



Relatório Técnico GSTAR 2020-001

DISSR/CGCT/INPE

Modelo de Radiação Solar GL 1.2

Produto operacional GL 1.2/GOES-16

Data de implementação: 01/01/2018

Preparado por:

José Marcio Britto
Anthony Carlos Silva Porfirio

Responsável Científico:

Juan Carlos Ceballos
Simone Marilene Costa

Responsável Técnico:

José Marcio Britto

SUMÁRIO

1. Contextualização	1
2. Ambiente de desenvolvimento e operacional	1
3. Dados de entrada	2
4. Programas e módulos do Modelo GL	5
4.1 Programa operacional de execução do modelo automatizada - rodaSolarRad	5
4.2 Programa principal do modelo GL - MainSolarRadGL	5
4.3 Módulo DegradeFile	7
4.4 Módulo ReprojSat2Reg	8
4.5 Módulo LibGL	8
4.6 RegularFunc	8
5. Integral Diária - solarRadDailyAvg	10
Anexo	

1. Contextualização

O modelo físico GL (de **GL**lobal radiation)⁽¹⁾ versão 1.2 roda operacionalmente no CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) desde 2003, utilizando-se de imagens do canal visível dos satélites americanos da série GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) para gerar estimativas de irradiância solar global ao nível de superfície, com foco na América do Sul e oceanos adjacentes. No período 1997-2017, quatro satélites geoestacionários GOES Leste forneceram a informação básica satelital para o modelo GL: GOES-8, GOES-10, GOES-12 e GOES-13. As imagens utilizadas foram do canal 1 do sensor Imager desses satélites, originalmente com resolução 1 km mas degradadas à resolução 4 km. A partir de 2018, o satélite GOES-16, primeiro da nova geração GOES, forneceu imagens através do sensor ABI (Advanced Baseline Imager) em termos de imagem hemisféricas (full-disk) com frequência 10 a 15 minutos, maior detalhamento espectral e alta resolução⁽²⁾. No intuito de continuar o monitoramento do recurso solar, em 2018 houve a necessidade de migrar/adaptar os códigos operacionais GL1.2 ao padrão das imagens ABI. Neste contexto, este documento apresenta uma visão geral do sistema de processamento de dados do produto GL via GOES-16, bem como do ambiente operacional e programas associados. Incluem-se também informações sobre os dados de entrada/saída do GL.

2. Ambiente de desenvolvimento e operacional

O desenvolvimento e operação do modelo GL são feitos em máquinas virtuais nomeadas de *MAMBAI* e *ITARANA* respectivamente, sendo uma um espelho da outra (virtualmente idênticas). Elas se localizam dentro de um servidor chamado *NetApp*, no ambiente operacional do CPTEC. O acesso a essas máquinas é feito via SSH por meio de login com usuário e senha disponibilizados pelo setor de computação do CPTEC.

As máquinas consistem em um processador de 8 coresnúcleos e 8GB de memória RAM. Do espaço em disco pertencente à Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA), aos produtos de Radiação Solar e Terrestre são dedicados 900GB com possibilidade de expansão. O sistema operacional utilizado é o Linux.

O produto operacional GL é dividido em 2 diretórios raízes principais:

¹ CEBALLOS, J.C., M.J. BOTTINO, J.M. DE SOUZA (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. J. Geophys. Res., v. 109, D02211, doi: 10.1029/2003JD003531

² SCHMIT, T.J. et al. (2017). A closer look at the ABI on the GOES-R series. Bulletin of the Amer. Meteor. Society. v. 98(4). 681-698.

- /share/goes/goes16/rad_solar
- /scripts/goes/goes16/rad_solar/radSolarModelGL

No primeiro diretório (/share) são armazenados os dados gerados pelo modelo (outputs).

Dentro do diretório (scripts/.../radSolarModelGL) encontram-se os programas e alguns dados de entrada (inputs) necessários para o algoritmo GL. Este diretório é dividido em duas pastas denominadas de /scripts e /bruto. A primeira contém os códigos e módulos que realizam todos os processamentos do modelo, enquanto na segunda encontram-se dados de navegação que alimentam o modelo (LAT e LON).

Todos os códigos dos programas e módulos foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Python; deste modo, fez-se necessária a criação de um ambiente virtual isolado Python dentro das máquinas *MAMBAI* e *ITARANA*. Este ambiente nada mais é do que uma cópia contendo todos os diretórios e bibliotecas necessários para a execução dos programas. Os pacotes e bibliotecas do Python necessárias são encontrados no arquivo “package-list.txt”, que está na pasta dos produtos de radiação solar (rad_solar), junto de um outro arquivo texto que descreve como criar o ambiente para a execução dos programas.

No ambiente de desenvolvimento são realizados todos os ajustes e alterações na estrutura física e de processamento do modelo; ele também permite a realização de testes e desenvolvimento de novos produtos e versões aprimoradas. Posteriormente, para a transferência de uma potencial nova versão do modelo do ambiente de desenvolvimento para o operacional, utiliza-se um sistema de controle de versões conhecido como SVN (Apache Subversion). Os códigos são enviados através do SVN para um servidor de projetos do CPTEC (projetos.cptec.inpe.br/), e posteriormente utilizando o SVN, estes códigos são baixados para o ambiente operacional via comandos no terminal do Linux.

3. Dados de entrada

Atualmente o modelo GL versão 1.2 faz uso apenas das imagens do canal 2 do sensor ABI (comprimento de onda central em 0,64 μm) do GOES-16. Este satélite encontra-se em uma órbita geoestacionária e se posiciona sobre o Equador em 75.2° W (com eventuais pequenos deslocamentos). As imagens que o modelo recebe apresentam cobertura Global (full disk) e estão em projeção satélite, com resolução espacial de 0,5 km no ponto sub-satélite (nadir) e resolução temporal típica de 15 minutos (01/2018 a 03/2019) e 10 minutos (a partir de abril de 2019), no formato NetCDF e fornecendo o Fator de Refletância (FR) nos canais solares. As imagens fornecidas pelo CPTEC têm dimensão de

10848 linhas e 10848 colunas ⁽³⁾ e são alocadas no seguinte diretório: /oper/goes/goes16/brutos/ch02. As imagens são nomeadas como: S10635301_yyyyMMddHHmm.nc, onde S1063 é o código da fonte, 5301 refere-se ao canal do satélite e yyyyMMddHHmm são as informações da data e horário.

acho que o GOES16 é S106353 e o canal é 01 (mania de começar com 00 para o canal 1, 01 para o 2, etc).

A figura 1 ilustra um exemplo de imagem full-disk do canal 2 ABI "resolução 1 km" (10848 linhas e 10848 colunas), e a Figura 2 um recorte de sua projeção em grade regular para "resolução 4 km". O recorte é denominado de "América Latina", abrangendo ...°S a °N em latitude e ...°O a ... °O em longitude (... linhas e ... colunas). O recorte da Figura 2 é veiculado na página web da DSA ⁽⁴⁾

A série histórica dos dados GL tem resolução de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ (grade regular), nas latitudes de 50S a 21.96N, e longitudes de 100O a 28O. Para manter esta resolução espacial utilizando imagens ABI Ch2, são aplicados dois procedimentos sucessivos:

1) as imagens originais de 1 km são reamostradas selecionando 1 pixel a cada 4 disponíveis, tanto em linhas como em colunas. Esse procedimento conduz a uma matriz de 2712 linhas $\times$ 2712 colunas. A conversão é realizada a partir do módulo **DegradeFile** (descrito na seção 4.3) usando o método de reamostragem.

2) Os arquivos de navegação de latitudes e longitudes na resolução de 4 km, necessários para os processos de mudança de projeção são encontrados na pasta do modelo bruto/nav. Estes arquivos de navegação contêm a coordenada (latitude, ou longitude) de cada um dos pixels da matriz reamostrada de 2712×2712 .

³ Esta resolução espacial corresponde realmente a pixels de 1 km. A imagem original foi degradada, de forma que tenha correspondência um-a-um com os pixels dos outros canais solares 1, 3 e 5 (Schmit et al. 2017).

⁴ Deve ser esclarecida uma questão importante de vocabulário: ao tratar de imagens em projeção satélite, o termo "resolução 1 km" refere-se ao tamanho *aproximado* de um píxel no ponto sub-satélite (nadir). Desde que a varredura de imagem pelo ABI com velocidade constante e abertura de visada de 14 μ radianos (Schmit et al., 2017), e dada a curvatura terrestre, pixels mais afastados do azimute correspondem a dimensões cada vez maiores. Ao amostrar uma imagem em termos de um pixel a cada 4 linhas e 4 colunas (ou seja, um em 16 pixels), a imagem fica degradada a uma "resolução de 4 km", tamanho sub-satélite aproximado da célula de grade criada *mas não do pixel*. A informação foi degradada.

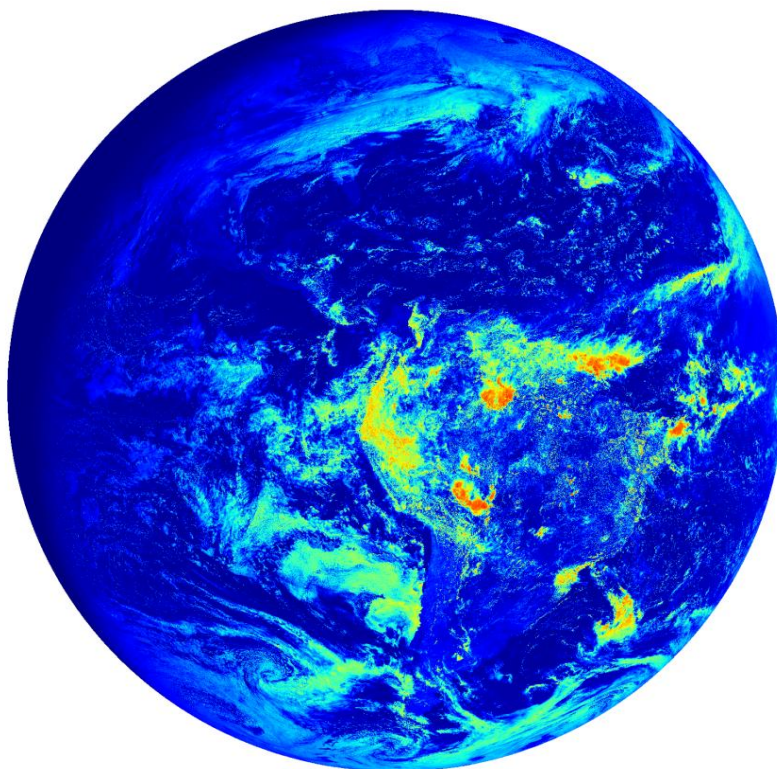


Figura 1 - Imagem Full Disk Ch2 (vis) "resolução 1 km" GOES-16 data 15/02/2018 15:00 UTC. A imagem original tem 10848 linhas e 10848 colunas
As datas das duas imagens deveriam ser as mesmas!! E, as duas em tons de cinza

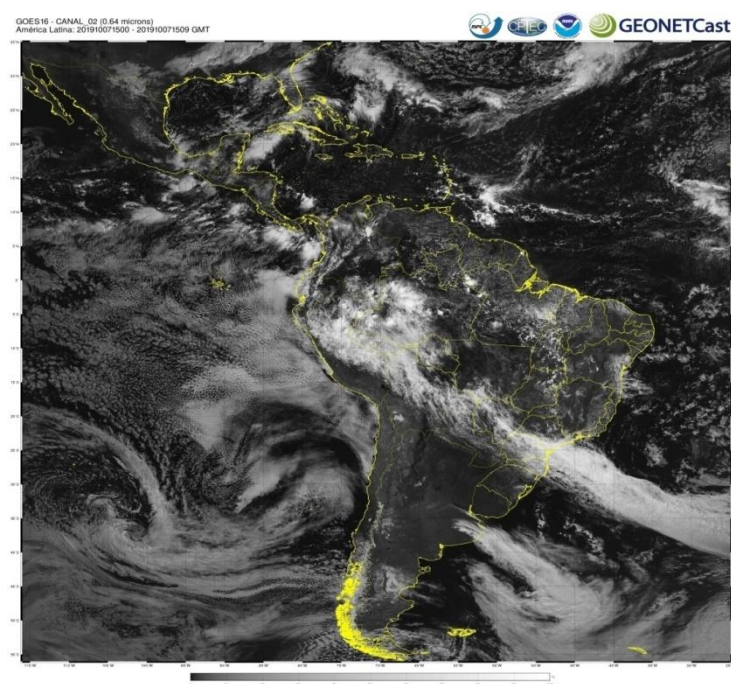


Figura 2 - Recorte "América Latina" da imagem da Figura 1. Projeção regular LAT-LON, "resolução km", linhas e colunas. Fonte: <http://satelite.cptec.inpe.br>.

4. Programas e módulos do Modelo GL

Os programas do modelo operacional GL atualmente estão escritos na linguagem de programação Python e suas principais funções estão divididas em módulos, que gerenciam as rotinas do modelo e realizam os cálculos para estimar a irradiância solar. Neste capítulo são descritos os programas e módulos.

Para o funcionamento de todos os programas é necessário inserir na primeira linha dentro de todos os códigos o comando para identificação de qual é o interpretador que será utilizado, neste caso é usado o interpretador do ambiente virtual que foi criado com as bibliotecas Python. Com o propósito de melhor organizar as diversas rotinas e funções associadas, o modelo foi dividido em diversos módulos que contêm as funções responsáveis por realizar as operações e cálculos do modelo e são explicados nas seções seguintes.

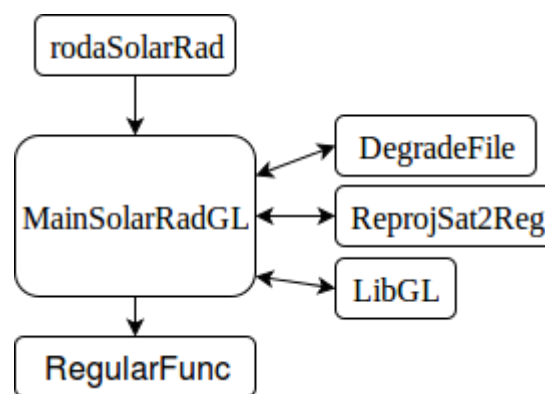


Figura 3 - Fluxograma dos programas GL.

4.1 Programa operacional de execução do modelo automatizada - rodaSolarRad

Este é um script preliminar que visa a automatização do modelo e seus processos executando-o em intervalos de tempo. O programa gerencia a execução do modelo GL no ambiente operacional, realizado através do Crontab (agendador de tarefas de sistemas Linux), e atribui a data do sistema como um parâmetro. Em seguida faz a listagem de todas as imagens Ch2 disponíveis e executa o modelo GL para cada imagem.

4.2 Programa principal do modelo GL - MainSolarRadGL

Este é o programa principal do modelo GL, responsável por executar todos os processos, desde ler a data da rodada até enviar o arquivo log para o BDI (Banco de Dados

de Informações); também gerencia todos os caminhos e módulos, e executa todas as funções .

Para o funcionamento deste programa é necessário definir uma data no formato YYYYMMDDHHmm (Ano, mês, dia, hora e minuto) como parâmetro ao executá-lo. Exemplos de execução são:

```
sudo -u goes caminho_do_arquivo/MainSolarRadGL.py YYYYMMDDHHmm
```

ou na pasta do programa

```
sudo -u goes ./MainSolarRadGL.py YYYYMMDDHHmm
```

Para a execução no ambiente de desenvolvimento ou operacional faz-se necessário o uso do comando “sudo -u goes” antes do programa devido ao fato do modelo estar associado ao grupo dos produtos do GOES da DSA, que necessitam da permissão de administrador do grupo para que sejam executados devidamente.

Neste programa são definidos os caminhos dos dados de entrada e saída, as nomenclaturas dos produtos do GL e o gerenciamento destes produtos para serem salvos em suas devidas pastas. No programa são carregados os arquivos de navegação (campos latitude e longitude) full disk com 4 km de resolução espacial e seus dados são armazenados em matrizes.

Para o carregamento das imagens Ch2 primárias (1 km), é definido o caminho de onde estão os dados brutos do GOES-16. Este caminho serve de parâmetro para a função de degradação de 1 km para 4 km onde ocorre a extração dos dados de fator de refletância (FR) do arquivo NetCDF e é feita a reamostragem da imagem. A partir da matriz FR já degradada é utilizado outro módulo que contém as funções para recortar as matrizes de FR, Lat e Lon para uma região com foco na América do Sul e oceanos vizinhos, com os limites seguintes:

Latitude: 50.0S, 21.96 N

Longitude: 100.0O, 28.0 O

Logo depois do recorte é realizada a reprojeção da grade satélite para uma *grade regular* em latitude e longitude, com resolução $0,04^\circ \times 0,04^\circ$ e dimensão 1800 linhas $\times$ 1800 colunas (esta grade está exatamente contida nos limites mencionados de latitude e longitude). A Figura 4 ilustra o resultado da amostragem/reprojeção de fator de refletância FR.

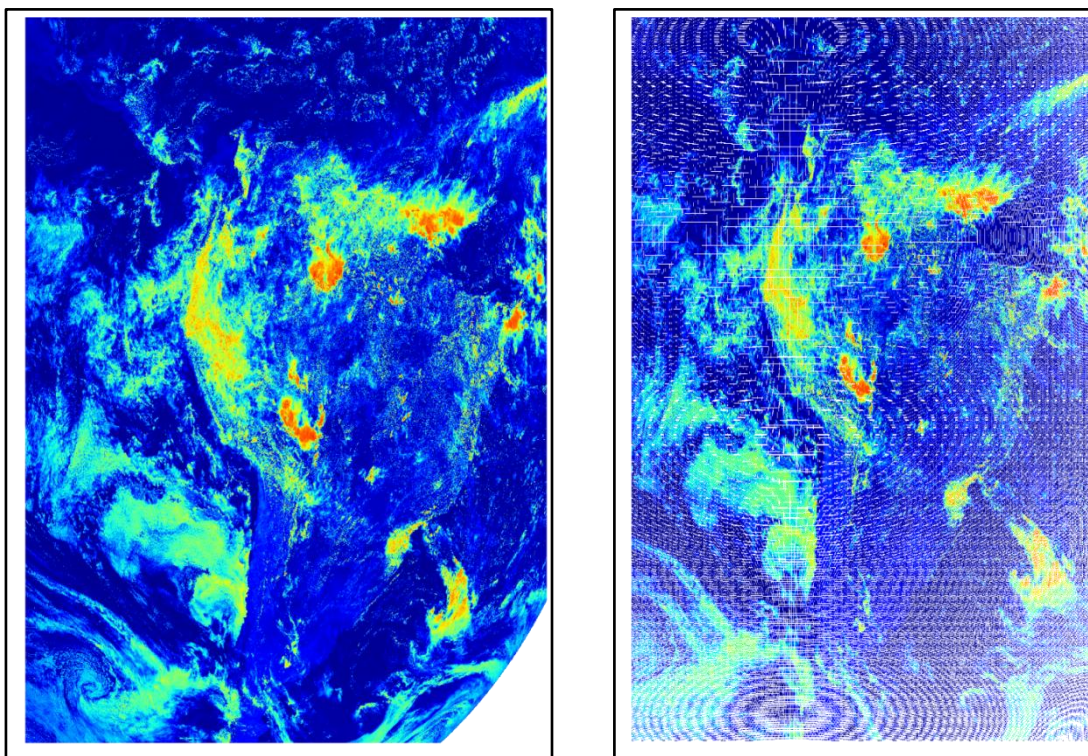


Figura 4 - Imagem Ch2 (vis) GOES-16 recortada na América do Sul resolução 4 km projeção satélite & regular data 15/02/2018 15:00 UTC.

Com as matrizes de FR devidamente reamostradas (com resolução de 4 km) e reprojetadas (na grade regular), dá-se início à parte física do modelo.

As funções para leitura e cálculo astronômicos são executadas e por fim é aplicado o módulo físico contendo as parametrizações para a modelagem da radiação solar.

Os valores estimados de radiação solar correspondentes a uma matriz de FR são armazenados em três matrizes/variáveis que são: Irradiância solar global, irradiância solar UV+VIS e refletância VIS. As matrizes são posteriormente gravadas no formato binário integer com 2 bytes.

4.3 Módulo DegradeFile

Este módulo é particionado em duas funções, a primeira função **goes16_loading** é responsável por abrir as imagens do GOES-16 no formato NetCDF e extrair a variável de FR e armazenar os dados em uma matriz. A segunda função **degrade** recebe a matriz FR e um fator que define a resolução da amostragem.

O método de reamostragem consiste em usar o primeiro pixel de cada conjunto de 16 pixels (4x4), passando assim de uma grade de 1 km para 4 km.

4.4 Módulo ReprojSat2Reg

Este módulo também é dividido em duas funções. A primeira função chamada **CutArea**, gera uma grade em projeção satélite para a América do Sul baseado nos limites da grade informados, ou seja, realiza, o recorte das matrizes de FR, latitude e longitude originais.

A segunda função **Reproj2Reg** realiza a reprojeção das imagens da projeção satélite para a projeção regular.

4.5 Módulo LibGL

Aqui são armazenadas as informações de parâmetros físicos e ambientais necessárias para a execução do GL. Algumas variáveis são: comprimento de onda do início e fim de determinadas faixas do espectro solar, valores adotados para a água precipitável (w_2), pressão atmosférica ao nível da superfície (p), conteúdo total de ozônio (O_3), dentre outros. Todos os parâmetros são exportados para o programa principal.

4.6 RegularFunc

Este módulo executa alguns procedimentos básicos para os arquivos de saída do modelo. Por exemplo, o módulo inclui uma função para converter a data da imagem em dia juliano e funções para gerar arquivos em diversos formatos (png, binário e geoTiff).

Para a integração diária dos valores de irradiância instantâneos (para cada imagem Ch2) há uma função de interpolação 3x3 que é executada de maneira recursiva com o propósito de preencher as falhas (buracos) causados pela reprojeção de satélite para regular. Essas falhas são evidentes na Figura 4 (reprojeção). O processo de correção é descrito com maior detalhamento na seção 5.

As Figuras 5 ilustram o resultado do modelo GL 1.2 (irradiâncias global e UV+VIS) para um horário determinado. A Figura 6 ilustra a Refletância correspondente ao Fator de refletância FR.

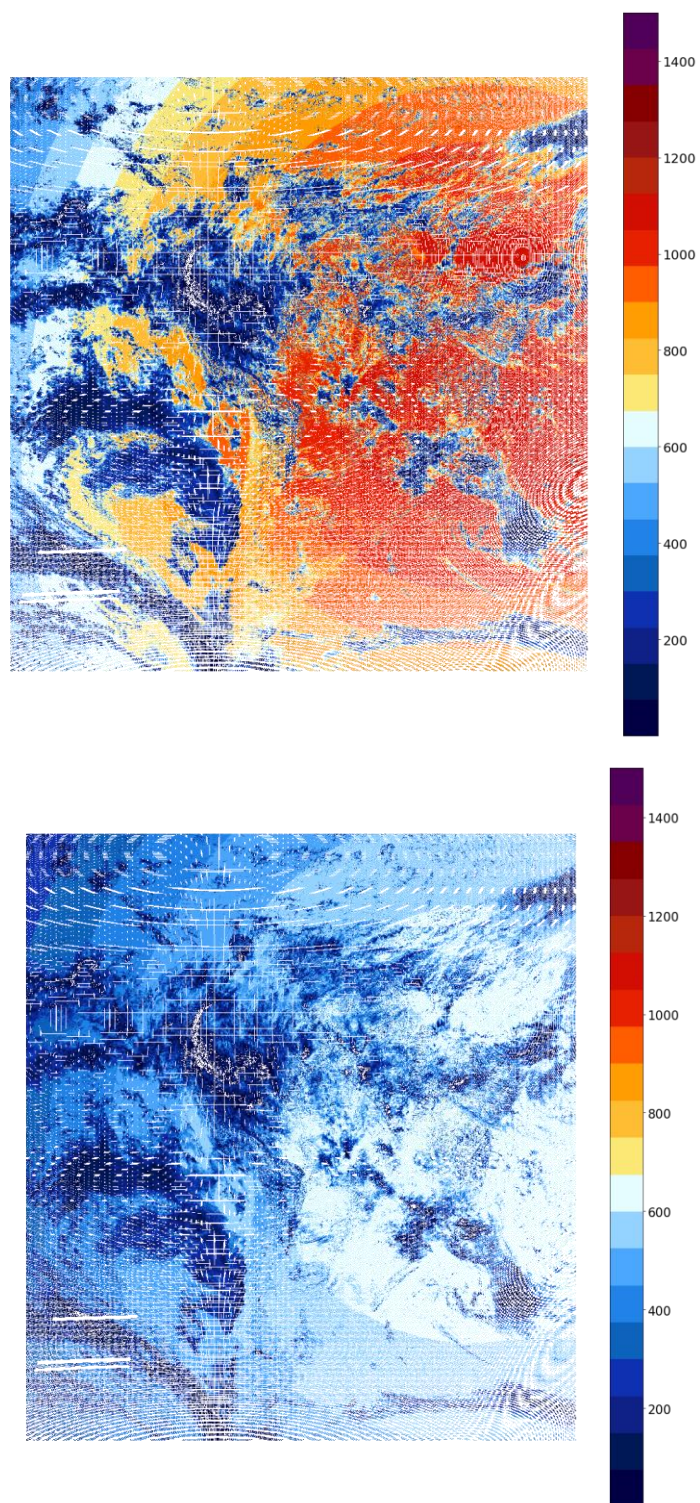


Figura 5 - Outputs do modelo GL, em W.m^{-2} : Irradiância global, Irradiância UV+VIS - 15/02/2018 15:00 UTC.

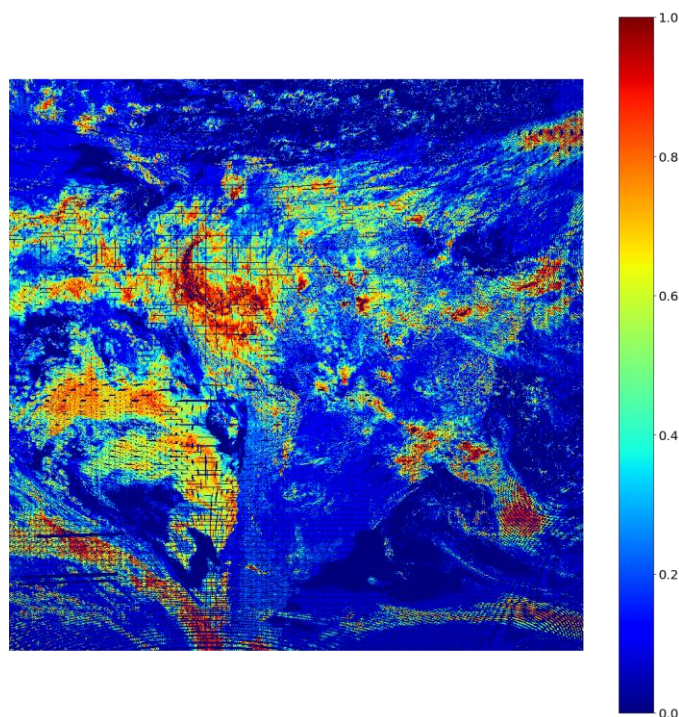


Figura 6 - Outputs do modelo GL: Refletância (escala 0-1) - 15/02/2018 15:00 UTC.

5. Integral Diária - solarRadDailyAvg

Durante o dia o modelo GL gera em média 64 arquivos de irradiância solar global e UV+VIS. Ao encerrar o dia realiza-se o cálculo da integral diária utilizando o método de trapézios. Para obter uma média coerente os seguintes requisitos são adotados:

- 1) Possuir intervalo menor ou igual que 3 horas nos seguintes quesitos:
 - Entre o horário do primeiro arquivo disponível e o horário de início da luz solar do dia (nascer do sol);
 - entre o horário do último arquivo do dia e o fim da luz solar (pôr do sol);
 - e entre os horários de dois arquivos sucessivos.
- 2) Seguindo a lógica do item 1, a regra se aplica para cada pixel ao longo do dia. Devido a falhas nas imagens ou da reprojeção, alguns pixels possuem valores inválidos (valor 0) em alguns horários. Um pixel que possua valores inválidos e intervalos que não atendem a primeira regra tem sua integral diária cancelada e zerada.

Para os pixels que atenderam a segunda regra é calculada a integral diária. Para preencher a informação nos pixels zerados, realiza-se uma média 3x3 recursivamente. O procedimento é realizado 10 vezes, de modo que muitas das falhas ("buracos") são preenchidas pela

informação dos vizinhos (pixels) mais próximos. Os buracos são preenchidos sendo substituídos pelos dados preenchidos da matriz no qual foi realizada a média.

A Figura 7 ilustra o resultado final da integral diária do GL para irradiância global e UV+VIS.

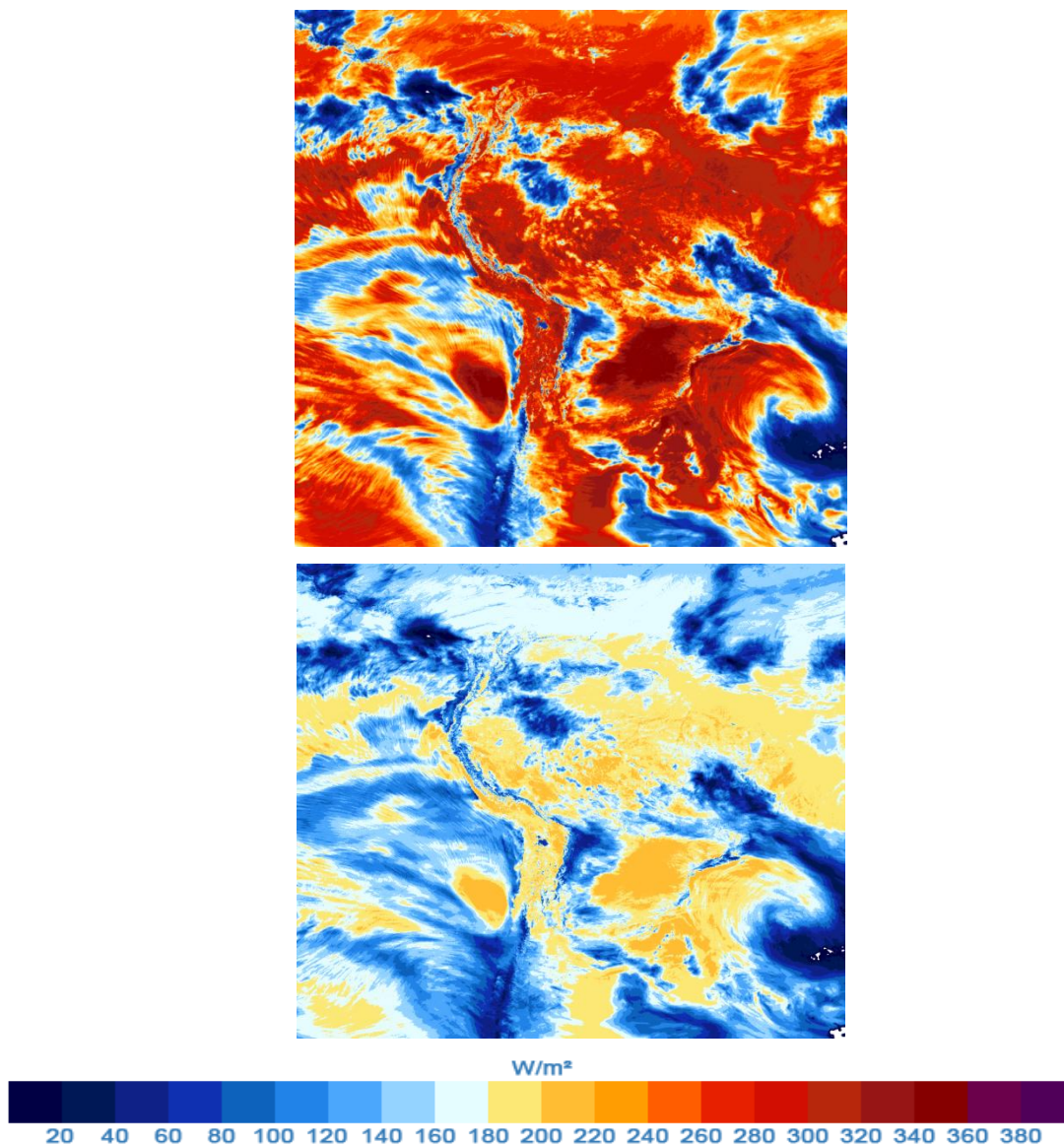


Figura 7 - Outputs do modelo GL: Irradiância global diária e Irradiância UV+VIS diária - 28/10/2018.

Observação: Os valores de global e UV+VIS são armazenados como matrizes com o nome Os valores armazenados são a parte inteira de 10 vezes o valor de GL. Dessa forma, a resolução de até uma casa decimal é preservada e um tamanho mínimo de arquivo conseguido, utilizando-se o formato Inteiro 2 bytes.

Anexo: Atualização do Modelo GL 1.2 Operacional

Implementação: 01/11/2019

A partir de novembro de 2019, foi implementada uma solução para minimizar a existência de falhas (buracos) na reprojeção de imagens instantâneas. O método consiste em realizar a reprojeção de satélite (resolução 1 km) para regular em resolução $0,04^\circ$ utilizando os arquivos completos de FR e a navegação correspondente. Desta forma, mais píxeis são utilizados para alocar em cada célula de $0,04^\circ \times 0,04^\circ$. O processo pode produzir eventual redundância na alocação de pixels de alta resolução, mas as células de grade regular são sempre preenchidas (a menos de falhas objetivas na geração da imagem). A interpolação descrita na seção 5 não é mais necessária.