é o albedo total e  $A_M$  e  $A_0$  são os albedos da camada superior e inferior, respectivamente. Suponha que a Terra sem cobertura de nuvens tenha o albedo  $A_0 = 0,13$  e que 30% da Terra está coberta por nuvens com albedo  $A_M = 0,6$ .

**A<sub>1</sub> Calcule o albedo planetário total  $A_T$  (Trunque os cálculos na equação 1 em  $n = 2$ ).**

**A<sub>2</sub> Discuta o(s) valor(es) encontrado(s).**

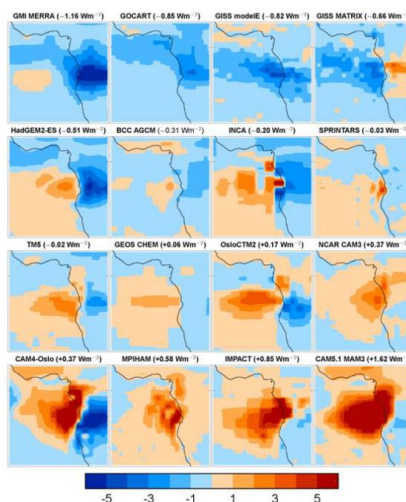
B) A mudança no albedo planetário,  $\Delta R_p$ , resultante da presença de uma camada de aerossóis, determina se a forçante sobre o balanço radiativo será negativa (efeito de resfriamento) ou positiva (efeito de aquecimento). Existe um valor crítico de *single-scattering* albedo ( $\omega$ ) em que  $\Delta R_p = 0$  que define o limite entre a ocorrência de resfriamento ou aquecimento.

**B<sub>1</sub> Derive uma expressão para  $\omega$  quando  $\Delta R_p = 0$  e explique como a variação no albedo planetário devido a uma camada de aerossóis determina se o efeito será de resfriamento ou aquecimento.**

**B<sub>2</sub> Considere o papel de  $\omega$  e discuta como as propriedades de absorção e espalhamento dos aerossóis podem afetar o albedo planetário em diferentes superfícies.**

Para fins de simplificação, considere um feixe de radiação solar direta incidindo em uma camada hipotética, em um ângulo solar zenital  $\theta_0 = 0^\circ$ , com uma profundidade óptica dos aerossóis  $\tau \ll 1$  e fração do feixe incidente transmitido através da camada  $e^{-\tau}$ . Considere também que a fração refletida de volta para o espaço na direção do feixe é  $r = (1 - e^{-\tau})\omega\beta$ , em que  $\beta$  é a fração da luz que é espalhada por uma partícula na direção oposta à superfície terrestre, e que a fração total da radiação incidente na camada que é transmitida para baixo é  $t = e^{-\tau} + \omega(1 - \beta)(1 - e^{-\tau})$ . A mudança no albedo planetário como resultado da presença de uma camada de aerossóis é dada pela expressão  $\Delta R_p = \left[ r + \frac{t^2 R_s}{1 - R_s r} \right] - R_s$ , em que  $R_s$  é o albedo da superfície terrestre subjacente.

C) A maior fonte global de aerossóis de queimadas (*Biomass Burning Aerosol – BBA*) é o continente africano, que contribui atualmente com cerca de 2–29 Tg de carbono por ano, e o Oceano Atlântico Sudeste (OAS) é uma região altamente sensível aos efeitos radiativos do BBA. A forçante radiativa média devido ao efeito direto do BBA simulada por 16 modelos do projeto AeroCom (Myhre et al., 2013) sobre o OAS é mostrada na Figura 1.



**Figura 1 –** Forçante radiativa média devido ao efeito direto dos aerossóis simulada pelos 16 modelos do projeto AeroCom, média para os meses de agosto a setembro sobre o Atlântico Sudeste e parte do Continente Africano adjacente, ordenada pela diferença média regional e anual da média do conjunto. As unidades estão em W/m². O modelo que apresenta uma forçante radiativa mais negativa está no canto superior esquerdo, enquanto que aquele com forçante radiativa mais positiva está no canto inferior direito (Fonte: Zuidema et al., 2016).

**Com base na Figura 1, explique as razões pelas quais há uma grande variabilidade entre os resultados apresentados pelos 16 diferentes modelos do projeto AeroCom, com implicações para o albedo planetário. Por fim, descreva como os modelos climáticos podem ser aprimorados para representar com maior confiabilidade o efeito radiativo direto dos aerossóis, com implicações para a redução das incertezas na simulação do efeito do impacto dos aerossóis sobre o albedo planetário. Seria possível inferir, com base na Figura 1, outro efeito relacionado à interação aerossol-radiação que ocorre como um ajuste rápido ao efeito direto dos aerossóis? Explique sua resposta.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

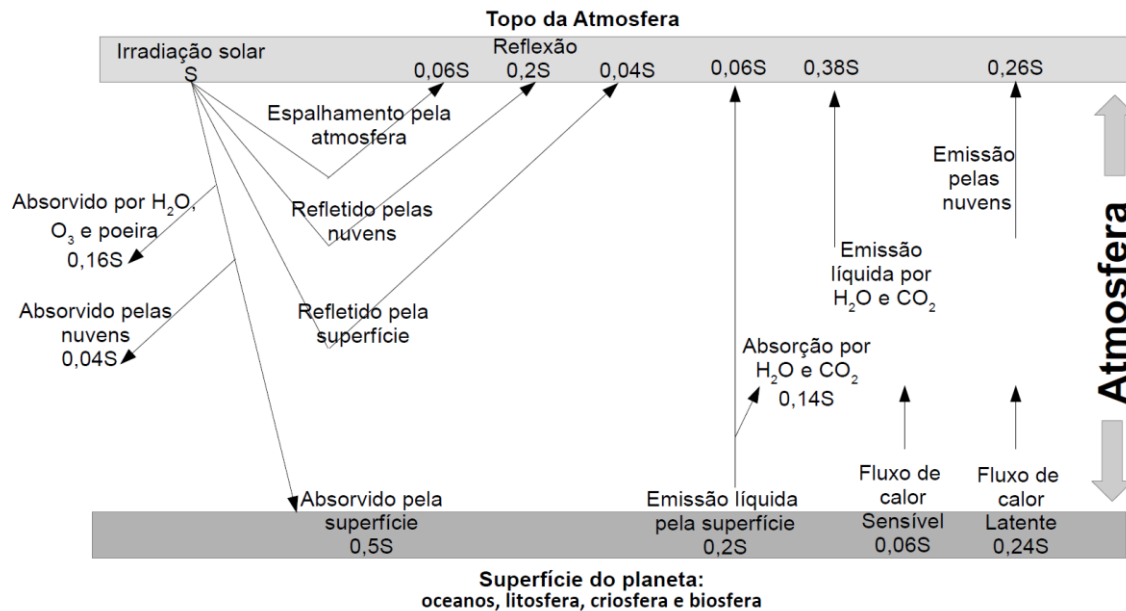
60

---

## QUESTÃO 2

Essencialmente, toda a energia que entra na atmosfera é provida do sol, uma vez que a condução de energia na forma de calor do núcleo para a superfície é desprezível. Do total de radiação que chega no topo da atmosfera, por meio da irradiação solar, parte é absorvida, parte é espalhada e parte é refletida pelos diversos gases que compõem a atmosfera, aerossóis e nuvens. A porção da radiação que consegue atravessar a atmosfera e chega à superfície é, em grande parte, absorvida pelos oceanos, litosfera, criosfera e biosfera e ainda, uma pequena parte é refletida. Pelo fato de a Terra ser um corpo com temperatura acima do zero absoluto, ela também emite uma certa quantidade de radiação. Tal emissão é que garante o estado de quase-equilíbrio entre a energia absorvida e emitida pelo planeta.

Considere a figura a seguir.



(Adaptado de Peixoto e Oort, 1992, p. 94)

O diagrama ilustra o balanço global de radiação, em que a atmosfera recebe em seu topo uma quantidade S de energia. A partir disso, responda aos itens a seguir.

- A) Em termos dos comprimentos de onda, como se caracteriza a radiação envolvida nos processos da Parte A e da Parte B do diagrama? Por que há essa diferença?
- B) Como se denomina e se define este montante de energia S recebido no topo da atmosfera. Se ele for expresso em termos de fluxo radiativo, qual o seu valor aproximado?
- C) Defina o que é albedo. A partir dos valores expressos no diagrama, determine o albedo médio do sistema Terra-Atmosfera.
- D) Esse sistema está em equilíbrio? Justifique.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----



### QUESTÃO 3

Uma parametrização física em modelagem numérica relaciona o efeito médio de um processo físico de sub-grade às variáveis resolvidas na grade do modelo numérico, geralmente com base em observações. O objetivo da parametrização de radiação é determinar os fluxos radiativos (ondas curtas e longas) à superfície, no topo da atmosfera e na coluna vertical atmosférica.

Em relação à parametrização da radiação, responda aos itens a seguir.

- A) Qual é a relação (maior, menor ou igual) entre as taxas de aquecimento na atmosfera ( $\partial T/\partial t$ ) associadas aos processos radiativos e os advectivos + úmidos (condensação) nas escalas de tempo e clima?
- B) Na Figura 1 são apresentados os perfis das taxas de aquecimento devido à transferência de ondas longas simulada por um modelo global para uma atmosfera tropical com céu claro. O espectro de ondas longas é dividido em seis regiões ou bandas espectrais ( $\text{cm}^{-1}$ ), a saber: 1) 0 – 350 & 1450 – 1880; 2) 500 – 800; 3) 800 – 970 & 1110 – 1250; 4) 970 – 1110; 5) 350 – 500; 6) 1250 – 1450 & 1880 – 2820, correspondendo aos centros das bandas de rotação e vibração-rotação de vapor d’água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), da banda de  $15\mu\text{m}$  de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), a janela atmosférica, da banda  $9,6\mu\text{m}$  do ozônio ( $\text{O}_3$ ), a região da “janela”  $25\mu\text{m}$  e as asas da banda de vibração e rotação de  $\text{H}_2\text{O}$ , respectivamente.

Descreva os efeitos observados para cada banda associados aos constituintes atmosféricos.

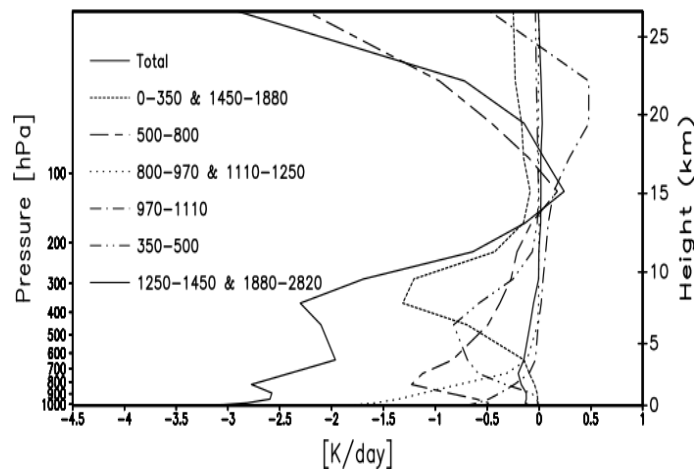


Figura 1 – Band & Total LW heating rate Tropical Atmosphere

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 4

---

A equação geral de transferência radiativa (ETR) é aquela que considera e descreve a ocorrência de todos os processos de interação sofridos pela radiação ao atravessar um meio opticamente ativo como a atmosfera terrestre. Com base na ETR, é possível determinar a mudança líquida na intensidade da radiação à medida que ela percorre uma determinada distância na atmosfera. A radiação resultante (saldo) ao longo da atmosfera condiciona tanto a circulação atmosférica de larga escala como fenômenos de pequena escala. Dessa forma, a representação e determinação adequada dos processos radiativos por meio da ETR são pré-requisitos para um bom desempenho dos modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT).

Dada a importância dos processos de transferência radiativa na atmosfera para prever o tempo, responda aos itens a seguir.

- A) Descreva os processos retratados pela ETR e os seus respectivos termos, a fim de avaliar as interações sofridas pela radiação e determinar seu saldo ao atravessar um volume da atmosfera terrestre.**
- B) Compare os espectros de emissão solar e terrestre e explique os processos que são levados em conta na ETR para o cálculo da propagação da radiação solar e da radiação terrestre. No caso da radiação terrestre, assuma uma atmosfera sem nuvens e sem aerossóis.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 5

---

A modelagem dos processos radiativos na atmosfera está entre as partes mais complexas e computacionalmente intensivas de todos os modelos físicos. É difícil construir uma parametrização que seja rápida e precisa para calcular a transferência radiativa.

Por razões de eficiência computacional, os modelos atmosféricos globais e regionais geralmente utilizam parametrizações para calcular a transferência radiativa. Inúmeras simplificações e aproximações são feitas nessas parametrizações.

Diante dessas considerações:

- A) Descreva os métodos de distribuição-k e correlação da distribuição-k utilizados nos Modelos de Transferência Radiativa (MTR) da atmosfera terrestre, e indique como eles se mostram nos cálculos de transferência radiativa, em comparação com os métodos Linha-  
Por-Linha (LPL).**
- B) Explique como o método da correlação da distribuição-k considera a variação vertical de propriedades atmosféricas e o tratamento das várias espécies de gases nos MTR.**
- C) Discorra sobre quais considerações na configuração das parametrizações de MTR devem ser levadas em conta na aplicação dos modelos meteorológicos (curto prazo) e climáticos (longo prazo).**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35



36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----





Realização

