



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.21.13.52-RPQ

BALANÇO DE ENERGIA: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE EM MODELO ITERATIVO

Meiriele Alvarenga Cumplido
Raiane Aparecida Lopes Neves
Rita de Cassya Almeida Sousa

CST-323: Introdução à Modelagem
do Sistema Terrestre Professora:
Dra. Mariane Coutinho

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4ADR2US>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/12.21.13.52-RPQ

BALANÇO DE ENERGIA: ANÁLISES DE SENSIBILIDADE EM MODELO ITERATIVO

Meiriele Alvarenga Cumplido
Raiane Aparecida Lopes Neves
Rita de Cassya Almeida Sousa

CST-323: Introdução à Modelagem
do Sistema Terrestre Professora:
Dra. Mariane Coutinho

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4ADR2US>

INPE
São José dos Campos
2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Sumário

1.	Apresentação do Trabalho	3
2.	Modelo Iterativo de Balanço de Energia.....	3
3.	Resultados do Modelo Iterativo	4
3.1.	Fração da Constante Solar	5
3.2.	Coefficiente de Transporte (C)	7
3.3.	Constante de Perda de Radiação de Onda Longa (B)	10

1. Apresentação do Trabalho

O presente trabalho faz uso de um Modelo de Balanço de Energia (*Energy Balance Model – EBM*), iterativo, para avaliar o seu comportamento em consequência de variações em alguns dos parâmetros de entrada. Variações em tais parâmetros permitem responder às perguntas listadas no quadro resumo do Anexo 1, que contempla análises de sensibilidade. Neste quadro há referências para as respostas ao longo do presente documento, tanto para parágrafos discursivos quanto para gráficos elaborados (a partir de dados/informações resultantes da execução do modelo) para suportar as análises.

2. Modelo Iterativo de Balanço de Energia

O modelo iterativo de Balanço de Energia encontra-se disponível em <http://www.shodor.org/master/environmental/general/energy/energy.html>. Na Figura 1 é possível visualizar os parâmetros de entrada do modelo. Dentre eles, tem-se:

- $A \rightarrow$ constante que define a perda de radiação de onda longa, em unidade de W/m^2 ;
- $B \rightarrow$ outra constante que define a perda de radiação de onda longa, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- $C \rightarrow$ coeficiente de transporte, em unidade de $W/m^2 \cdot ^\circ C$;
- $S \rightarrow$ radiação anual média incidente em uma latitude particular, em W .
- Critical Temperature \rightarrow temperatura crítica, em $^\circ C$, na qual a terra fica coberta de neve e/ou a água se transforma em gelo;
- Initial Temp \rightarrow temperatura inicial da superfície, em $^\circ C$, em uma determinada latitude ou zona.

A latitude é dada em graus Norte e representa o meio de uma determinada zona (por exemplo: para a zona entre 80-90 graus Norte, tem-se a latitude 85 graus Norte). O albedo de nuvens e de gelo, bem como a constante solar e a fração dessa constante, também são definidas como entradas do modelo.

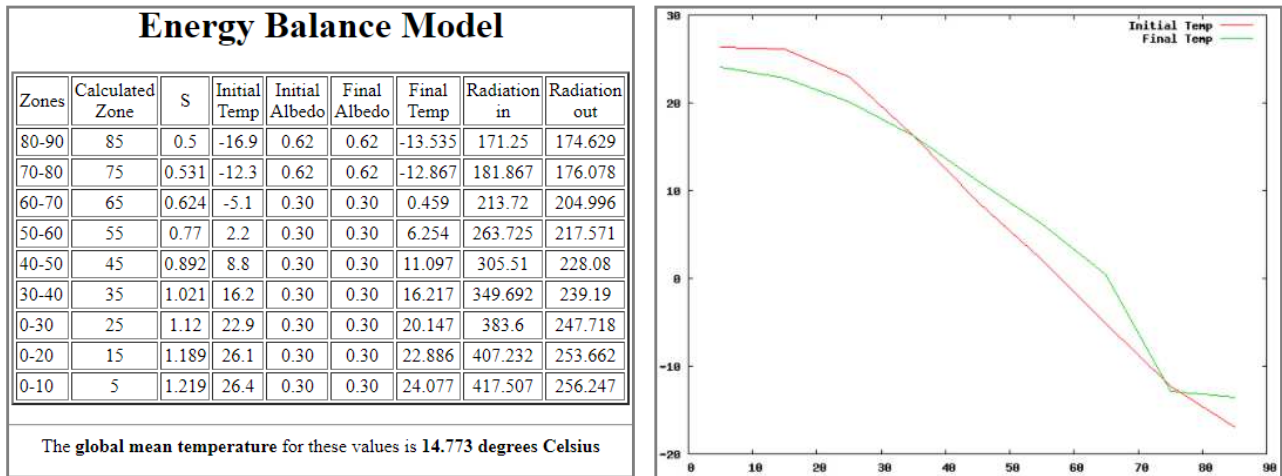
Ao executar o modelo iterativo (pressionando o botão *RUN EBM* disponível no link), após definidos os valores das entradas, o modelo responderá com informações como as que constam na Figura 2: uma tabela com valores estipulados para S , valores iniciais e finais para albedo e temperatura, valores de radiação de entrada e saída; cada um desses valores para cada uma das zonas e latitudes correspondentes. Além dessa tabela, a temperatura média global e um gráfico com curvas de temperatura inicial e temperatura final (em $^\circ C$) para cada latitude ou zona também são impressos como saídas do modelo.

Figura 1: Entradas do modelo iterativo de Balanço de Energia.

Input Values for Energy Balance Model	
Number of iterations: 24	A (longwave radiation loss, in watts-m ²): 204.0
B (longwave radiation loss, in watts-m ² C ⁻¹): 2.17	C (transport coefficient, in watts-m ⁻² -degrees C ⁻¹): 3.87
Cloud Albedo: 0.30	Ice Albedo: 0.62
Critical Temperature (in degrees Celsius): -10.0	Fraction Solar Constant: 1.0
Solar Constant: 1370	

ZONE	S (annual radiation)	Initial Temp
80-90	0.500	-16.9
70-80	0.531	-12.3
60-70	0.624	-5.1
50-60	0.770	2.2
40-50	0.892	8.8
30-40	1.021	16.2
20-30	1.120	22.9
10-20	1.189	26.1
0-10	1.219	26.4

Figura 2: Saídas do modelo iterativo de Balanço de Energia.



Nota: os valores mostrados nas figuras acima são os valores padrão (*default*) do modelo.

3. Resultados do Modelo Iterativo

Utilizando-se do modelo iterativo descrito no tópico anterior, neste são apresentadas as análises e respostas para as questões do Anexo 1, dividindo-as em subtópicos denominados: 3.1. Fração da Constante Solar; 3.2. Coeficiente de Transporte (C); e 3.3. Constante de Perda de Radiação de Onda Longa (B).

3.1. Fração da Constante Solar

Adotando-se os valores *default* para os parâmetros de entrada e efetuando-se alterações apenas no valor da fração da constante solar, pode-se notar que, quando estipulado o valor de 0,817 para essa fração, todas as zonas alcançam temperatura da superfície em ou abaixo da temperatura crítica de -10°C , o que denota que o hemisfério “congelou”.

A Tabela 1 mostra a alteração progressiva no valor da fração da constante solar, partindo-se de 1,00 até o valor de 0,80, em intervalos de 0,05, e o valor de temperatura final em cada latitude para as variações na fração. Devido à mudança “abrupta” de temperatura entre 0,85 e 0,80 (análise de sensibilidade adiante), valores mais “refinados” foram considerados como entrada até se encontrar a fração na qual temperaturas nas latitudes mais baixas fossem próximas à temperatura crítica. Dessa forma, com a fração em 0,817, a temperatura final na latitude 5° é de, aproximadamente, -10°C e a temperatura média global é de quase -25°C .

Tabela 1: Temperatura final por latitude e temperatura média global com variações na fração da constante solar.

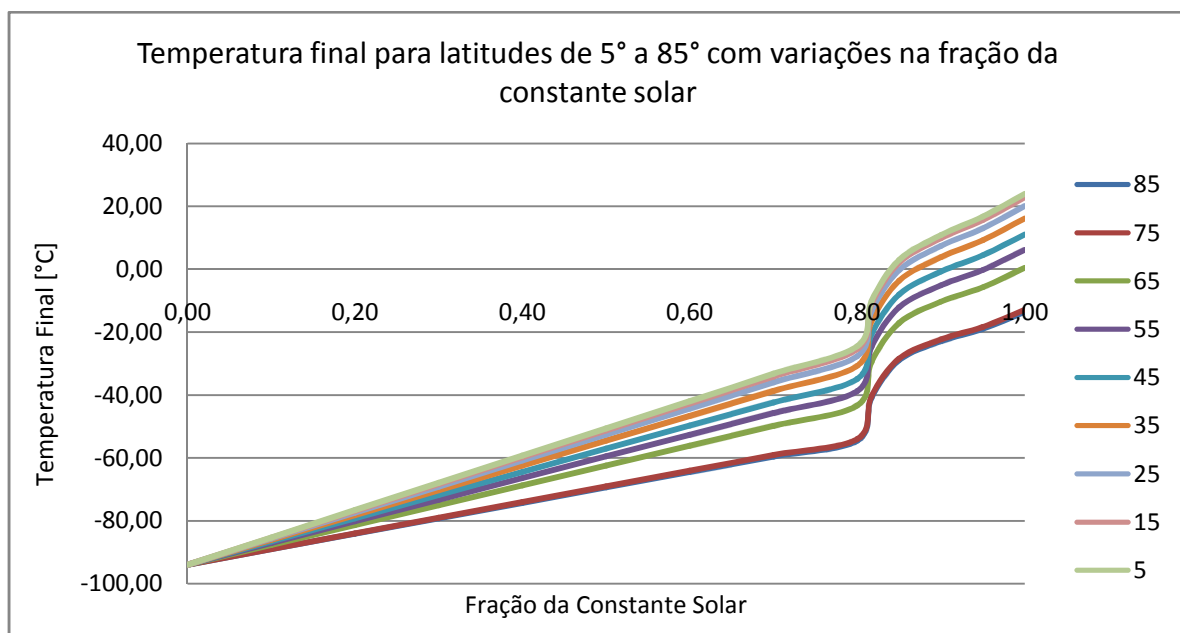
Fração da Constante Solar →		1,00	0,95	0,90	0,85	0,817	0,80
Zona	Zona calculada (Latitude)	Temperatura Final [$^{\circ}\text{C}$]					
80-90	85	-13,535	-18,971	-22,921	-28,977	-40,856	-54,524
70-80	75	-12,867	-18,337	-22,319	-28,409	-40,311	-53,989
60-70	65	0,459	-5,676	-10,325	-17,082	-29,422	-43,328
50-60	55	6,254	-0,171	-5,109	-12,156	-24,688	-38,691
40-50	45	11,097	4,429	-0,751	-8,039	-20,731	-34,817
30-40	35	16,217	9,293	3,856	-3,687	-16,548	-30,721
0-30	25	20,147	13,027	7,393	-0,347	-13,337	-27,577
0-20	15	22,886	15,628	9,858	1,980	-11,100	-25,386
0-10	5	24,077	16,760	10,930	2,992	-10,127	-24,433
Temperatura Média Global [$^{\circ}\text{C}$] →		14,773	7,129	1,806	-6,806	-24,791	-45,836

Dependendo do intervalo em que se estipula a fração da constante solar, a resposta de temperatura no modelo se apresenta mais ou menos sensível a mudanças nesse parâmetro. Para uma fração entre 0 a 0,80 e entre 0,85 a 1,00, o modelo possui uma resposta de temperatura basicamente linear, conforme o gráfico na Figura 3. Ao comparar a sensibilidade entre tais intervalos, pode-se afirmar que o modelo é menos sensível a variações dentro de 0-0,80 e mais sensível a variações dentro de 0,85-1,00.

Tal afirmação é suportada com base na inclinação das retas (que pode ser extraída do coeficiente angular das equações que as descrevem): no intervalo de 0-0,80, as inclinações são mais “suaves” para as retas em cada uma das latitudes, o que significa que a resposta é mais sutil (menos sensível) para alterações do parâmetro de entrada neste intervalo; entre 0,85-1,00, as retas possuem inclinações mais proeminentes, ou seja, a resposta é mais evidente (mais sensível) a alterações nesse mesmo parâmetro.

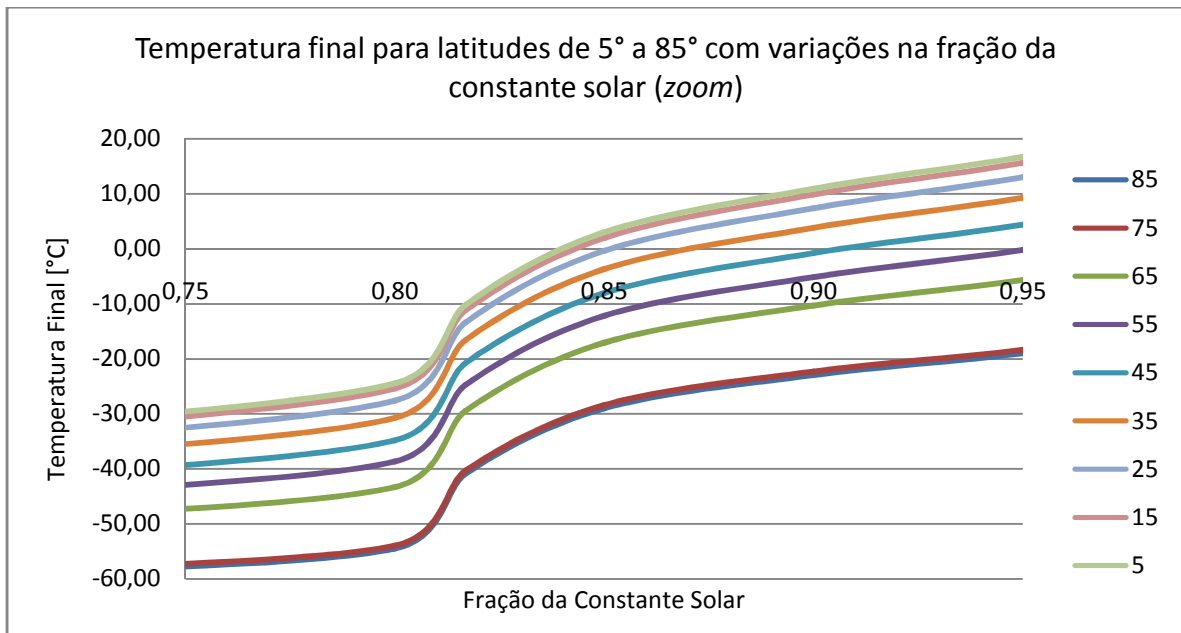
Já para variações da fração da constante solar no intervalo de 0,80 a 0,85, o modelo possui sensibilidade ainda mais acentuada. Neste intervalo, a resposta de temperatura deixa de ter um comportamento linear e passa a ser mais próxima de uma exponencial, refletindo em alterações mais “bruscas” no valor de temperatura em decorrência de variações da fração. A Figura 4 apresenta um *zoom* próximo às extremidades do intervalo 0,80-0,85 do gráfico na Figura 3, ilustrando o comportamento diferenciado e mais sensível em relação aos intervalos 0-0,80 e 0,85-1,00 da fração da constante solar.

Figura 3: Temperatura final para latitudes de 5° a 85° com variações na fração da constante solar.



Embora o perfil (comportamento) das curvas seja similar em todas as zonas, latitudes mais elevadas possuem menor sensibilidade para o intervalo de variação da fração até 0,80. Isso é visualizado também na Figura 3, em que a curva para latitude 5 graus Norte possui maior inclinação que as demais curvas, seguida das curvas de latitude 15, 25 até as curvas de latitude 75, 85 graus Norte, de menor inclinação.

Figura 4: Temperatura final para latitudes de 5° a 85° com variações na fração da constante solar (*zoom*).



3.2. Coefficiente de Transporte (C)

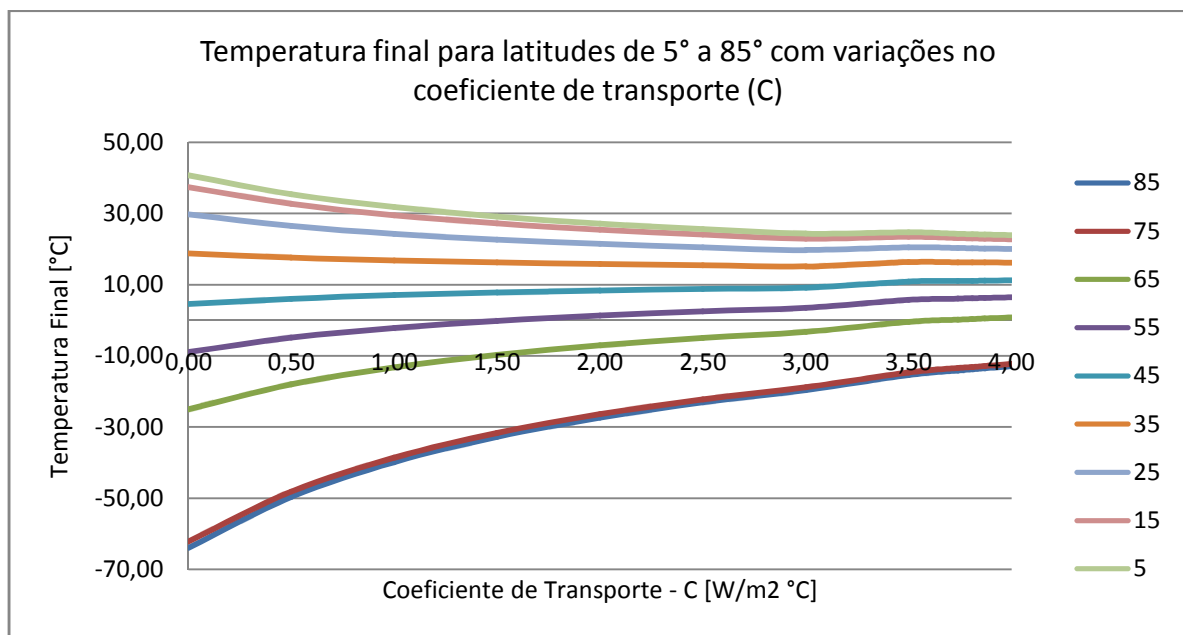
Para uma variedade de valores relatada para o coeficiente de transporte (C), mantendo-se os valores *default* para os demais parâmetros de entrada, tem-se a temperatura final para cada zona conforme a Tabela 2. Para a variedade adotada e expressa nessa tabela, percebe-se que a temperatura média global se mantém constante para o parâmetro de entrada C entre 1,00 e 3,00 $W/m^2 \cdot ^\circ C$; e que essa temperatura adquire novo valor e se mantém também constante para os valores de C do enunciado (3,74 e 3,81 $W/m^2 \cdot ^\circ C$) e o seu valor padrão (3,87 $W/m^2 \cdot ^\circ C$) no modelo.

Conforme mostra o gráfico na Figura 5, nas latitudes entre 5° e 35°, a temperatura decresce com o aumento do coeficiente de transporte de forma mais expressiva até, aproximadamente, C em 2,50 $W/m^2 \cdot ^\circ C$. Após este valor, a temperatura se mostra menos sensível com a variação do coeficiente (comportamento assintótico). Por outro lado, nas latitudes entre 35° e 85°, a temperatura cresce com o aumento do coeficiente. E esse aumento também se torna menos expressivo/menos sensível à medida que C aumenta (exponencial de potência menor que 1, por exemplo, uma função raiz quadrada).

Tabela 2: Temperatura final por latitude e temperatura média global com variações na constante de transporte (C).

Coeficiente de Transporte [W/m ² °C] →		3,87	3,81	3,74	3,00	2,00	1,00
Zona	Zona calculada (Latitude)	Temperatura Final [°C]					
80-90	85	-13,535	-13,819	-14,158	-19,645	-27,343	-39,896
70-80	75	-12,867	-13,144	-13,475	-18,865	-26,375	-38,624
60-70	65	0,459	0,315	0,144	-3,295	-7,072	-13,231
50-60	55	6,254	6,169	6,067	3,474	1,321	-2,189
40-50	45	11,097	11,060	11,016	9,132	8,335	7,037
30-40	35	16,217	16,232	16,249	15,114	15,752	16,793
0-30	25	20,147	20,201	20,265	19,705	21,444	24,281
0-20	15	22,886	22,967	23,064	22,904	25,411	29,499
0-10	5	24,077	24,170	24,281	24,296	27,136	31,768
Temperatura Média Global [°C] →		14,773			12,452		

Figura 5: Temperatura final para latitudes de 5° a 85° com variações no coeficiente de transporte (C).

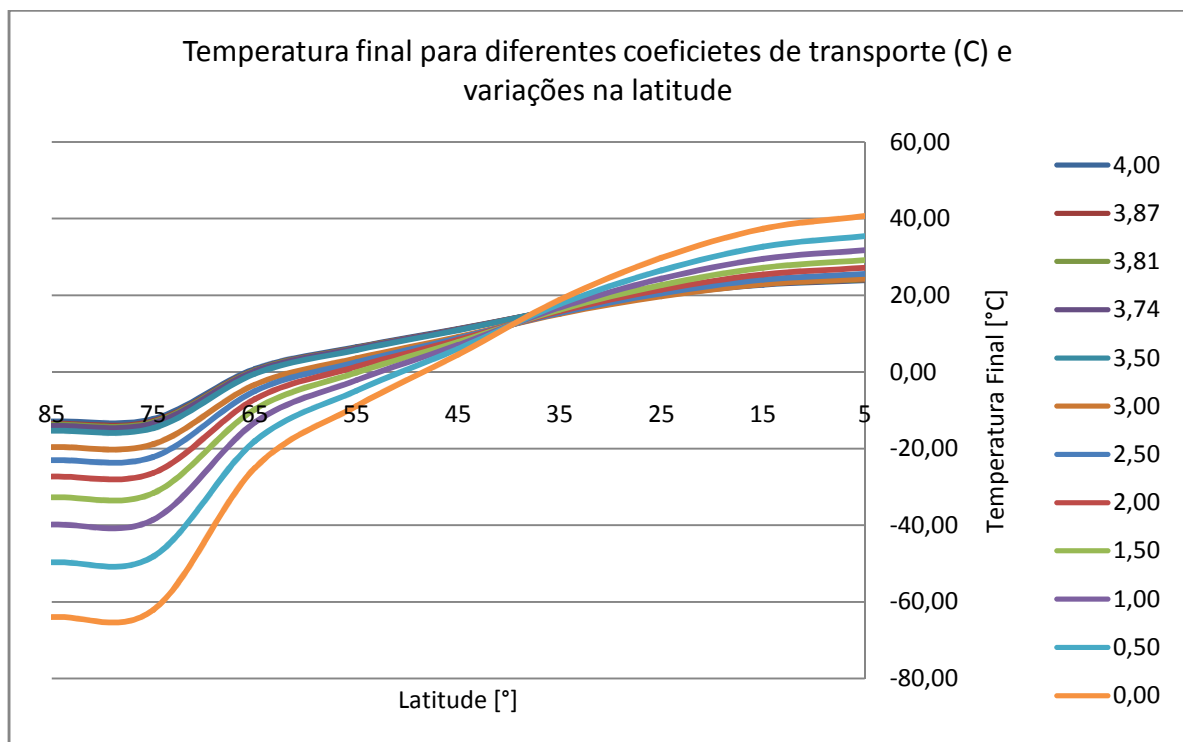


De um modo geral, quando na variação do coeficiente de transporte, curvas de latitudes dos extremos (exemplos: 5, 15, 75 e 85 graus Norte) apresentam alterações mais expressivas de temperatura que curvas de latitudes intermediárias (como 25 e 45 graus Norte), de forma que se pode dizer que a sensibilidade do modelo em decorrência de variações neste coeficiente depende da latitude.

A Figura 6 permite visualizar o comportamento de temperatura final em consequência da variação da latitude para diferentes valores do coeficiente de transporte. Por meio deste gráfico, tem-se a seguinte leitura (baseando-se na inclinação das curvas em intervalos):

- ✓ Latitudes entre 85° e 75°: resposta de temperatura com muito baixa sensibilidade;
- ✓ Latitudes entre 75° e 65°: resposta de temperatura com alta sensibilidade;
- ✓ Latitudes entre 65° e 15°: resposta de temperatura com média sensibilidade;
- ✓ Latitudes entre 15° e 5°: resposta de temperatura com baixa sensibilidade;
- ✓ Em qualquer latitude: resposta de temperatura com maior sensibilidade para menores valores do coeficiente.

Figura 6: Temperatura final para diferentes coeficientes de transporte (C) e variações na latitude.



3.3. Constante de Perda de Radiação de Onda Longa (B)

Partindo para variação da constante de perda de radiação de onda longa (B) para mais e para menos em relação ao seu valor padrão no modelo, com todos os outros parâmetros de entrada mantidos em seus valores *default* (inclusive a constante A), adquire-se a temperatura final em cada latitude, bem como a temperatura média global, conforme mostra a Tabela 3. Essa constante recebe o valor padrão de 2,17 W/m².°C e, à medida que é alterada para sua redução (à direita do valor em destaque na tabela), as temperaturas se elevam; por outro lado, à medida que se altera B para valores superiores ao padrão (à esquerda na tabela), as temperaturas decaem.

O comportamento de decaimento na temperatura final em consequência do aumento de B, para as latitudes de 5° a 85°, é também ilustrado na Figura 7. Facilmente nota-se que altas latitudes possuem menores temperaturas comparadas às temperaturas de latitudes mais baixas. A Figura 8 reporta o comportamento para a temperatura média global nos mesmos valores da constante de perda de radiação de onda longa do gráfico na Figura 7. Já a Figura 9 traz o comportamento da temperatura final em função da latitude para uma variedade de valores de B, e evidencia que a temperatura decai com o aumento da latitude e também com o aumento dessa constante.

Tabela 3: Temperatura final por latitude e temperatura média global com variações na constante de perda de radiação de onda longa (B).

Constante de Perda de Radiação de Onda Longa [W/m ² °C] →		4,00	3,00	2,17	2,00	1,00
Zona	Zona calculada (Latitude)	Temperatura Final [°C]				
80-90	85	-13,388	-14,202	-13,535	-13,099	-0,575
70-80	75	-12,875	-13,615	-12,867	-12,412	0,253
60-70	65	-2,647	-1,898	0,459	1,300	16,781
50-60	55	1,799	3,196	6,254	7,263	23,969
40-50	45	5,516	7,454	11,097	12,246	29,975
30-40	35	9,446	11,956	16,217	17,514	36,326
0-30	25	12,462	15,411	20,147	21,558	41,199
0-20	15	14,564	17,819	22,886	24,376	44,596
0-10	5	15,477	18,866	24,077	25,601	46,073
Temperatura Média Global [°C] →		8,671	10,686	14,773	16,028	35,174

Figura 7: Temperatura final para latitudes de 5° a 85° com variações na constante de perda de radiação de onda longa (B).

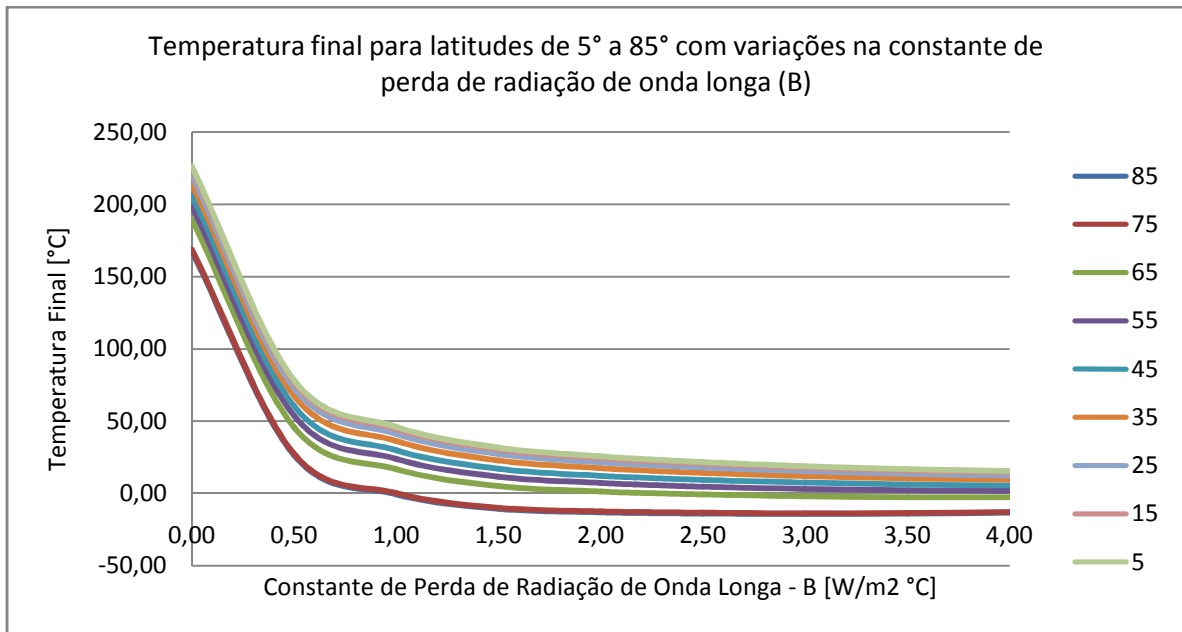


Figura 8: Temperatura média global em função das variações na constante de perda de radiação de onda longa (B).

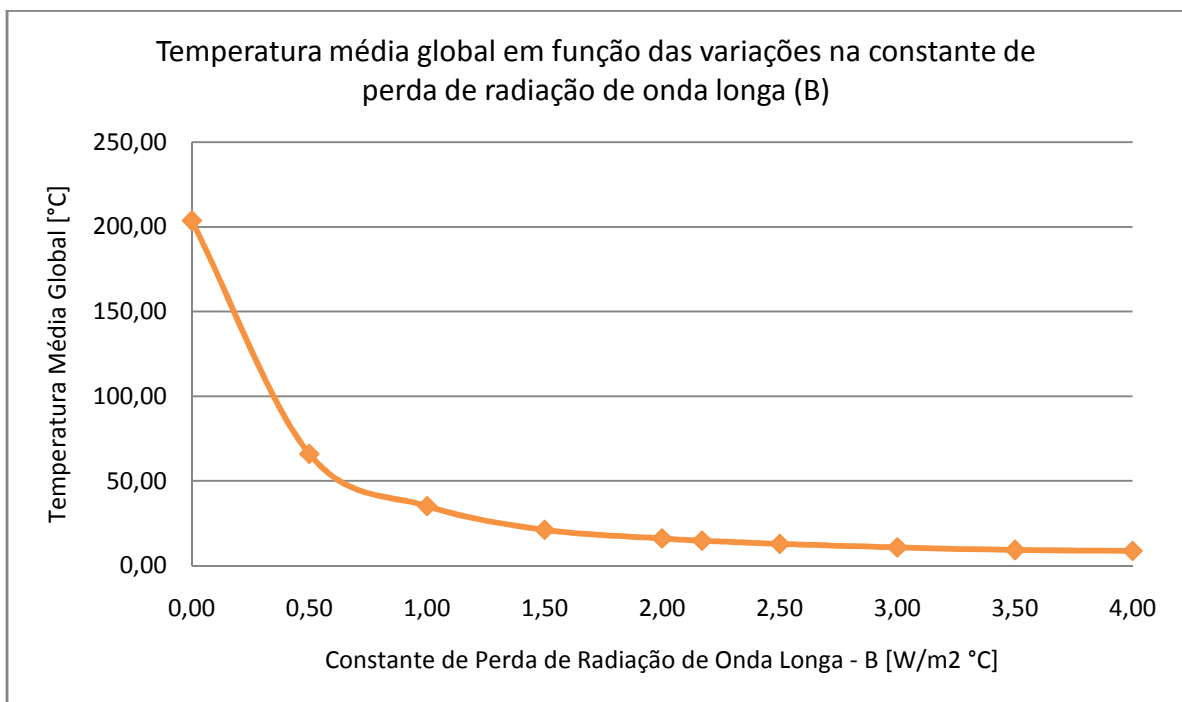
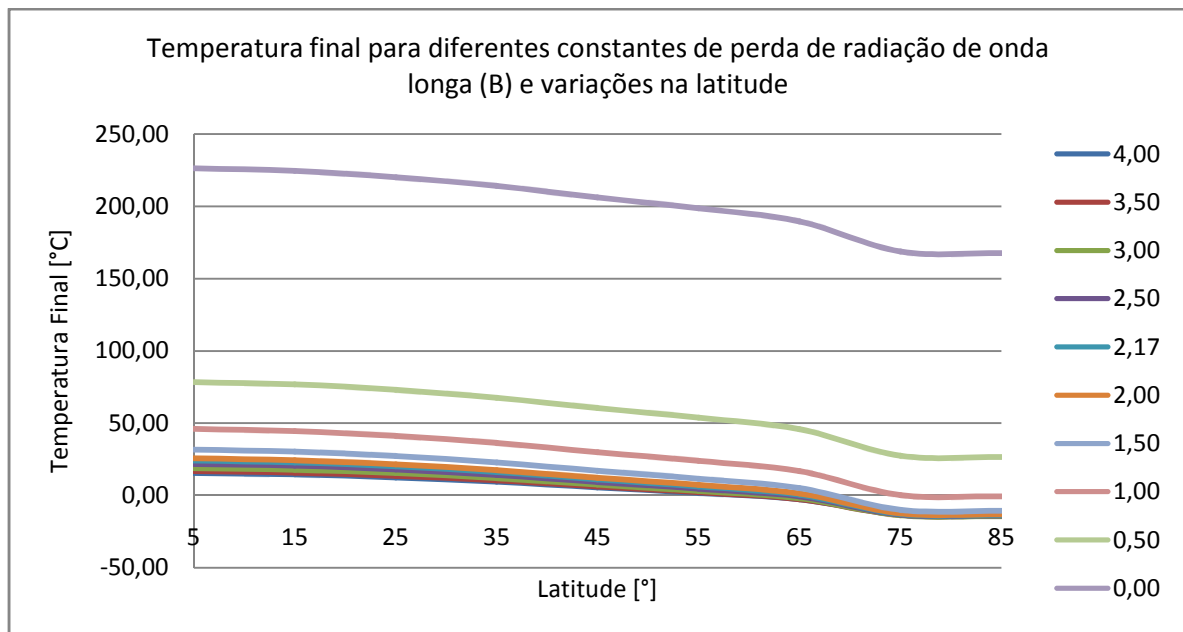


Figura 9: Temperatura final para diferentes constantes de perda de radiação de onda longa (B) e variações na latitude.



Em se tratando da perda de radiação de onda longa, a constante B se refere à perda de radiação emitida pela superfície terrestre, uma vez que radiação solar é radiação de onda curta (ultravioleta) e radiação terrestre é radiação de onda longa (infravermelha), conforme a Lei do Deslocamento de *Wien* (maior temperatura do corpo, menor comprimento de onda emitida pelo corpo). Da radiação solar incidente sobre o planeta, parte é refletida pela sua superfície e retorna para o espaço, e parte é absorvida pela superfície terrestre. Partindo-se da superfície, parcela da radiação terrestre passa através da atmosfera e regressa ao espaço, outra parcela é absorvida pela atmosfera, que reemite tal radiação de volta para a Terra, corroborando com o aquecimento da superfície terrestre.

A variação na constante de perda de radiação de onda longa corresponde, fisicamente, à variação na concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, os quais absorvem radiação terrestre: redução no valor de B significa aumento na concentração desses gases e, portanto, elevação da temperatura; aumento no valor de B indica diminuição na concentração de GEE e da temperatura. A amplificação do efeito estufa (por meio de emissões de GEE por atividades antrópicas, por exemplo) denota redução no valor da constante B que, por sua vez, significa reduzir a capacidade de dissipação da radiação terrestre para “fora” da atmosfera. Em outras palavras, maior a concentração de gases de efeito estufa, mais radiação de onda longa é retida (menor a perda dessa radiação; menor B) e assim, maior temperatura na superfície terrestre é atingida.

Anexo 1: Quadro resumo das perguntas e suas respectivas respostas neste documento.

Questões	Respostas neste relatório
At what fraction of the solar constant does the hemisphere "ice over", that is, the surface temperatures in all the zones fall to or below the critical temperature? How sensitive is the model to changes in the solar constant fraction?	Tópico 3/Subtópico 3.1 – páginas: 5 a 7 Tabela 1 Figura 3 Figura 4
A variety of values for the transport constant has been reported: <ul style="list-style-type: none">• K (ou C) = $3.81 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$• K (ou C) = $3.74 \text{ W m}^{-2} \text{ C}^{-1}$ How sensitive is the model to changes in this constant?	Tópico 3/Subtópico 3.2 – páginas: 7 a 9 Tabela 2 Figura 5 Figura 6
Holding A constant, vary B slightly and investigate the effect on the climate. What does a variation in B correspond to physically?	Tópico 3/Subtópico 3.3 – páginas: 10 a 12 Tabela 3 Figura 7 Figura 8 Figura 9