Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Um novo modelo climático simplificado: Global resolved energy balance with galactic cosmic rays (GREB-GCR) theory

Emerson Damasceno de Oliveira¹ , José Henrique Fernandez²

¹Dr. em Ciências Climáticas, Meteorologista no Laboratório de Meteorologia – LABMET/UNIVASF, Juazeiro-BA, Brasil, e-mail: emerson.oliveira@univasf.edu.br (autor correspondente). ²Doutor em Geofísica Espacial e Professor no Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas – PPGCC/UFRN, Natal-RN, Brasil

Artigo recebido em 12/08/2019 e aceito em 21/03/2020

RESUMO

Este trabalho se fundamentou no desenvolvimento de um modelo climático capaz de simular os efeitos da teoria dos Raios Cósmicos Galácticos (RCG) sobre o sistema climático global. Este novo modelo está sendo chamado de *Global Resolved Energy Balance from Galactic Cosmic Rays* (GREB-GCR) Theory. O GREB-GCR está baseado no código do modelo GREB, um modelo climático simplificado que se baseia no balanço energético global. Os campos de superfície apontam que o modelo GREB-GCR consegue simular a temperatura do ar superficial considerando as forçantes antropogênicas (CO₂) e naturais (RCG). O modelo ainda aponta um enfraquecimento recente à tendência de aquecimento global das últimas décadas, sendo este influenciado pelos RCG.

Palavras-chave: GREB-GCR, Temperatura do ar, Modelo climático, Raios Cósmicos.

Global resolved energy balance with galactic cosmic rays (greb-gcr) theory: a new simplified climate model theory

ABSTRACT

This work was based on the development of a climate model capable of simulating the effects of the Galactic Cosmic Rays theory (GCR) on the global climate system. This new model is being called the *Global Resolved Energy Balance with Galactic Cosmic Rays* (GREB-GCR) Theory. The GREB-GCR is based on the GREB model code, a simplified climate model that is based on the global energy balance. The calculated surface fields indicate that the GREB-GCR model can better simulate the surface air temperature considering anthropogenic (CO₂) and natural (GCR) forcings. The model also points to a recent weakening of the global warming trend of recent decades, which is influenced by the GCR's fluxes.

Key-words: GREB-GCR, Air temperature, Climate model, Cosmic Rays.

Introdução

Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Changes* (IPCC), que publicou recentemente o *Fifth Assesment Report* (AR5), o aumento da temperatura do ar entre meados do século XX e o presente momento se deu devido ao aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). O quinto relatório do IPCC propõe esta afirmativa com um intervalo de confiança de 95%, sugerindo que forçantes naturais como a variação da irradiância solar não contribuíram para o aumento observado de temperatura (IPCC, 2014). Entretanto, as mudanças climáticas naturais são

objeto de especulações, existindo diferentes teorias a fim de justificá-las (i.e., atividades vulcânicas, mudanças no campo magnético terrestre, variações da intensidade solar, e, variações dos parâmetros orbitais (ciclos de Milankovitch)) (Puetz; Prokoph; Borchardt, 2016).

O modo mais difundido para estudar o comportamento do clima é através de modelos climáticos conceituais. Conforme Dommenget e Flöter (2011) o principal objetivo de desenvolver modelos climáticos é melhorar a representação dos principais processos físicos e incluir mais

processos que afetam os aspectos observados do sistema climático. Ainda segundo Dommenges et Flöter (2011), ao mesmo passo que os modelos se tornaram mais realistas à simulação do estado médio climático, também se tornaram mais complexos. Todavia, segundo Petoukhov et al. (2005) uma alternativa aos Modelos de Circulação Geral (MCG) são os modelos simplificados, pois estes são capazes de simular as características de grande escala das mudanças climáticas. Dommenges et Flöter (2011) apresentaram o modelo climático *Global Resolved Energy Balance* (GREB), um modelo simplificado baseado no balanço energético global.

Uma teoria proposta por Bray (1971) sugeria que de alguma forma a variação no fluxo de Raios Cósmicos Galácticos (RCG) estava associada ao avanço e recuo do gelo nos polos. Posteriormente Dickinson (1975) postulou que o fluxo de RCG possui algum tipo de ligação com a atividade solar e com as nuvens. Ao fim do século XX, alguns trabalhos (Pudovikin; Vetternenko, 1997; Svensmark; Friis-Christensen, 1997) encontraram correlações entre a variação da cobertura de nuvens baixas e os RCG. Após estas primeiras observações, foram realizadas outras pesquisas (i.e., Svensmark, 2015; Didebulidze; Todua, 2016) e a teoria dos RCG foi inserida até no *Larger Hadron Collider* (LHC) através do projeto *Cosmics Leaving Outdoor Droplets* (CLOUD), sendo o trabalho de Kim et al. (2016) um exemplo das pesquisas desenvolvidas neste projeto.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo climático capaz de representar os efeitos da teoria dos RCG, este novo modelo é baseado no modelo GREB. O novo modelo está sendo chamado de GREB-GCR, do inglês *Galactic Cosmic Rays* (GCR). No trabalho de Oliveira et al. (2019) o modelo GREB-GCR passou por uma validação, onde os autores reconstruíram a temperatura superficial média global (1950-2017), obtendo melhores resultados ao simular a teoria dos RCG.

Material e métodos

Dados e processos do modelo

Em conformidade ao exposto anteriormente, este trabalho se baseia no desenvolvimento de uma versão modificada e melhorada do modelo GREB, denominada GREB-GCR. Esta nova versão adotou a mesma resolução horizontal da versão original, ou seja, 3,75° (96 pontos em x e 48 pontos em y). Ao GREB-GCR

foram adicionados dois novos dados de entrada: médias anuais da concentração de dióxido de carbono (CO_2), em partes por milhão (ppm), e de Manchas Solares (SN), adimensional. A série de concentração de CO_2 foi obtida a partir do KNMI (https://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=C&DIACData/co2_annual&STATION=CO2&TYPE=i&id=someone@somewhere&NPERYEAR=1), sendo esta série uma compilação de dados do *Earth Policy Institute*, *Worldwatch Institute*, *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e do *Earth System Research Laboratory* (ESRL). Já a série de SN foi obtida a partir do sítio SILSO (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>), sendo os créditos atribuídos ao *Royal Observatory of Belgium*. Estes dados compreendem uma série temporal entre os anos de 1700 e 2017.

Os principais processos considerados no modelo GREB-GCR estão ilustrados esquematicamente na Figura 1. Estes processos representam o balanço energético global e são utilizados para calcular a Temperatura Superficial, T_{surf} , representada pela seguinte equação de tendência:

$$\gamma_{surf} \frac{dT_{surf}}{dt} = F_{solar} + F_{thermal} + F_{latent} + F_{sense} + F_{ocean} + F_{correct} \quad (1)$$

em que a T_{surf} é calculada a partir da radiação solar, F_{solar} , da radiação térmica líquida, $F_{thermal}$, do calor latente de evaporação da água superficial, F_{latent} , da troca de calor turbulenta com a atmosfera, F_{sense} , e da troca de calor com o oceano profundo, F_{ocean} . O termo correção de fluxo, $F_{correct}$, é uma correção empírica das tendências da T_{surf} a fim de corrigir erros do modelo, já γ_{surf} representa a capacidade térmica superficial, a Equação 1 está fundamentada nos trabalhos de Budyko (1969) e Sellers (1969).

No modelo GREB-GCR são representados nove processos conforme proposto no trabalho de Oliveira et al. (2019) (Figura 1), partindo-se da entrada de Radiação Solar (1) à atuação dos RCG (9). Os processos de (1) até Oceano Profundo (8) são pertencentes ao código original do modelo GREB. Todavia, o processo (9) está fundamentado em alterações realizadas nos processos (1) e Radiação Térmica (2), que representam as radiações de ondas curtas e de ondas longas, respectivamente. Para maiores detalhes a cerca dos demais processos do modelo GREB, recomenda-se a leitura do trabalho de Dommenges et Flöter (2011).

Figura 1. Esquema dos processos simulados no modelo GREB-GCR. Fonte: Oliveira et al., (2019).

O processo (9) está assim fundamentado: a relação entre RCG e nuvens baixas é dada devido à penetração de RCG (constituição média: 90% Prótons, 9% Partículas Alfa e 1% Núcleos Pesados) no topo da atmosfera terrestre, que ao interagir com o ar atmosférico geram subprodutos (por exemplo: Múons) (Svensmark; Calder, 2007). Segundo Svensmark (2007) os múons que chegam à baixa atmosfera terrestre (<2km) induzem a formação de aerossóis, em que os íons assumem a função de Núcleos de Condensação de Nuvens (NCN).

Radiação de ondas curtas

No modelo GREB a climatologia da cobertura de nuvens, $cldclim$, é uma condição fixa, mantendo-se invariável ao longo dos anos de simulação. Segundo Dommenget e Flöter (2011) o albedo atmosférico, α_{atmos} , do GREB é função apenas da $cldclim$. Logo, desenvolveu-se uma parametrização capaz de simular flutuações anuais da $cldclim$ em função do número de manchas solares (SN), do inglês *Sunspot Number*. A parametrização utilizada é dada pela equação a seguir:

$$\alpha_{atmos} = [cldclim + cldclim \cdot \cos\left(\left(\frac{SN}{MAX_{SN}}\right)\pi\right) \cdot var_{cloud}] \cdot \alpha_{cloud} \quad (2)$$

onde MAX_{SN} representa o valor máximo encontrado na série de SN , var_{cloud} representa a variação percentual da cobertura de nuvens e α_{cloud} é o albedo médio estimado para as nuvens. Segundo Owens et al (2015), o fluxo de RCG e o SN são negativamente correlacionados, fundamentando-se a utilização da função cosseno na Equação 2. Segundo Kirkby (2007), estima-se que a cobertura de nuvens varie aproximadamente 1% em função do fluxo de RCG, assim é recomendado utilizar var_{cloud} próximo deste valor. O valor máximo (constante MAX_{SN}) encontrado na série de SN foi de 269,3 manchas, estabelecendo-se o intervalo limite de manchas solares (variável SN) [0, 269,3] que corresponde na função cosseno ao intervalo [1, -1], respectivamente. Por fim, conforme Dommenget e Flöter (2011), o valor adotado para α_{cloud} está sendo de 35%, o que representa um albedo médio global para diferentes tipos de nuvens.

Conforme a teoria de Svensmark os RCG estão correlacionados positivamente com as nuvens baixas (de maior albedo), contudo, o modelo GREB-GCR não faz distinção entre nuvens altas, médias e baixas, adotando-se para tanto uma média percentual da cobertura de nuvens presente em toda a atmosfera. No modelo GREB a $cldclim$ funciona como uma medida da espessura atmosférica, atenuando a quantidade de radiação solar (ondas curtas) que chega do topo da atmosfera à superfície. Deste modo, a influência das nuvens baixas é predominante uma vez que estas possuem maior profundidade óptica. A radiação de ondas

curtas é calculada no modelo a partir da seguinte equação:

$$F_{solar} = (1 - \alpha_{cloud}).(1 - \alpha_{surf}).S_0 . r(\lambda, t_{julian}) \quad (3)$$

Radiação de ondas longas

A emissividade atmosférica (ou emissividade efetiva), ε_{atmos} , do modelo GREB está baseada em diferentes trabalhos, sendo seu cálculo dado pelo somatório das contribuições individuais do vapor d'água, CO_2 e $cldclim$ (i.e., Myhre et al., 1998; Kiehl e Ramanathan, 1982). Portanto, por ser a $cldclim$ constante no modelo GREB, a emissividade das nuvens, $\varepsilon_{cldclim}$, não contribui para variações anuais da ε_{atmos} . Deste modo, em concordância às alterações realizadas no α_{atmos} , a $\varepsilon_{cldclim}$ também foi modificada, adotando-se a equação a seguir:

$$\varepsilon_{cldclim} = cldclim + cldclim . \cos \left(\left(\frac{SN}{MAX_{SN}} \right) \pi \right) . var_{cloud} \quad (4)$$

A radiação térmica (ou termal) no modelo GREB segue a lei de emissão de um corpo negro e ocorre devido tanto à radiação térmica atmosférica descendente quanto à emissão térmica da superfície terrestre. Sendo a radiação atmosférica dependente da temperatura atmosférica (T_{atmos}), da concentração de CO_2 , da concentração atmosférica do vapor d'água integrado verticalmente, $viwv_{atmos}$, e, da cobertura de nuvens, $cldclim$. Segundo Dommenget e Flöter (2011) os modelos climáticos simplificados adotam diferentes abordagens para simular a radiação de ondas longas, incluindo-se algumas parametrizações para a radiação emitida pela superfície e pela radiação atmosférica descendente (i.e., Ramanathan, 1977; Fanning; Weaver, 1996). Ainda segundo Dommenget e Flöter (2011), um modelo simples com o menor número de parâmetros possível, é no que está fundamentada a sub-rotina de radiação térmica do modelo GREB (Bohren; Clothiaux, 2006).

A radiação térmica líquida ocorre devido a uma perda da radiação térmica de saída e a um ganho da radiação térmica atmosférica:

$$F_{thermal} = -\sigma T_{surf}^4 + \varepsilon_{atmos} \sigma T_{atmos-rad}^4 \quad (5)$$

A atmosfera irradia com a temperatura $T_{atmos-rad}$ e uma emissividade efetiva, ε_{atmos} . A $T_{atmos-rad}$ é definida no contexto da temperatura atmosférica, T_{atmos} , e da T_{surf} como: $T_{atmos-rad} = T_{atmos} - 0,16 * T_{surf}$ (controle) - 5 K. Para maiores detalhes sobre o cálculo da $T_{atmos-rad}$ e T_{atmos} , recomenda-se a leitura de Dommenget e Flöter (2011).

Conforme mencionado anteriormente, a emissividade efetiva, ε_{atmos} , depende do CO_2 , do $viwv_{atmos}$ e da $cldclim$. Para uma aproximação simples da dependência do CO_2 e do $viwv_{atmos}$, os desenvolvedores do GREB adotaram uma abordagem com função logarítmica (Equação 6), baseando-se para tanto no trabalho de Myhre et al. (1998). Também é necessário considerar que há absorção e emissão da radiação térmica em diferentes bandas espectrais que se sobrepõem ao CO_2 e ao $viwv_{atmos}$ (i.e., Kiehl; Ramanathan, 1982). Isto pode ser aproximado a partir da seguinte equação:

$$\varepsilon_0 = pe_4 . \log [pe_1 . CO_2^{topo} + pe_2 . viwv_{atmos} + pe_3] + pe_5 . \log [pe_1 . CO_2^{topo} + pe_3] + pe_6 . \log [pe_2 . viwv_{atmos} + pe_3] + pe_7 \quad (6)$$

onde ε_0 é a emissividade desconsiderando a atuação das nuvens (para céu claro), CO_2^{topo} representa a concentração atmosférica de CO_2 escalonado em função da variação da pressão superficial, ou seja, levando-se em consideração a topografia, Z_{topo} , sendo dado pela seguinte expressão: $CO_2^{topo} = e^{-Z_{topo}/Z_{atmos}} . CO_2$. Onde a altura limite é $Z_{topo} = 8400$ m, que é a medida da espessura atmosférica no balanço hidrostático. O primeiro termo no lado direito da Equação 6 representa a emissividade devido ao CO_2 , o $viwv_{atmos}$ e alguma componente residual, pe_3 , das bandas espectrais em que a emissividade térmica se sobrepõe ao CO_2 e o $viwv_{atmos}$. O segundo e o terceiro termo do lado direito são as bandas espectrais que não se sobrepõe ao CO_2 e ao $viwv_{atmos}$ (mas elas ainda se sobrepõem ao pe_3 individualmente). Maiores detalhes sobre a Equação 6 podem ser consultados em Dommenget e Flöter (2011).

A cobertura de nuvens é considerada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_{atmos} = \frac{pe_8 - CLD}{pe_9} . (\varepsilon_0 - pe_{10}) + pe_{10} \quad (7)$$

Portanto, a cobertura de nuvens, CLD , influencia a emissividade efetiva, ε_{atmos} , deslocando-a para cima ou para baixo e diluindo os efeitos dos gases traços. Deste modo, diante da

presença de nuvens a emissividade é maior e o efeito das concentrações dos gases traços é reduzido. Isso também reduz a sensibilidade às mudanças na concentração de gases traços. Os parâmetros do modelo são ajustados aos valores da literatura, que limitam a ε_{atmos} como sendo uma função dependente do CO_2 , $viwv_{atmos}$ e da $cldclim$. Deste modo, a variação da $cldclim$ devido a teoria dos RCG (Equação 4) representa uma oscilação da ε_{atmos} , ou seja, variações na radiação de ondas longas (Equação 5).

Estrutura e utilização do modelo

O modelo GREB-GCR, assim como o modelo GREB, também é composto por experimentos. No novo modelo proposto, há três experimentos que simulam a contribuição individual e em conjunto das Equações 2 e 4, adotando-se para tanto o CO_2 constante em 280 ppm. Todavia, o GREB-GCR também possui um

experimento que avalia a soma das contribuições das equações 2 e 4 simultaneamente, assim como também, a variação da concentração de CO_2 e as equações 2 e 4 simultaneamente (experimentos EXP17, EXP18, EXP19 e EXP20). O modelo GREB é capaz de realizar até 16 experimentos, entretanto, no GREB-GCR estão disponíveis 20 experimentos. Os experimentos dos modelos GREB e GREB-GCR incluem gradativamente os processos expostos na Figura 1 (i.e., ciclo hidrológico; advecção; difusão; oceano profundo etc.) a fim de representar o sistema climático global. O experimento 19 (EXP19), por exemplo, é o responsável por considerar todos os processos (1-9) do modelo GREB-GCR. Na Tabela 1 há uma breve descrição dos experimentos mais importantes introduzidos e/ou modificados pelo modelo GREB-GCR.

Tabela 1. Resumo dos principais experimentos simulados com o modelo GREB-GCR.

EXP12 – Apenas o Dióxido de Carbono	$T_{surf} = f(CO_2)$
EXP17 – Apenas o Albedo Atmosférico	$T_{surf} = f(\alpha_{atmos})$
EXP18 – Apenas a Emissividade das nuvens	$T_{surf} = f(\varepsilon_{cldclim})$
EXP19 – Albedo e Emissividade Atmosférica	$T_{surf} = f(\alpha_{atmos}, \varepsilon_{cldclim})$
EXP20 – Albedo e Emissividade Atmosférica mais Dióxido de Carbono	$T_{surf} = f(\alpha_{atmos}, \varepsilon_{cldclim}, CO_2)$

A partir da Tabela 1 é possível constatar que o EXP17 considera a atuação individual da Equação 2, enquanto o EXP18 a Equação 4, e, o EXP19 a atuação simultânea das Equações 2 e 4. O EXP12 considera apenas a atuação do CO_2 , distinguindo-se do GREB por se basear numa série observada de CO_2 e não em um cenário do IPCC.

Por fim, o EXP20 representa a atuação conjunta do EXP12 e do EXP19, ou seja, da forçante antropogênica e da natural. Na Figura 2 consta um fluxograma do modelo GREB-GCR, diferenciando-se os módulos e as sub-rotinas que sofreram alterações em seu código original.

Figura 2. Fluxograma de funcionamento do código do modelo GREB-GCR, expondo-se as sub-rotinas e os módulos que foram alterados. Fonte: Oliveira et al., (2019).

O modelo GREB-GCR ganhou uma logomarca:

Figura 3. Logomarca do modelo GREB-GCR.

O código do modelo GREB foi reestruturado a fim de simplificar a edição das sub-rotinas e dos módulos, para tanto o código Fortran “greb.model.f90” foi fragmentado em vários arquivos. O modelo GREB-GCR ganhou cinco pastas: *exec*; *input*; *notes*; *output*; e, *source*.

A Figura 4 retrata as pastas e arquivos do GREB-GCR como também uma simulação utilizando o EXP20, sendo as rodadas iniciadas por um script Cshell editável, que foi criado para facilitar a utilização do modelo, este script foi nomeado de *run* e é responsável por iniciar todas as simulações. Os resultados podem ser visualizados através de alguns scripts baseados no software *Grid Analysis and Display System* (GrADS). Também é possível manipular o arquivo de saída através de alguns scripts baseados no software *Climate Data Operator* (CDO). Os modelos de scripts para GrADS e CDO se encontram dentro da pasta *output/utills*, recomenda-se a leitura do arquivo *README* para efetuar a correta instalação destes softwares. O modelo GREB-GCR pode ser baixado no site [github](https://github.com/Emerson-D-Oliveira/GREB-GCR-v.0.1) gratuitamente (<https://github.com/Emerson-D-Oliveira/GREB-GCR-v.0.1>).

```
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music$ ls
GREB-GCR GREB-GCR.tar.gz
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music$ cd GREB-GCR/
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR$ ls
exec input notes output run source
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR$ cd source/
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/source$ ls
advection.f90 diffusion.f90 main.f90 output.f90
circulation.f90 flux correction.f90 Makefile seaice.f90
co2.f90 greb_model.f90 mo diagnostics.f90 sw radiation.f90
deep ocean.f90 hydrological.f90 mo numerics.f90 tendencies.f90
diagnostics.f90 lw radiation.f90 mo physics.f90 time loop.f90
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/source$ cd ../input/
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/input$ ls
cloud.cover glacier.masks ocean.mld solar.radiation topography vapor
co2 meridional.wind soil.moisture sunspot tsurf zonal.wind
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/input$ cd ../output/
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/output$ ls
utils
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/output$ cd ../exec/
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/exec$ ls
namelist
labmet@labmet-VirtualBox:~/Music/GREB-GCR/exec$
```



```

labmet@labmet-VirtualBox: ~/Music/GREB-GCR$ ./run

***** RUNNING EXPERIMENT [1700-2017] *****

% Threads: 2
% start climate shell
%
% diagnostic point lat/lon: -7.50000000 -37.50000000
% time flux/control/scenario: 3 3 318
% log exp/var_cloud/max sn: 20 4.99999989E-03 269.299988
%
% flux correction 280.000000
% 0.00000000 tsmn 26.7150879 qmn 15.9866791 amn 0.297871500
% 0.00000000 tsmn 26.7150879 qmn 15.9866791 amn 0.297871500
% 0.00000000 tsmn 26.7150879 qmn 15.9866791 amn 0.297871500
% CONTROL RUN CO2= 280.000000 time= 3 yr
% 1800.00000 tsmn 26.7150574 qmn 15.9866772 amn 0.297871500
% 1800.00000 tsmn 26.7150574 qmn 15.9866772 amn 0.297871500
% 1800.00000 tsmn 26.7150574 qmn 15.9866772 amn 0.297871500
% SCENARIO EXP: 20 time= 318 yr
% 1700.00000 tsmn 26.7149658 qmn 15.9865484 amn 0.297871500
% 1701.00000 tsmn 26.7148743 qmn 15.9864035 amn 0.297871500
% 1702.00000 tsmn 26.7147217 qmn 15.9862919 amn 0.297871500
% 1703.00000 tsmn 26.6943665 qmn 15.9662647 amn 0.298763722

```

Figura 4. (a) Ilustração da estrutura do modelo GREB-GCR e (b) de seu funcionamento durante uma simulação.

Antes de iniciar as rodadas é necessário compilar o código fonte do modelo, para tanto é um requisito ter em seu sistema Linux um compilador Fortran instalado (i.e., gfortran, ifort, g95 etc). Deste modo, o usuário deve editar o arquivo *source/Makefile* para que o modelo trabalhe com um compilador Fortran de sua preferência, destaca-se que o GREB-GCR já vem pré-configurado para rodar com o compilador gfortran. O compilador gfortran da GNU é facilmente instalado em qualquer distribuição Linux e oferece a vantagem de ser um software livre. Não obstante, o modelo GREB-GCR possibilita o uso de paralelismo com a linguagem OpenMP, o usuário pode optar por rodar os experimentos com 1 ou 2 threads, sendo sua especificação fornecida no script *run*, que por padrão já está configurado para trabalhar com 2 threads. O modelo ainda disponibiliza 7 variáveis de prognóstico em seu arquivo de saída, são estas: Temperatura do ar na superfície(K), Temperatura do ar na alta atmosfera(K), Temperatura do oceano profundo(K), umidade específica(kg/kg), albedo planetário(%), fluxo de calor latente(W/m²) e fluxo de calor sensível(W/m²). Todas estas variáveis do arquivo de saída representam médias mensais.

Produtos dos experimentos

Este trabalho visa expor ao público o modelo climático simplificado GREB-GCR, onde os resultados têm por finalidade fazer uma breve demonstração do comportamento dos experimentos EXP12, EXP17, EXP18, EXP19 e EXP20. Para tanto foram gerados gráficos da média global da anomalia da T_{surf} média anual (1950-2017), também foram gerados campos de superfície da T_{surf} média anual: climatologia (1961-1990) e anomalia [(1991 a 2017) - (1961 a 1990)]. As demais variáveis de saída do modelo GREB-

GCR foram expostas através de campos superficiais da climatologia anual (1961-1990), utilizando-se como exemplo toda a região da América do Sul (60°S-15°N|100°W-25°W). Destaca-se ainda que foi exposta a climatologia sazonal (1961-1990) da T_{surf} : Dezembro-Janeiro-Fevereiro(DJF) e Junho-Julho-Agosto(JJA).

Resultados e discussão

Na Figura 5 se encontram os gráficos da anomalia da T_{surf} média anual dos principais experimentos simulados com o modelo GREB-GCR. Na Figura 5a estão dispostos os experimentos EXP17, EXP18 e EXP19, sendo estes relacionados às equações 2 e 4, as quais simulam a ação dos RCG. Verifica-se que o EXP17 tem maior amplitude de oscilação quando comparado ao EXP18, este resultado já era esperado devido ao menor impacto energético das nuvens (EXP18: Ondas longas) em comparação à passagem de radiação de ondas curtas. No EXP19 se observou a ação conjunta dos EXP17 e EXP18 na estimativa da T_{surf} , utilizando-se para tal o balanço de radiação (ondas curtas menos ondas longas).

Segundo a teoria dos RCG, quando o Sol está magneticamente mais ativo, por exemplo, seu campo magnético bloqueia a penetração de RCG para a atmosfera terrestre, portanto, espera-se, conforme a teoria, que ocorra uma redução da cobertura de nuvens média global. Já quando a situação é inversa, durante o mínimo do ciclo solar, é esperado um aumento da cobertura de nuvens. Deste modo, quando o Sol atingiu seu pico de atividade durante o ciclo 19 (1954-1965), aproximadamente 1960, o modelo GREB-GCR simulou uma redução da cobertura de nuvens média global, permitindo um aumento da entrada

de radiação solar o que corroborou para o aumento da T_{surf} . Todavia, uma redução na cobertura de nuvens representa, também, uma redução da emissividade atmosférica e uma contribuição à

redução da T_{surf} . Conforme a Figura 5a, vê-se que o EXP19 é mais sensível à radiação de ondas curtas (EXP17) do que à radiação de ondas longas (EXP18).

Figura 5. Anomalia da T_{surf} (°C) simulada com o modelo GREB-GCR entre os anos de 1950 e 2017. a) Experimentos EXP17, EXP18 e EXP19; b) Experimentos EXP12 e EXP20.

Não obstante, sabe-se ainda que os últimos dois ciclos solares (23 e 24) foram marcados por uma redução da atividade magnética, e o novo modelo está respondendo conforme o sugerido pela teoria dos RCG, ou seja, simulando uma redução da T_{surf} . Isto também é evidenciado na Figura 5b, em que o EXP20 simulou um enfraquecimento do aumento da T_{surf} durante os ciclos 23 e 24, entretanto, cabe ressaltar que o EXP20 está fundamentado na atuação conjunta do CO_2 e dos RCG. Logo, evidencia-se que a sensibilidade do modelo ao aumento da concentração de CO_2 é predominante, sendo caracterizada por uma tendência de longo prazo, já a sensibilidade aos RCG é dada por flutuações periódicas de curta duração, aproximadamente 11 anos. Isto implica que a forçante antropogênica (CO_2) rege as tendências de longo prazo da T_{surf} simulada, podendo ser esta afetada por perturbações da forçante natural (RCG).

Na Figura 6a esta representada a climatologia anual da T_{surf} simulada no GREB-GCR utilizando o EXP20, o que compreende o período entre os anos de 1961 e 1990. Este campo de superfície confirma que o EXP20 está simulando as variações de grande escala da T_{surf} . O contraste térmico entre a região tropical e os polos está devidamente representado, destacando-se o efeito da topografia. Na cordilheira do Himalaia,

por exemplo, observa-se um núcleo frio com temperatura ligeiramente abaixo de zero. Nos polos se observa ainda que o Ártico não é tão gelado quanto a Antártida, sendo este fato devido à diferente porção continental que as regiões ocupam.

Na Figura 6b está representado ainda o campo superficial da anomalia da T_{surf} média anual, sendo esta a diferença entre as climatologias de 1991 a 2017 e 1961 a 1990. Neste campo foi caracterizado um aumento da T_{surf} sobre o Hemisfério Norte, principalmente sobre os continentes, destacando-se também a África setentrional. Verifica-se que o modelo GREB-GCR apresenta maior sensibilidade sobre regiões com topografia elevada (por exemplo: cordilheiras dos Andes e Himalaia). Este comportamento decorre da formação do gelo continental, pois as regiões topograficamente mais elevadas dispõem de camadas de gelo e o modelo representa a formação deste gelo através de parametrizações que se baseiam na T_{surf} , logo é estabelecido um processo de *feedback* em que a T_{surf} aumenta em função do CO_2 e provoca uma redução da camada de gelo, que por sua vez causa uma redução do albedo de superfície. Deste modo, a T_{surf} é forçada a ser ainda mais elevada, cabe ressaltar que o mesmo princípio também é válido para a formação do gelo sobre os oceanos.

Figura 6. a) Climatologia da temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$) média anual (1961-1990) simulada com o modelo GREB-GCR através do EXP20; e, b) Anomalia da temperatura superficial média anual ($^{\circ}\text{C}$) entre os períodos de 1991 a 2017 e 1961 a 1990.

Na Figura 7 estão disponíveis as climatologias (1961-1990) dos campos superficiais das demais variáveis de saída do modelo GREB-GCR, adotando-se como exemplo a região da América do Sul. Na Figura 7a está representada a Temperatura do ar na atmosfera superior, assim como na Figura 7b está a Temperatura oceânica, já na Figura 7c está representada a umidade específica. Todos os campos da Figura 7 estão conforme à climatologia, por exemplo: valores elevados de umidade sobre a região equatorial, destacando-se a região Amazônica.

Os demais campos representam o albedo planetário (Figura 7d), com destaque para o deserto

do Atacama, apresentando menor albedo; o Fluxo de calor latente (Figura 7e) que corresponde ao calor utilizado à condensação do vapor d'água ou formação de precipitação, e, por fim, tem-se a Figura 7f que representa o Fluxo de calor sensível. O Fluxo de calor sensível no modelo está fundamentado por um acoplamento newtoniano, sendo as regiões de valores mais elevados um indicativo de maiores variações da T_{surf} . É importante frisar a influência da cordilheira dos Andes sobre todos os campos da Figura 7, esta barreira orográfica é um dos principais fatores climáticos da América do Sul.

Figura 7. Climatologia média anual (1961-1990) das demais variáveis simuladas no modelo GREB-GCR utilizando o EXP20: a) Temperatura do ar na atmosfera superior (°C); b) Temperatura oceânica (°C); c) Umidade específica (g/kg); d) Albedo planetário (%); e) Calor latente (W/m^2); e, f) Calor sensível (W/m^2).

Durante os solstícios a declinação solar atinge a latitude dos trópicos de câncer e capricórnio, consequentemente a distribuição de radiação solar fornece mais energia para um hemisfério em detrimento do outro. Na Figura 8 estão representados os solstícios de verão/inverno do Hemisfério Sul e de verão/inverno do Hemisfério Norte, tão logo se constata que o modelo GREB-GCR é capaz de simular os aspectos sazonais da T_{surf} , destacando-se as

principais diferenças regionais de cada período. O Hemisfério Norte é marcado pelo contraste térmico durante os solstícios, atingindo durante o inverno (DJF) temperaturas negativas e durante o verão (JJA) temperaturas positivas. Destaca-se ainda que o Hemisfério Sul apresentou pouca variação da T_{surf} entre os solstícios, e isso se deve à maior presença de oceanos, que por sua vez regulam a distribuição de energia superficial.

Figura 8. Climatologia da temperatura superficial (°C) média sazonal (1961-1990) Dezembro-Janeiro-Fevereiro (DJF) e Junho-Julho-Agosto (JJA) simulada com o modelo GREB-GCR utilizando o EXP20.

Conclusões

Tendo-se em vista tudo que foi exposto, conclui-se que o modelo GREB-GCR conseguiu manter a estabilidade climática ao simular a T_{surf} considerando a teoria dos RCG, observou-se que os principais aspectos de grande escala do sistema climático global ainda foram mantidos. As flutuações da T_{surf} utilizando o EXP20 permitiram que as simulações fossem mais realísticas em decorrência das variações periódicas. Evidenciou-se, também, que para os últimos anos o modelo simulou um enfraquecimento da tendência de aumento apresentada nas últimas décadas.

Deste modo, o modelo GREB-GCR representa uma parcela dos esforços da comunidade científica à investigação do clima e do aprofundamento da base teórica em Física do Clima. Destaca-se que o modelo GREB-GCR está disponível para download em <https://github.com/Emerson-D-Oliveira/GREB-GCR-v.0.1>. Os objetivos desta pesquisa são a difusão de conhecimento e o estímulo ao desenvolvimento de novas pesquisas nas áreas de Meteorologia e Climatologia.

Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo amparo a esta pesquisa, à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas (PPGCC).

Referências

- Arrhenius, S., 1896. On the influence of carbonic acid on the air temperature of the ground. *Philos Mag*, 5, 237–276, doi: [10.1080/14786449608620846](https://doi.org/10.1080/14786449608620846)
- Bellon, G., 2011. Monsoon intraseasonal oscillation and land–atmosphere interaction in an idealized model. *ClimDyn*, 37, 1065–1079, .doi: [10.1007/s00382-010-0893-0](https://doi.org/10.1007/s00382-010-0893-0)
- Biktash, L.Z., 2014. Evolution of Dst Index, cosmic rays and global temperature during solar cycles 20-23. *Journal: Advances in Space Research*, 54, 2530. doi: [10.1016/j.asr.2014.08.016](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.08.016)
- Bray, J.R., 1971. Solar-Climate Relationships in the Post-Pleistocene. *Science, New Series*, 171, 1242– 1243.
- Budyko, M.I., 1969. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth. *Tellus*, 21,

- 611–619. doi: [10.1111/j.2153-3490.1969.tb00466.x](https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1969.tb00466.x)
- Dickinson, R.E., 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bull Am Meteor Soc*, 56, 1240. doi: [10.1175/1520-0477\(1975\)056](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1975)056)
- Dommenget, D., Flöeter, J., 2011. Conceptual Understanding of Climate Change with a Globally Resolved Energy Balance Model. *Climate dynamics*, 37, 2143-2165. doi: [10.1007/s00382-011-1026-0](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1026-0)
- Frigo, E., Pacca, I.G., Pereira-Filho, A.J., Rampelloto, P.H., Rigozo, N.R., 2013. Evidence for cosmic ray modulation in temperature records from the South Atlantic Magnetic Anomaly region. *Ann. Geophys.*, 31, 1833-1841. doi: [10.5194/angeo-31-1833-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-1833-2013)
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M. and Morice, C.P., 2012. Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research*, 117, D05127. doi: [10.1029/2011JD017139](https://doi.org/10.1029/2011JD017139)
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S. and Rigor, I.G., 1999. Surface air temperature and its variations over the last 150 years. *Reviews of Geophysics*, 37, 173-199. doi: [10.1029/1999RG900002](https://doi.org/10.1029/1999RG900002)
- Jones, P.D., Osborn, T.J., Briffa, K.R., Folland, C.K., Horton, B., Alexander, L.V., Parker, D.E. and Rayner, N.A., 2001. Adjusting for sampling density in grid-box land and ocean surface temperature time series. *J. Geophys. Res.* 106, 3371-3380. doi: [10.1029/2000JD900564](https://doi.org/10.1029/2000JD900564)
- Kennedy J.J., Rayner, N.A., Smith, R.O., Saunby, M. and Parker, D.E., 2011. Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations measured in situ since 1850 part 2: biases and homogenisation. *Journal of Geophysical Research*, 116, D14104. doi: [10.1029/2010JD015220](https://doi.org/10.1029/2010JD015220)
- Kim, J. et al., 2016. Hygroscopicity of nanoparticles produced from homogeneous nucleation in the CLOUD experiments. *Journal: Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 293-304. doi: [10.5194/acp-16-293-2016](https://doi.org/10.5194/acp-16-293-2016)
- Kirkby, J., 2007. Cosmic rays and Climate. *SurvGeophys*, 28, 333-375. doi: [10.1007/s10712-008-9030-6](https://doi.org/10.1007/s10712-008-9030-6)
- Lambert, F. H., Chiang, J. C. H., 2007. Control of land-ocean temperature contrast by ocean heat uptake. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34. doi: [10.1029/2007GL029755](https://doi.org/10.1029/2007GL029755)
- Lewis, N., Curry, J.A., 2014. The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake estimates. *Climate Dynamics*, 45, 1009-1023. doi: [10.1007/s00382-014-2342-y](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2342-y)
- Lihua, M.A., 2017. Possible solar modulation of global land-ocean temperature. *ActaGeodyn.Geomater.*, 14, 251-254. doi: [10.13168/AGG.2017.0008](https://doi.org/10.13168/AGG.2017.0008)
- Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A. and Jones, P.D., 2012: Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: the HadCRUT4 dataset. *Journal of Geophysical Research*, 117, D08101. doi: [10.1029/2011JD017187](https://doi.org/10.1029/2011JD017187)
- North, G.R., Cahalan, R.F.; Coakley, J.A., 1981. Energy balance climate models. *Rev. Geophys. Space Phys.* 19, 91-121, doi: [10.1029/RG019i001p00091](https://doi.org/10.1029/RG019i001p00091)
- Oliveira, E.D., Fernandez, J.H., Mendes, D., Spyrides, M.H.C., Gonçalves., W.A., 2019. Validação de um modelo climático simplificado adaptado para simular os efeitos do aumento da concentração de CO₂ associados à teoria dos raios cósmicos galácticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12, doi: [10.26848/rbgf.v12.3.p768-778](https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p768-778)
- Osborn, T.J. and Jones, P.D., 2014. The CRUTEM4 land-surface air temperature data set: construction, previous versions and dissemination via Google Earth. *Earth System Science, Data6*, 61-68. doi: [10.5194/essd-6-61-2014](https://doi.org/10.5194/essd-6-61-2014)
- Owens, M.J., McCracken, K.G., Lockwood, M., Barnard, L., 2015. The heliospheric Hale cycle over the last 300 years and its implications for a “lost” late 18th century solar cycle. *J. Space Weather Space Clim*, 5, A30. doi: [10.1051/swsc/2015032](https://doi.org/10.1051/swsc/2015032)
- Pudovkin, M.I., Veretenenko, S.V., 1997. Effects of the galactic cosmic ray variations on the solar radiation input in the lower atmosphere. *J Atmos Sol Terr Phys*, 59, 1739–1746. doi: [10.1016/S1364-6826\(96\)00183-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(96)00183-6)
- Puetz, S.J., Prokoph, A., Borchardt, G., 2016. Evaluating alternatives to the Milankovitch theory. *Journal of Statistical Planning and*

- Inference, 170, 158-165. doi: [10.1016/j.jspi.2015.10.006](https://doi.org/10.1016/j.jspi.2015.10.006)
- Rusov, V.D. et al., 2010. Galactic Cosmic Rays - Clouds Effect and Bifurcation Model of the Earth Global Climate. Part 1.Theory.Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72, 398-408. doi: [10.1016/j.jastp.2009.12.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.12.007)
- Sellers, W.D., 1969. A global climatic model based on the energy balance of the Earth– atmosphere system. J. Appl. Meteor, 8, 392–400. doi: [10.1175/1520-0450\(1969\)008](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1969)008)
- Storelvmo, T., Leirvik, T., Lohmann, U., Phillips, P.C.B, Wild, M., 2016. Disentangling greenhouse warming and aerosol cooling to reveal Earth’s climate sensitivity. Nature Geoscience, 9, 286-289. doi: [10.1038/NGEO2670](https://doi.org/10.1038/NGEO2670)
- Svensmark, H., Enghoff, M.B., Pedersen, J.O.P., 2013. Response of cloud condensation nuclei (> 50 nm) to changes ion-nucleation.Journal: Physics Letters A, 377, 2343-2347. doi: [10.1016/j.physleta.2013.07.004](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2013.07.004)
- Svensmark, H., Friis-Christensen, E., 1997. Variation in cosmic ray flux and global cloud coverage a missing link in solar–climate relationships. J Atmos Sol Terr Phys, 59, 1225. doi: [10.1016/S1364-6826\(97\)00001-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00001-1)
- Tsonis, A.A., Deyle, E.R., May, R.M., Sugihara, G., Swanson, K., Verbeten, J.D and Wang, G., 2015. Dynamical evidence for causality between galactic cosmic rays and interannual variation in global temperature. PNAS, 112, 3253-3256. doi: [10.1073/pnas.1420291112](https://doi.org/10.1073/pnas.1420291112)