



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO GL NA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR POR SATÉLITE

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Amanda Monteiro Galvão (UNISAL, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: amanda@cptec.inpe.br

Dr. Juan Carlos Ceballos (DSA-CPTEC/INPE, Orientador)

E-mail: ceballos@cptec.inpe.br

Julho de 2007

RESUMO

O modelo físico GL estima a radiação solar através dos valores de refletância no canal VIS das imagens do satélite GOES para América do Sul. São submetidas ao modelo GL todas as imagens disponíveis de cada dia, obtendo-se a integral sobre o período diurno e a correspondente média diária. E como resultado são geradas imagens com resolução de 0,04° e dimensão de 1800 por 1800 pixels. Este programa roda operacionalmente na DSA/CPTEC desde 2002.

Iniciado em agosto de 2006, o trabalho visa a correção de séries passadas de resultados do modelo GL, e a validação do modelo físico GL versão 1.2 por comparação com instrumentos solarimétricos de redes de superfície no Brasil e países vizinhos.

A correção mencionada refere-se à calibração do sensor VIS-GOES, corrigindo sua degradação. A tarefa implica em reprocessar a série de GOES12 entre abril 2003 e dezembro 2004, e está em andamento. Uma vez realizada, ficará disponível uma série de 11 anos de radiação solar diária sobre América do Sul.

Em paralelo, elaborou-se um método estatístico para comparar estimativas de satélite e “verdade terrestre”. Foi definida uma lista de locais geográficos na América do Sul, para os quais os dados diários de GL são extraídos. Uma lista complementar contém os dados de instrumentos solarimétricos, contidos em banco de dados na DSA (rede associada ao CBERS) e outras instituições. Foram elaborados programas em Fortran para detectar dados anômalos e comparar os pares de dados satélite/estação restantes. O resultado são arquivos de controle mensal que permitem julgar tanto a qualidade do modelo GL como a situação das estações terrestres. Este resultado permite reportar às instituições responsáveis com informações sobre a qualidade de sua rede e necessidade de manutenção.

SUMÁRIO

RESUMO

| | |
|--|---------|
| Capítulo 1 – Objetivos do Trabalho | pág. 04 |
| Capítulo 2 – O modelo GL de Radiação | pág. 04 |
| 2.1 - Modelo GL (versão 1.2) | pág. 04 |
| 2.1.1 - Intervalos UV+VIS e IV | pág. 04 |
| 2.1.2 – Nebulosidade (variável C) | pág. 05 |
| Capítulo 3 – As Séries Temporais | pág. 08 |
| 3.1 Reprocessamento do Modelo GL do período de janeiro/2003 a julho/2005 | pág. 10 |
| Capítulo 4 – Validação dos Resultados do Modelo GL de Radiação | pág. 11 |
| Capítulo 5 – Análise da Qualidade dos Dados | pág. 12 |
| 5.1 - Obtenção dos dados das estações - Rotina 1 | pág. 12 |
| 5.2 - Extração dados do arquivo saída do Modelo GL - Rotina 2 | pág. 14 |
| 5.3 - Diferença entre os dados da saída do modelo GL com os dados das estações terrestres (MODELO - ESTAÇÃO) - Rotina 3 | pág. 15 |
| 5.4 – Verificação e marcação de dados seguindo uma classificação Rotina 4 | pág. 15 |
| 5.5 - Filtragem dos dados – Rotina 5 | pág. 17 |
| CAPÍTULO 6 – Resultados | pág. 19 |
| Referências Bibliográficas | pág. 29 |

Capítulo 1 – Objetivos do Trabalho

O modelo GL de Radiação é executado operacionalmente desde 2002 na DSA/CPTEC, e recebe imagens do satélite GOES a cada meia hora durante todo período diurno sobre a América do Sul.

Embora seja operacional desde 2002, há resultados desde 1996 com características (resolução, dimensão) que diferem dos resultados atuais, além de conter erros do valor da distância Terra-Sol e a calibração do modelo, que se estendem até Agosto/2005.

Assim, os objetivos durante o período de agosto/2006 a julho/2007 foram os seguintes:

- **Reprocessar os arquivos GOES entre janeiro/2003 e julho/2005.** Para isso, primeiramente deve-se converter os arquivos que estão em formato TDF para formato binário, afim de submetê-los ao modelo GL.

O reprocessamento de imagens é procedimento simples, uma vez implementado o programa para conversão de formatos TDF. Porém, esta conversão é um trabalho demorado porque demanda grande quantidade de disco disponível. Cada fita com backup de imagens comprimidas tem capacidade de 40 GB, é usada em quase toda sua totalidade e ao descompactar requer de 100 GB de disco.

- **Desenvolver um método de validação sistemática do modelo GL.** Até agora a validação dos dados não é sistemática.

Visa-se a criação de programas de computador para que a validação seja operacional, disponível aos usuários em geral através da internet. É também desejável incluir o máximo número possível de fontes de dados de superfície para comparação.

Capítulo 2 – O modelo GL de Radiação

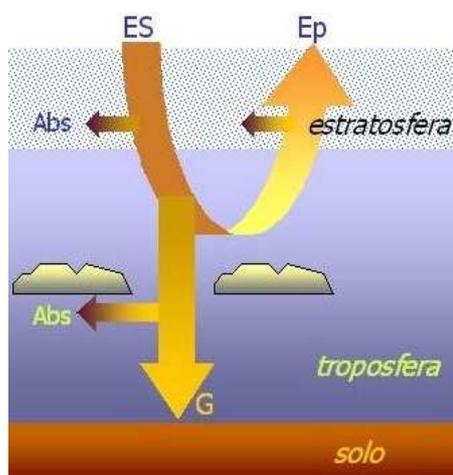


fig. 2.1 –esquema de absorção e reflexão da radiação solar ao chegar à atmosfera

A fim de um melhor entendimento das atividades realizadas neste ano é conveniente fazer uma breve descrição do modelo de estimativa de radiação solar.

Durante o período diurno, a Terra recebe a radiação advinda do sol. Dependendo da quantidade da cobertura de nuvens e partículas de matérias suspensas na atmosfera, uma porcentagem da radiação é absorvida pelos

continentes e pelas águas e, o restante é refletido de volta ao espaço.

Com base na irradiância emergente no topo (**Ep**) **G**, o modelo GL estima a irradiância global à superfície (**G**).

Tratando-se de um modelo do tipo físico, propõe relações entre fluxos no topo e à superfície baseadas em equações de transporte da radiação e necessita de parâmetros que descrevam as condições atmosféricas no momento, tais como: água precipitável, pressão atmosférica, refletância mínima, refletância máxima, albedo da base das nuvens no infravermelho (**IV**), albedo da superfície no canal visível (**VIS**), albedo da superfície no IV e ozônio massa.

Dois tipos de radiação são calculados: **radiação global**, e **radiação UV+VIS** (aproximadamente, trata-se da radiação *Photosynthetically Active Radiation - PAR*).

A estimativa de radiação solar à superfície baseia-se nos valores de refletância no canal VIS das imagens do satélite GOES Imager para América do Sul.

A transição de fonte de imagens desde que o modelo GL está em operação segue na tabela abaixo:

| Satélite | Período | Área de Cobertura | |
|----------|-------------------------|--|---|
| GOES 08 | Março/1996 a Abril/2003 | Setor Norte: 90W a 30W Setor Sul: 85W a 30W | Setor Norte: 20S a 18 N Setor Sul: 45S a 20S |
| GOES 12 | Maió/2003 a Março/2007 | 100°W a 28°W | 50°S a 21°N |
| GOES 10 | A partir de Abril/2007 | 100°W a 25°W | 50°S a 13°N |

O resultado do modelo GL são imagens de três tipos (refletância, visível e global) que se estendem de 100°W a 28°W em longitude e de 50°S a 22°S em latitude, com resolução de um pixel a cada 4 km no ponto sub-satélite (0° latitude, 75°W) e tendo 1800 por 1800 pixels.

A primeira versão do modelo GL foi desenvolvida na Universidade Federal da Paraíba para imagens do canal VIS de Meteosat 4, e adaptada para o canal VIS de GOES por pesquisadores da DMS/INPE e UFPb. Essa versão preliminar foi instalada no CPTEC com algumas modificações, fornecendo distribuições diárias, semanais e mensais de irradiância solar global.

Sendo executado operacionalmente na DSA/CPTEC desde 2002, o modelo GL recebe como entrada as imagens do satélite GOES a cada meia hora sobre o período diurno que compreende o horário GMT das

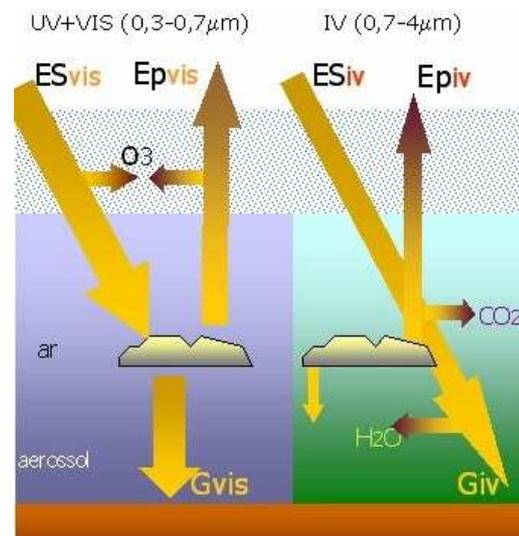


fig. 2.2 - Detalhes conceituais e de cálculo se encontram em Ceballos e Bottino (2004).

9h 15min às 23h 45min. De posse dos dados de um dia inteiro, calcula-se a integral diária obtendo a **irradiação** (em $J.m^{-2}$) que é transformada em **irradiância média** do dia (dividindo por 86400 segundos).

2.1 - Modelo GL (versão 1.2)

A versão 1.2 do modelo GL, não considera o efeito dos aerossóis e, supõe que o espectro solar seja dividido em partições com apenas dois intervalos espectrais de banda larga:

- 1 - ultravioleta + visível;
- 2 - infravermelho próximo.

A figura 1.2 ilustra as interações da radiação solar com a atmosfera.

2.1.1 - Intervalos UV+VIS e IV

Considera-se um balanço de irradiâncias onde a radiação solar é refletida para o espaço, absorvida na estratosfera ou no solo:

- Absorção no UV na estratosfera (altura superior a 18 km).
- Troposfera conservativa (nuvens não absorvem no UV+VIS)

O balanço de radiação para o intervalo **UV+VIS** resulta em:

$$\mu_o.S_{vis} = ES_{vis} = Ep_{vis} + A3 + (1-R_{svis}.G_{vis}),$$

onde:

S_{vis}: fluxo solar (UV+VIS) no topo da atmosfera.

R_{svis}: refletância do solo.

Enquanto que para o balanço de radiação para o intervalo **IV** resulta em:

$$\mu_o.S_{vis} = ES_{vis} = Ep_{vis} + A3 + (1-R_{svis}.G_{vis}),$$

onde:

S_{vis}: fluxo solar (UV+VIS) no topo da atmosfera.

R_{svis}: refletância do solo.

Sendo que a dispersão Rayleigh é desprezível no IV, a interação radiação solar com a atmosfera se limita a:

- Radiação direta passando entre as nuvens;
- Radiação direta absorvida pelo H₂O e CO₂;
- Alta absorção e reflexão por nuvens, com transmitância desprezível;
- Reflexões múltiplas entre solo e base de nuvens.

$$Giv = \mu o.Siv.T2.(1 - C)/(1-C.Rn.Riv),$$

onde:

C: nebulosidade.

T2: transmitância direta de $H_2O + CO_2$.

Rn, Riv: refletâncias de base de nuvem e do solo.

2.1.2 – Nebulosidade (variável C)

Nas equações do modelo GL, a nebulosidade controla de forma implícita a componente UV+VIS, e explicitamente a componente IV. É usual avaliá-la considerando que a radiância *L* observada por satélite para um pixel é a composição:

$$L = (1-C) Lmin + C Lmax$$

Associa-se a céu claro a variável *Lmin* (radiância mínima), enquanto que *Lmax* (radiância máxima) refere-se a céu coberto.

Vale ressaltar que este conceito é válido apenas para cobertura de nuvem cumuliformes. *Lmax* não avalia o máximo num conjunto de imagens, mas um valor representativo da transição entre cobertura cumuliforme e estratiforme. Nuvens com grande desenvolvimento vertical, pela sua natureza, correspondem a *C*=1. O caso de cirrus finos com baixa refletância é considerado equivalente à cobertura parcial.

Através de um processo de classificação automática de nuvens, desenvolvido por Bottino e Ceballos (2004), foi observado que há uma refletância típica que marca a transição entre *Cu* e *St*, independente da temperatura de brilho (canal 4). O valor encontrado é aproximadamente de *Rmax* = 0,46. Assim, a nebulosidade avalia-se como:

$$C = (R - Rmin)/(Rmax - Rmin)$$

As figuras abaixo ilustram resultados operacionais de classificação de nuvens divulgados na DSA/CPTEC. Disponível em: <http://sigma.cptec.inpe.br/produto/nuvens>

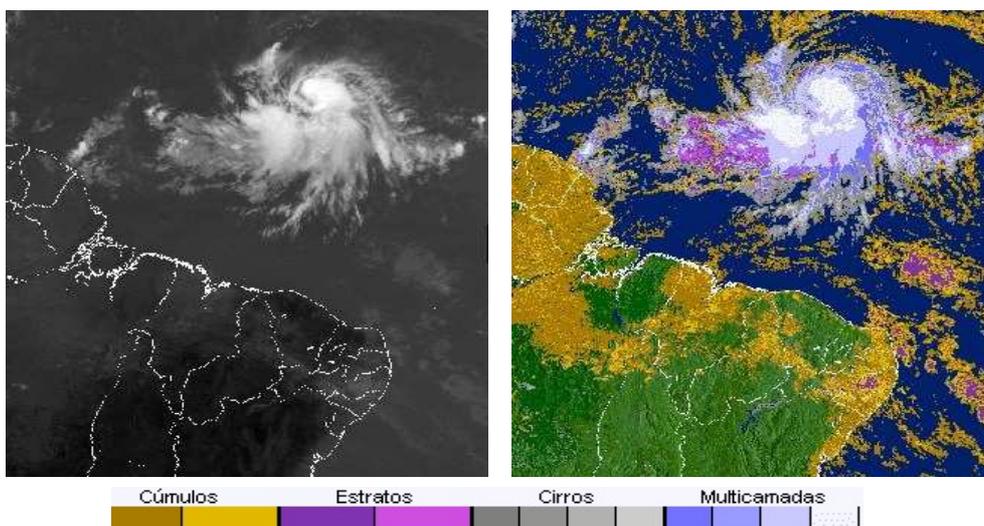


fig. 2.3 - Imagem classificada do Nordeste - 1445Z - esquerda:

Afim de exemplificação, seguem os valores dos parâmetros atuais passados ao modelo GL:

Atualmente os valores dos parâmetros passados com entrada para o modelo são:

Água precipitável: de 3.5 a 4.5 cm g/cm²

Pressão atmosférica: 950 hPa

Refletância mínima: 0.093

Refletância máxima: 0.465

Albedo da base das nuvens no IV: 0.4

Albedo da superfície no VIS: 0.06

Albedo da superfície no IV: 0.4

Ozônio massa: 0.28

Capítulo 3 – As Séries Temporais

Há resultados obtidos com o modelo GL desde janeiro de 1996 até os dias atuais, totalizando 11 anos de dados.

Há cinco considerações quanto às características dos dados:

- **Regiões (Extensão Geográfica);**
- **Resolução;**
- **Dimensão;**
- **Correção do valor da distância Terra-Sol;**
- **Calibração do sensor Imager do satélite GOES(8, 12 ou 10).**

Os dados podem ser divididos por épocas definidas (BOTTINO E VILLAS BOAS, 2006):

De Janeiro/1996 a Setembro/1997:

- **Regiões:** duas imagens; uma cobrindo a parte Norte e outra a parte Sul da América;
- **Resolução:** um pixel a cada 12 km (0.12°).
- **Dimensão:** 512 x 512 pixels.
- **Correção do valor da distância Terra-Sol:** ainda não corrigida.

- **Calibração do sensor Imager do satélite GOES 8:** o canal VIS está ajustado segundo uma expressão de Weinreb et al. de 1997 (BOTTINO E VILLAS BOAS, 2006).

De Outubro/1997 a Abril/2003:

- **Quantidade de Partes:** duas imagens; uma cobrindo a parte Norte e outra a parte Sul da América;

- **Resolução:** um pixel a cada 4 km (0.04°).

- **Dimensão:**

de Outubro/1997 a Setembro/2001:

setor Norte – de 20S a 18 N e de 90W a 30W.

setor Sul – de 45S a 20S e de 85W a 30W.

de Outubro/2001 a Março/2003:

setor Norte – 20S a 21N e de 93W a 30W.

setor Sul – 48S a 20S e de 95W a 30W.

- **Correção do valor da distância Terra-Sol:** corrigida de Janeiro/2003 a Abril/2003.

- **Calibração do sensor Imager do satélite GOES 8 e 12:** foi aplicada correção para GOES8 (janeiro/1996 até março/2003). Entre abril/2003 e agosto/2005 desconhecia-se algoritmo de correção por degradação para o canal VIS do GOES 12. A correção de NGUYEN et al.(CEBALLOS E BOTTINO, 2004) começou a ser aplicada a partir de setembro/2005.

A partir de Maio/2003:

- **Quantidade de Partes:** uma única imagem com as partes Norte e Sul da América;

- **Resolução:** um pixel a cada 4 km (0.04°).

- **Dimensão:** 50S a 21N e de 110W a 30W. Com 1800 x 1800 pixels.

- **Correção do valor da distância Terra-Sol:** corrigida de Maio/2003 a Julho/2004 e a partir de Setembro/2006 já com a correção contida no modelo GL.

- **Calibração do sensor Imager do satélite GOES 12 e 10:** não foi corrigida até Agosto/2005 por não haver correções oficiais publicadas; de partir de Setembro/2006 até Março/2007 foi corrigido segundo Nugyen; a partir de Abril/2007 o GOES10 também segue a mesma correção.

Equação para correção de Calibração - GOES 12

$$\text{real_days} = 365. * (\text{Ano} - 2002.) + \text{Diajul} + 204.$$

$$\text{CorrRefl} = 1. + (1.108\text{E-}4 / 0.5924) * \text{real_days}$$

Equação para correção de Calibração - GOES 10

$$\text{real_days} = 365. * (\text{Ano} - 2007.) + \text{Diajul}$$

$$\text{CorrRefl} = 1.428 * (1.074\text{E-}4 * (2188. + \text{real_days}))^2$$

Maiores detalhes disponíveis em:

<http://satelite.cptec.inpe.br/home/informacoes/goes10/GOES10-faqs.htm>

3.1 Reprocessamento do Modelo GL do período de janeiro/2003 a julho/2005

Como exposto no capítulo anterior há séries temporais de resultados do modelo GL que devem ser corrigidos de acordo com a sua deficiência.

Desde sua habilitação em 1996, o canal VIS do satélite GOES 8 mostrou degradação progressiva do sinal. Não dispondo de calibração de bordo, foram publicadas correções diárias obtidas com relação a alvos terrestres estáveis.

O modelo GL1.2 incluía essa correção até março de 2003, evidenciando um erro médio sobre a rede da ordem de ou menor que -5 W.m^{-2} e sugerindo uma oscilação anual com 10 W.m^{-2} de amplitude.

Fenômeno semelhante parece verificar-se para o comportamento do canal VIS do GOES 12, habilitado em abril de 2003. O comportamento médio do modelo GL 1.2 passou a apresentar um desvio médio de entre $+15$ e $+20 \text{ W.m}^{-2}$, com oscilação anual semelhante à percebida para o GOES 8. Devido à falta de uma correção oficial, o Modelo GL seguiu sem correção até dezembro de 2004.

Para que seja possível o reprocessamento, os arquivos guardados em fita de 40 GB e em formato 'tdf' devem ser convertidos em formato binário para serem submetidos ao modelo GL. O 'gargalo' do processamento é a indisponibilidade de disco livre para 'baixar' as fitas, armazenar os arquivos convertidos e os já reprocessados.

O reprocessamento que se iniciou em janeiro/2003 e irá até julho/2005 está em julho/2004.

Após o reprocessamento, os arquivos são comprimidos e agrupados em pacotes de 10 em 10 dias e finalmente armazenados em fitas 'tdf' de 40 GB.

Capítulo 4 – Validação dos Resultados do Modelo GL de Radiação

A validação tem sido feita através da comparação dos resultados do modelo GL com as ‘verdades terrestres’ que são fornecidas por estações de superfície munidas de piranômetros. Para análise futura desejam-se dados das estações do CPTEC, PIRATA, INMET, SIMEPAR e SOLRADNET. Por outro lado, este estudo também é útil para avaliar a qualidade dos dados das estações terrestres e monitorá-las, avisando os seus responsáveis quanto ao fato.

Verificar a qualidade dos resultados obtidos com o modelo GL de maneira a estudar o seu comportamento nas diversas regiões da América do Sul e constatar:

- **O impacto de desconsiderar a presença de aerossol.** Observa-se que nas regiões com constantes queimadas (como a região Amazônica) apresenta-se um efeito de compensação: ou uma camada de fumaça espessa é interpretada pelo canal VIS como uma nuvem e sua refletância introduz um efeito de decremento da radiação global, ou a nebulosidade real tende a mascarar a presença e os efeitos do aerossol sobre a irradiância. Uma análise deste efeito encontra-se em Miranda e Ceballos (2006).

- **a calibração do sensor Imager do canal VIS do satélite GOES.** A mudança do satélite GOES 8 para o GOES 12 (em abril de 2003) introduziu um desvio adicional, associado erros de calibração e à degradação natural do canal VIS. Esta correção era sistematicamente aplicada ao GOES 8, e foi incorporada ao GOES 12 somente a partir de agosto de 2005. As imagens GOES 12 produzidas entre abril de 2003 e julho de 2005 estão sendo reprocessadas a fim de aplicar a correção por degradação. Genericamente, a comparação com os dados da rede de estações sugere que um desvio médio de $+15 \text{ W/m}^2$ foi introduzido pelo erro na calibração (Ceballos, 2007).

- **o fato de considerar o valor de água precipitável constante para grandes áreas.** embora não seja tão significativo em relação a outras fontes de erro, induz a desvios da verdade em regiões com altos índices de umidade (região Amazônica), ou com períodos secos e umidade inferior à prevista (região Sudeste).

- **o valor errôneo da distância Terra-Sol** – existe um ciclo anual do desvio médio $\langle \text{GL} - \text{PCD} \rangle$ com média de 5 W.m^{-2} e amplitude da ordem de 10 W.m^{-2} . Parte deste ciclo podia dever-se a uma estimativa errada da distância Terra-Sol para correção da constante solar.

Capítulo 5 – Análise da Qualidade dos Dados

A análise dos resultados do modelo GL são validados após comparação com dados de ‘verdades terrestres’. Devida à grande quantidade de dados, elaboraram-se rotinas de processamento em Java e em Fortran 77.

As rotinas foram separadas por etapas até a conclusão da análise que se resumem em:

- **Coleta de dados** – estão sendo geradas rotinas em Java para que a obtenção dos dados seja automatizada;
- Padronização do formato dos dados – rotinas responsáveis por padronizar a unidade de medida de radiação solar em W/m^2 e a disposição dos dados no arquivo de saída.;
- **Filtragem dos dados** – rotinas responsáveis por classificar os dados de acordo com uma faixa limite de valores e gerarem arquivos de texto com mesmo padrão de formatação;
- **Análise estatística dos dados** – rotinas responsáveis por verificar a quantidade de dados disponíveis a cada filtragem e logo após calcular média e o desvio padrão. Ao final, cria um arquivo com formatação compatível com os demais.

5.1 - Obtenção dos dados das estações - Rotina 1

Para analisar a qualidade do modelo comparam-se os valores obtidos pelo modelo GL de radiação com os dados das estações terrestres do:

- **CPTEC** – dados a cada 3 horas, sendo utilizada a radiação acumulada diária, disponível em http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/historico/consulta_radsol.jsp;
- **INMET** – dados a cada 1 hora, disponível em <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>;
- **SIMEPAR** – dados a cada 1 hora, obtidos com pedidos ao instituto.
- **PIRATA** – dados a cada 3 horas, sendo utilizada a radiação acumulada diária, disponível em http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/historico/consulta_radsolboia.jsp;
- **SOLRADNET** – dados a cada 2 minutos, disponível em <http://solrad-net.gsfc.nasa.gov/index.html>;

| %id | lat | lon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 31914. | -13.08 | -62.27 | 215.28 | 270.83 | 168.98 | 215.28 | 217.59 | 208.33 | 177.08 | 189.81 | 214.12 | 197.92 | 202.55 |
| 31915. | -11.69 | -62.72 | 200.23 | 287.04 | 138.89 | 200.23 | 195.60 | 199.07 | 197.92 | 192.13 | 197.92 | 201.39 | 192.13 |
| 31916. | -29.14 | -50.99 | 18.52 | 133.10 | 151.62 | 153.94 | 156.25 | 153.94 | 105.32 | 150.46 | 47.45 | 48.61 | 104.17 |
| 31917. | -30.55 | -52.40 | 30.09 | 156.25 | 156.25 | 155.09 | 155.09 | 150.46 | 293.98 | 149.31 | 9.26 | 3.47 | 8.10 |
| 31918. | -29.17 | -53.69 | 35.88 | 189.81 | 159.72 | 158.56 | 159.72 | 158.56 | 144.68 | 136.57 | 27.78 | 100.69 | 69.44 |
| 31919. | -28.69 | -55.96 | 69.44 | 136.57 | 255.79 | 162.04 | 162.04 | 201.39 | 149.31 | 105.32 | 67.13 | 114.58 | 251.16 |
| 31920. | -30.33 | -54.26 | 60.19 | 157.41 | 157.41 | 156.25 | 156.25 | 153.94 | 146.99 | 135.42 | 17.36 | 6.94 | 4.63 |
| 31921. | -27.17 | -53.71 | 109.95 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 | 879.63 |

fig. 5.1.1 - Arquivo ESTAÇÃO.txt - exemplo de Junho/2007

Devido à falta de um padrão entre os arquivos dos órgãos escolhidos, foi implementada a **rotina 1** que trata os dados cada instituto, padronizando a unidade de radiação (W/m^2) e a disposição dos dados (número de identificação da estação, latitude, longitude e 31 de valores da radiação referentes a cada dia do mês) criando o arquivo ESTAÇÃO.txt

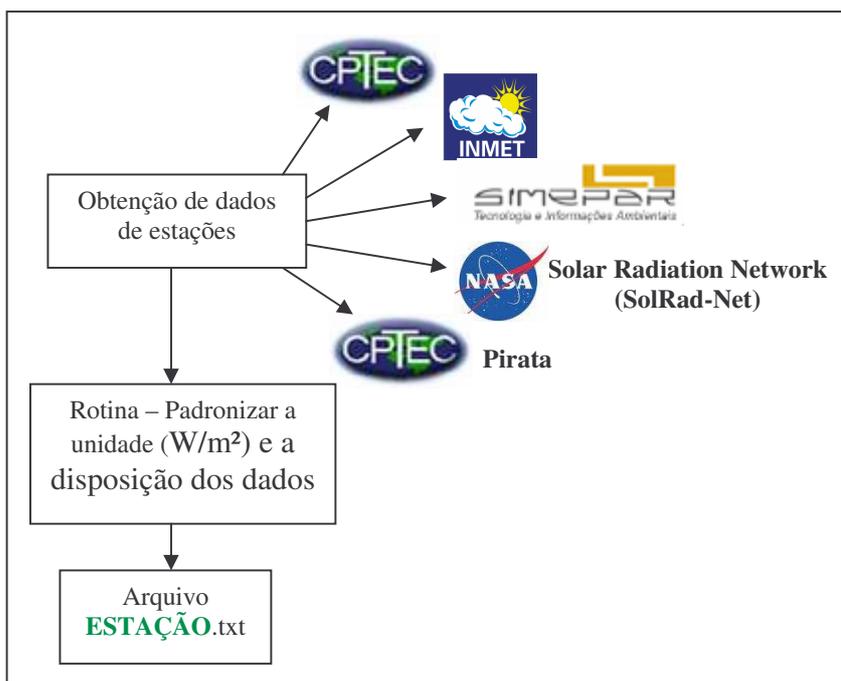


fig. 5.1.2 - Esquema da rotina 1

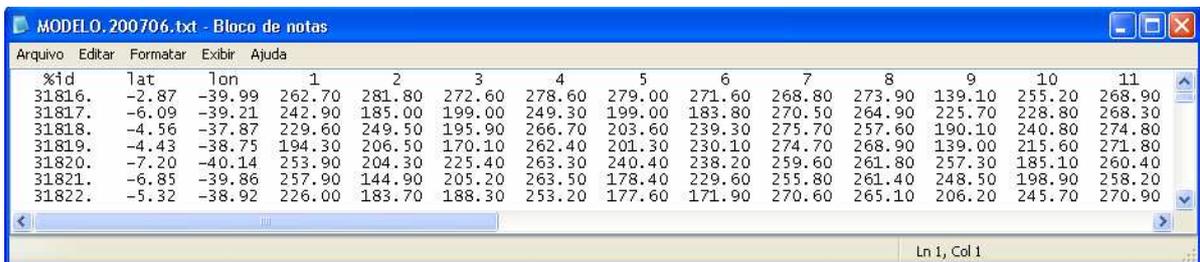
5.2 - Extração dados do arquivo saída do Modelo GL - Rotina 2

Os arquivos gerados pelo modelo são matrizes com valores de radiação a cada 0.04°.

A **rotina 2** retorna a radiação estimada pelo modelo GL em determinadas coordenadas geográficas. Assim sendo, tendo conhecimento em que coordenadas localizam-se as estações obtêm-se os valores de radiação resultantes do modelo a fim de compará-los.

Como dado de entrada a **rotina 2** recebe a data desejada e uma listagem de localidades (coordenadas das estações terrestres) e gera um arquivo MODELO.txt mensal que contém os valores diários de radiação nos locais indicados.

O arquivo MODELO.txt tem 34 colunas (identidade da estação, latitude, longitude e 31 valores de radiação diária correspondente à data passada), conforme ilustrado na figura abaixo:



| %id | lat | lon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 31816. | -2.87 | -39.99 | 262.70 | 281.80 | 272.60 | 278.60 | 279.00 | 271.60 | 268.80 | 273.90 | 139.10 | 255.20 | 268.90 |
| 31817. | -6.09 | -39.21 | 242.90 | 185.00 | 199.00 | 249.30 | 199.00 | 183.80 | 270.50 | 264.90 | 225.70 | 228.80 | 268.30 |
| 31818. | -4.56 | -37.87 | 229.60 | 249.50 | 195.90 | 266.70 | 203.60 | 239.30 | 275.70 | 257.60 | 190.10 | 240.80 | 274.80 |
| 31819. | -4.43 | -38.75 | 194.30 | 206.50 | 170.10 | 262.40 | 201.30 | 230.10 | 274.70 | 268.90 | 139.00 | 215.60 | 271.80 |
| 31820. | -7.20 | -40.14 | 253.90 | 204.30 | 225.40 | 263.30 | 240.40 | 238.20 | 259.60 | 261.80 | 257.30 | 185.10 | 260.40 |
| 31821. | -6.85 | -39.86 | 257.90 | 144.90 | 205.20 | 263.50 | 178.40 | 229.60 | 255.80 | 261.40 | 248.50 | 198.90 | 258.20 |
| 31822. | -5.32 | -38.92 | 226.00 | 183.70 | 188.30 | 253.20 | 177.60 | 171.90 | 270.60 | 265.10 | 206.20 | 245.70 | 270.90 |

fig. 5.2.1 - Arquivo MODELO.txt - exemplo de Junho/2007

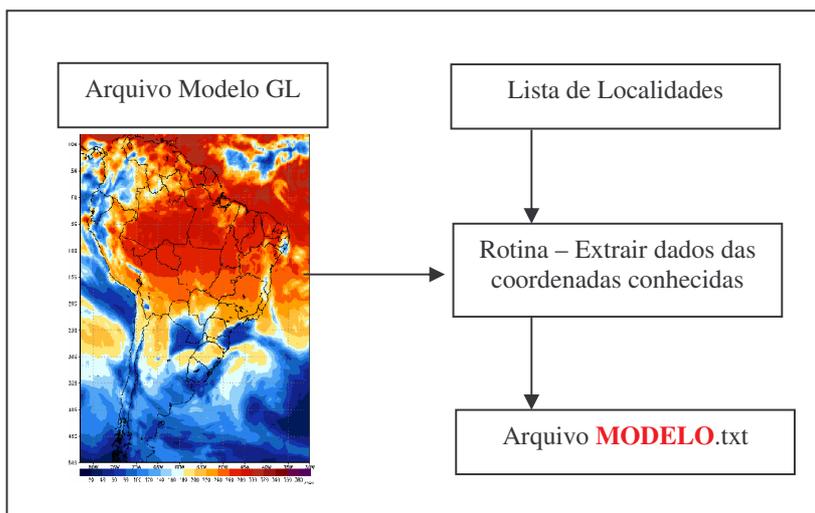


fig. 5.2.2 - Esquema da rotina 2

5.3 - Diferença entre os dados da saída do modelo GL com os dados das estações terrestres (MODELO - ESTAÇÃO) - Rotina 3

Tendo os arquivos ESTACAO.txt e MODELO.txt faz-se a diferença (MODELO-ESTACAO) gerando o arquivo DIFERENÇA.txt seguindo a mesma formatação.

| %id | lat | lon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------|--------|--------|-------|---------|--------|-------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|
| 31914. | -13.08 | -62.27 | 29.12 | -114.93 | 31.52 | 27.42 | 24.51 | 28.77 | 44.02 | 42.99 | 25.88 | 41.38 |
| 31915. | -11.69 | -62.72 | 45.17 | -68.24 | 60.91 | 48.97 | 52.00 | 39.93 | 40.68 | 51.17 | 48.78 | 44.71 |
| 31916. | -29.14 | -50.99 | 23.88 | 27.20 | 20.08 | 17.16 | 16.75 | 16.96 | 27.38 | 3.74 | 5.15 | 14.89 |
| 31917. | -30.55 | -52.40 | 19.51 | 8.95 | 8.35 | 8.41 | 7.81 | 9.04 | -133.68 | 14.09 | 37.54 | 28.33 |
| 31918. | -29.17 | -53.69 | 18.32 | -21.81 | 7.28 | 7.44 | 5.28 | 6.34 | 19.52 | 24.53 | 19.12 | 4.11 |
| 31919. | -28.69 | -55.96 | 21.06 | 23.43 | -82.29 | 10.46 | 7.16 | -34.69 | 20.09 | 21.18 | 23.57 | 28.52 |

fig. 5.3.1 - Arquivo DIFERENÇA.txt - exemplo de Junho/2007

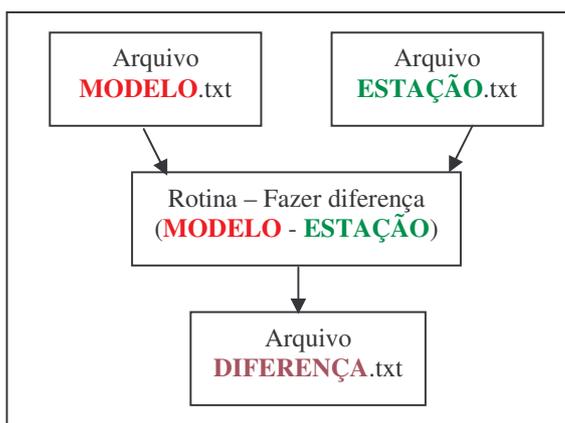


Fig. 5.3.2 - Esquema da rotina 3

5.4 – Verificação e marcação de dados seguindo uma classificação - Rotina 4

Para facilitar e agilizar a visualização do comportamento dos dados elaborou-se a **rotina 4** que classifica o valor de acordo com a tabela abaixo:

| | Índices | MODELO.txt | ESTAÇÃO.txt | DIFERENÇA.txt |
|-------------|---------|--|--|---|
| significado | 0 | Dado OK | Dado OK | Dado OK |
| | 1 | Dado inexistente (-999) | Dado inexistente (-999) | Dado inexistente (-999) |
| | 2 | Dado menor do que 30 W/m ² | Dado menor do que 30 W/m ² | Dado menor do que -120 W/m ² |
| | 3 | Dado maior do que 400 W/m ² | Dado maior do que 400 W/m ² | Dado maior do que +120 W/m ² |

fig. 5.4.1 – Tabela de Classificação de dados conforme comportamento padrão dos valores de radiação.

E ‘marca’ com um índice de 3 dígitos correspondente aos arquivos MODELO, ESTAÇÃO e DIFERENÇA respectivamente:

- 1º dígito – índice referente ao valor de radiação do arquivo MODELO.txt;
- 2º dígito – índice referente ao valor de radiação do arquivo ESTAÇÃO.txt;
- 3º dígito – índice referente ao valor de radiação do arquivo DIFERENÇA.txt;

A **rotina 4** gera o arquivo STATUS.txt com 34 colunas(identidade da estação, latitude, longitude e 31 índices), conforme ilustrado na figura abaixo:

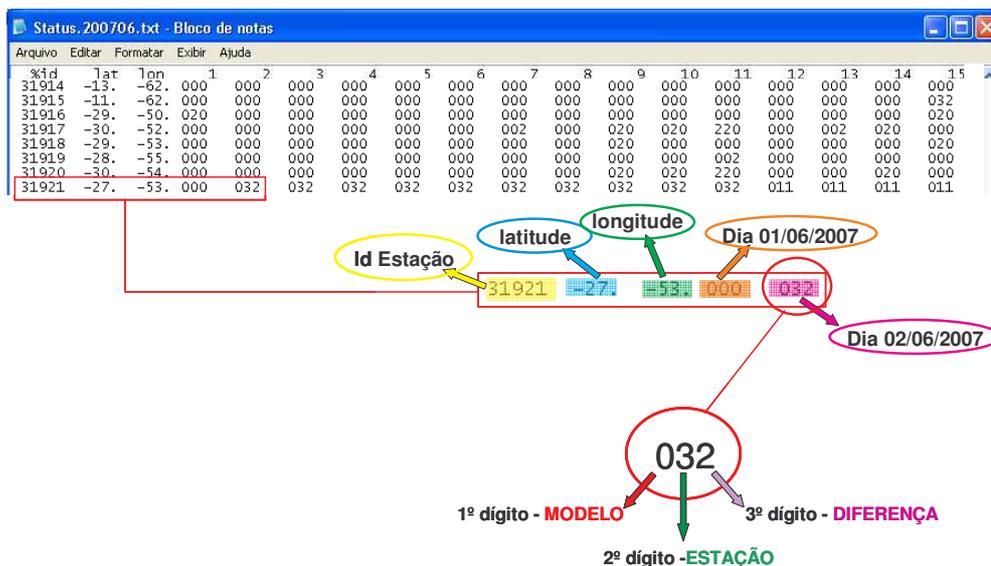


fig. 5.4.2 - Arquivo STATUS.txt – exemplo de Junho/2007

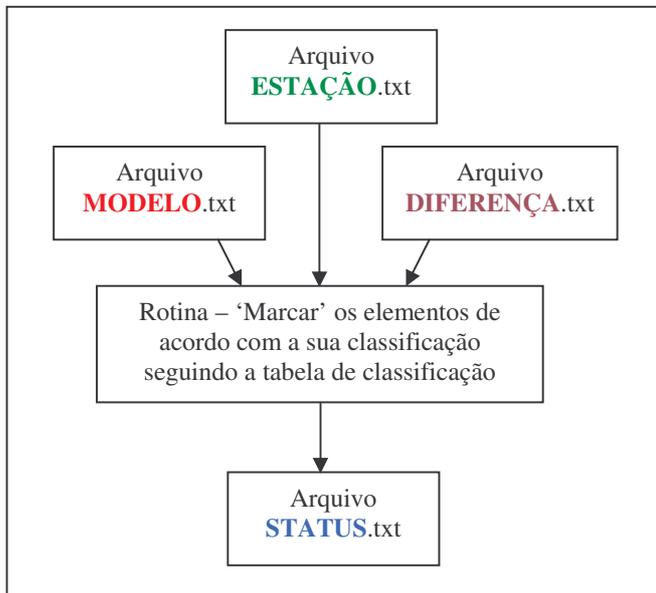


fig 5.4.3 - Esquema rotina 4

5.5 - Filtragem dos dados – Rotina 5

Com base no arquivo STATUS.txt aplica-se um filtro grosseiro para retirar dados cujo índice seja diferente de zero, ou seja, inválido para a comparação (conferir tabela de classificação).

De posse dos dados válidos com quantidade de dias não seja inferior a 10, realiza-se a primeira estimativa de média m_I e desvio padrão s_I do MODELO, da ESTAÇÃO, e da DIFERENÇA, criando o arquivo ESTAT.txt.

Em seguida, aplica-se no arquivo DIFERENÇAS.txt um filtro estatístico mais fino. Dados a média m_I e o desvio padrão s_I (da primeira etapa) de cada linha da DIFERENÇAS.txt, são observados (marcados com *índices*) aqueles casos em que o elemento se afasta de m_I mais do que 3 vezes s_I .

| %id | lat | lon | GLatG | GLmedG | GLdodG | GLatF | GLmedF | GLdodF | ESatG | ESmedG | ESdodG | ESatF | ESmedF | ESdodF | DFatG | DFmedG | DFdodG | DFatF | DFmedF | DFdodF |
|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 31910 | -10.2 | -37.43 | 30 | 206.31 | 21.61 | 28 | 211.33 | 29.84 | 30 | 192.21 | 13.56 | 23 | 201.02 | 36.24 | 30 | 14.1 | 22.95 | 29 | 16.09 | 6.32 |
| 31911 | -11.07 | -37.74 | 30 | 197.51 | 8.7 | 16 | 212.95 | 52.54 | 30 | 207.33 | 33.67 | 29 | 202.59 | 22.33 | 30 | -9.82 | 26.34 | 29 | -6.48 | 22.3 |
| 31912 | -9.84 | -37.67 | 30 | 197.01 | 7.74 | 12 | 225.25 | 66.64 | 30 | 187.26 | 23.36 | 27 | 188.44 | 24.11 | 29 | 14.97 | 16.48 | 29 | 14.97 | 16.48 |
| 31913 | -10.44 | -64.12 | 30 | 244.49 | 41.77 | 30 | 244.49 | 41.77 | 30 | 204.22 | 16.54 | 26 | 202.13 | 36.34 | 30 | 40.27 | 26.59 | 28 | 46.94 | 9.51 |
| 31914 | -13.08 | -62.27 | 30 | 240.86 | 41.45 | 30 | 240.86 | 41.45 | 30 | 216.47 | 36.47 | 30 | 216.47 | 36.47 | 30 | 24.39 | 27.22 | 29 | 29.36 | 4.99 |
| 31915 | -11.69 | -62.72 | 30 | 247.62 | 44.93 | 30 | 247.62 | 44.93 | 28 | 200.4 | 24.46 | 27 | 197.07 | 30.55 | 28 | 47.51 | 29.85 | 27 | 51.97 | 19.25 |
| 31916 | -29.14 | -50.99 | 30 | 117.37 | 41.29 | 30 | 117.37 | 41.29 | 27 | 139.65 | 59.37 | 27 | 139.65 | 59.37 | 28 | 5.72 | 37.39 | 26 | 15.13 | 16.39 |
| 31917 | -30.55 | -52.4 | 29 | 109.42 | 46.67 | 29 | 109.42 | 46.67 | 22 | 149.58 | 60.31 | 22 | 149.58 | 60.31 | 26 | 14.93 | 22.31 | 25 | 18.07 | 16.21 |
| 31918 | -29.17 | -53.69 | 30 | 117.18 | 42.47 | 30 | 117.18 | 42.47 | 26 | 118.33 | 37.65 | 26 | 118.33 | 37.65 | 30 | 11.98 | 14.32 | 30 | 11.98 | 14.32 |
| 31919 | -28.69 | -55.96 | 30 | 117.79 | 39.56 | 30 | 117.79 | 39.56 | 28 | 120.63 | 58.77 | 28 | 120.63 | 58.77 | 29 | 10.66 | 30.83 | 27 | 18.33 | 12.98 |
| 31920 | -30.33 | -54.26 | 29 | 110.25 | 42.14 | 29 | 110.25 | 42.14 | 24 | 111.21 | 35.39 | 24 | 111.21 | 35.39 | 30 | 16.09 | 11.9 | 30 | 16.09 | 11.9 |
| 31921 | -27.17 | -53.71 | 30 | 118.59 | 41.02 | 30 | 118.59 | 41.02 | 1 | -999 | -999 | 0 | -999 | -999 | 1 | -999 | -999 | 0 | -999 | -999 |

fig 5.5.1 - Arquivo ESTAT.txt – exemplo de Junho/2007

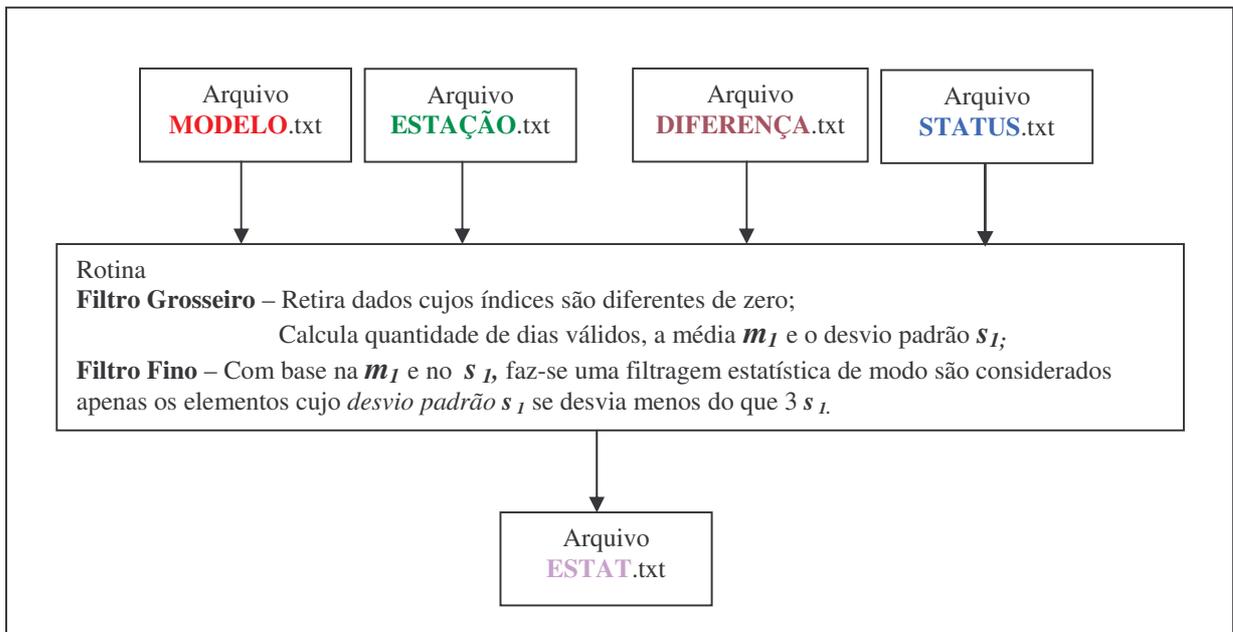


fig. 5.5.2 - Esquema rotina 5

CAPÍTULO 6 – Resultados

Em março de 2007, adotou-se o GOES10 como fornecedor de imagens de satélite pelo fato de ser exclusivo para a América do Sul e disponibiliza imagens a cada 15 minutos enquanto que com o GOES12 era de a cada 30 minutos e tinha muitas defasagens de imagens quando desejava-se monitorar a região da América do Norte.

As áreas de cobertura dos satélites são diferentes:

GOES 12 – 100°W a 28°W, 50°S a 21°N

GOES 10 – 100°W a 25°W, 50°S a 13°N

Desde sua habilitação em 1996, o canal VIS do satélite GOES 8 mostrou degradação progressiva do sinal. Não dispondo de calibração de bordo, foram publicadas correções diárias obtidas com relação a alvos terrestres estáveis. O modelo GL1.2 incluía esta correção até março de 2003, evidenciando um erro médio sobre a rede da ordem de ou menor que -5 W.m-2 e sugerindo uma oscilação anual com 10 W.m-2 de amplitude.

Fenômeno semelhante parece verificar-se para o comportamento do canal VIS do GOES 12, habilitado em abril de 2003. O comportamento médio do modelo GL 1.2 passou a apresentar um desvio médio de entre +15 e +20 W.m-2, com oscilação anual semelhante à percebida para o GOES 8. Nas figuras ao lado, percebe-se que uma correção de -15 W.m-2, permite reproduzir essencialmente o ciclo anual com GOES 8 ou GOES 12. Até 2004 não existiam correções oficiais publicadas, encontrando-se em estúdio em várias instituições.

O cálculo do coeficiente de correção diária obtida em relação a alvos terrestres estáveis é a seguinte:

Para o satélite GOES 12

$$Dias = 365. * (AnoAtual - 2002.) + Diajuliano + 204.$$

$$Correção\ Refletância = 1. + (1.108E-4 / 0.5924) * Dias$$

Para o satélite GOES 10

$$Dias = 365. * (Ano - 2007.) + Diajul$$

$$Correção\ Refletância = 1.428 * Exp(1.074E-4 * (2188. + Dias))$$

para maiores informações sobre a calibração do satélite GOES10 :
<http://satelite.cptec.inpe.br/home/informacoes/goes10/Nota-calibracaoGOES10-ch1-c.pdf>

Os resultados mostram que, atualmente, o modelo GL exibe um viés médio de 0 a +2 W/m² e desvios padrões típicos de 36 W.m⁻² para seqüências de dados diários com o satélite GOES 12 e desvios padrões típicos de 24 W/m² com o GOES 10.

Obtêm-se os dados de estações e resultados do modelo GL correspondentes ao mesmo período. Algumas falhas podem atrapalhar a análise, como:

- **a falta de dados de estação** – por defeito, manutenção ou desabilitação;
- **a falta de imagens de satélite** – o que ocorria freqüentemente com o GOES12 com a incidência de furacões na região da América do Norte.
- **o desprezo da presença de aerossol** – em regiões onde há muitas queimadas podem ocorrer desvios dos valores reais (já que o satélite interpreta o aerossol simplesmente como nuvem) como acontece na região Amazônica.

Analisou-se o comportamento do modelo GL com imagens do satélite GOES12 (dezembro/2006 e janeiro/2007) e com o GOES10 (maio e junho de 2007) e foram gerados alguns gráficos de comparação (Modelo GL x Estação), onde a cor verde é correspondente ao valor de radiação da estação do CPTEC; azul para o modelo GL e laranja para a diferença (MODELO-ESTAÇÃO).

Como primeiro exemplo a estação terrestre do CPTEC no Estado da Bahia:

Dezembro-2006 (Brumado-BA) – GOES12

Verificam-se bons resultados exceto no dia 17 (erro de medição da estação é evidente, então será descartado para comparação), dias 15, 23, 25 e 26 (superestimativa do modelo em relação à estação devido à presença de nuvens) e nos dias 13, 18, 19, 20 e 27 quando o modelo subestima a estação.

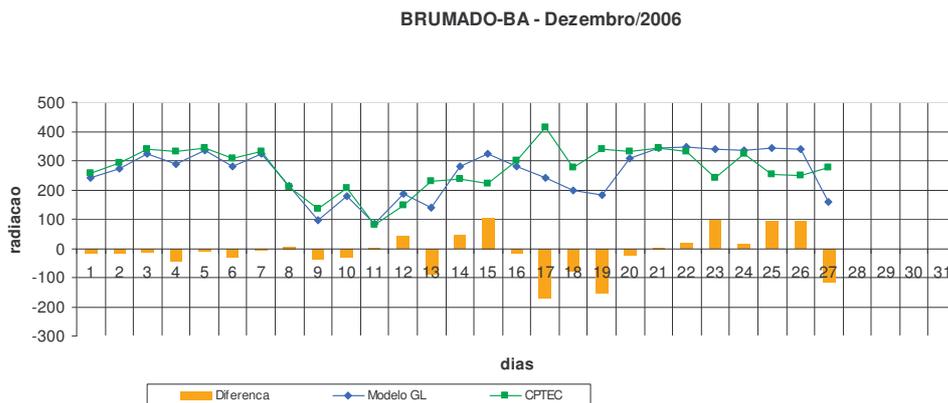


fig. 6.1 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Brumado-BA) para Dezembro/2006

Janeiro-2007 (Brumado-BA) – GOES12

Boa comparação também com pequenas diferenças, exceto nos dias 17 e 18 onde há presença de nuvens.



fig. 6.2 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Brumado-BA) para Janeiro/2007

Maiio-2007 (Brumado-BA) – GOES10

Dados regulares com um erro claro da estação nos dias 20 e 31.

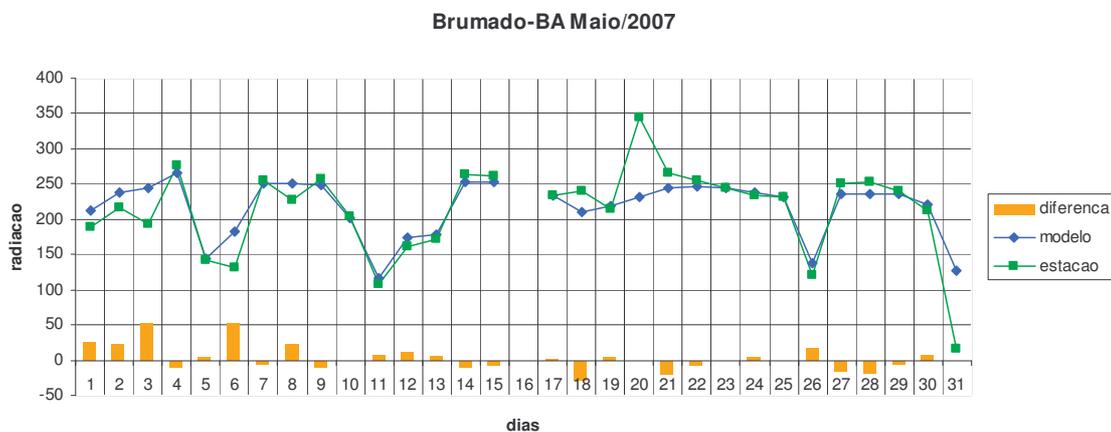


Fig 6.3– Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Brumado-BA) para Maio/2007

Junho-2007 (Brumado-BA) – GOES10

Dados com pouca compatibilidade, não sendo evidente qual é a fonte com dados fidedignos.

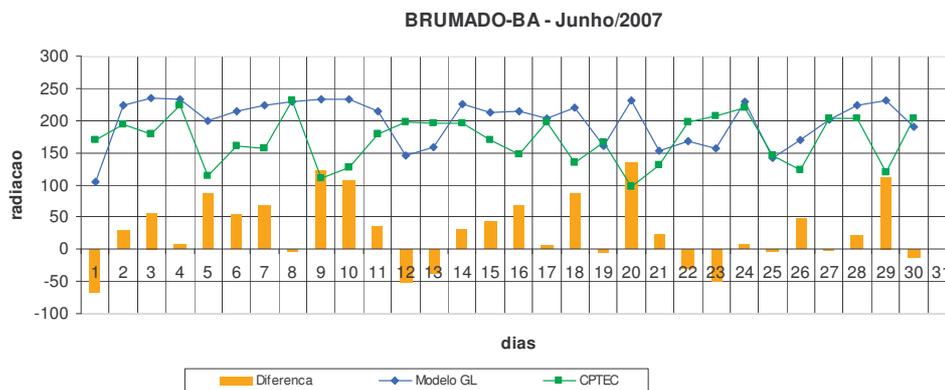


fig. 6.4 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Brumado-BA) para Junho/2007

Análise para estação terrestre do CPTEC no interior de São Paulo:

Dezembro-2006 (Guaratinguetá-SP) – GOES12

Os dados são razoáveis até o dia 11, no dia 12 não teve dados e no restante do mês na apresenta compatibilidade dos valores.

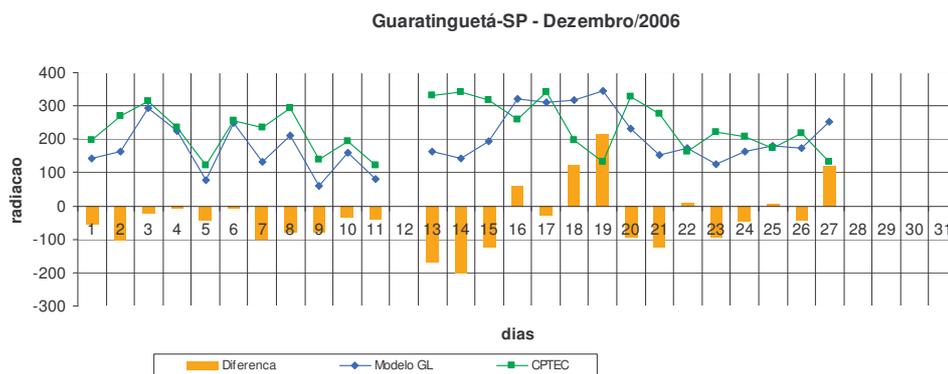


fig. 6.5 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Guaratinguetá-SP) para Dezembro/2006

Janeiro-2007 (Guaratinguetá-SP) – GOES12

Os valores seguem um mesmo traço porém com diferenças médias de até 100 W.m-2 que ainda sim são considerados na estatística.

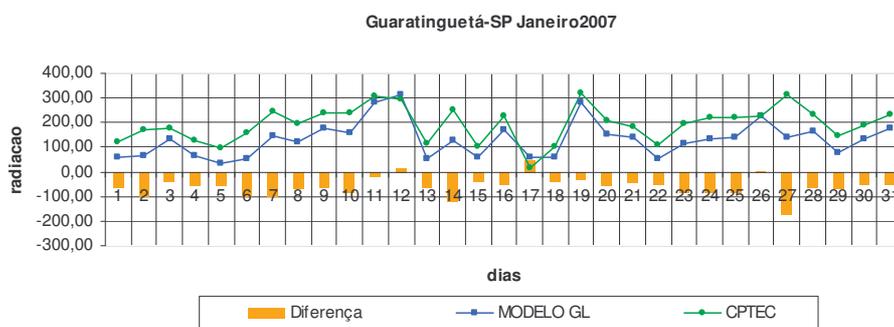


fig. 6.6 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Guaratinguetá-SP) para Janeiro/2007

Mai-2007 (Guaratinguetá-SP) – GOES10

Bons resultados somente com alguns desníveis porém ainda considerados para estatística.

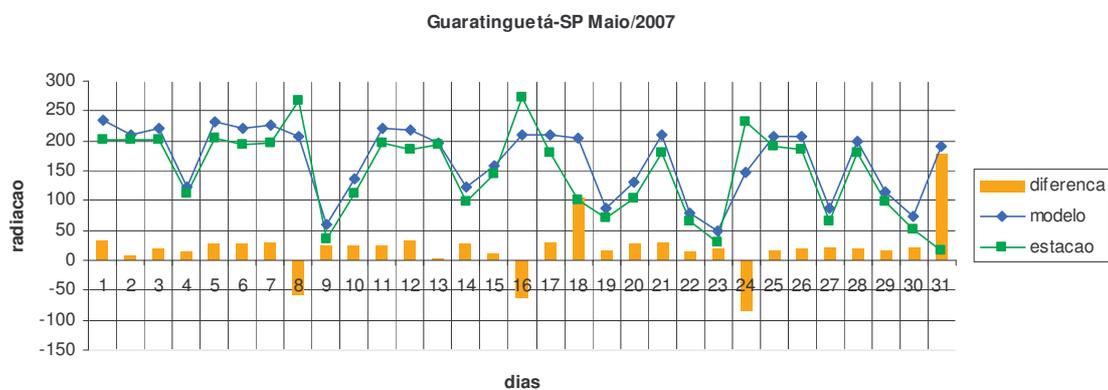


fig. 6.7 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Guaratinguetá-SP) para Maio/2007

Junho-2007 (Guaratinguetá-SP) – GOES10

Bom acompanhamento com diferenças menores que 50 W/m².

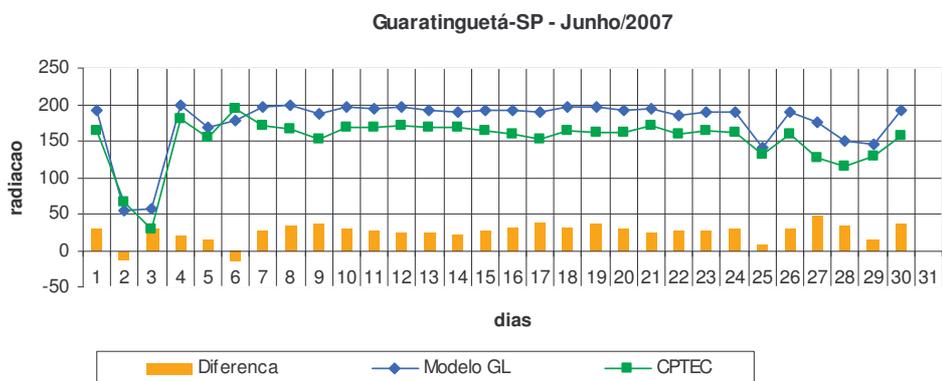


fig. 6.8 – Gráfico comparação dados Modelo GL x Estação CPTEC (Guaratinguetá-SP) para Junho/2007

Abaixo os gráficos de dispersão dos valores das estações anteriormente analisadas no mesmo período.

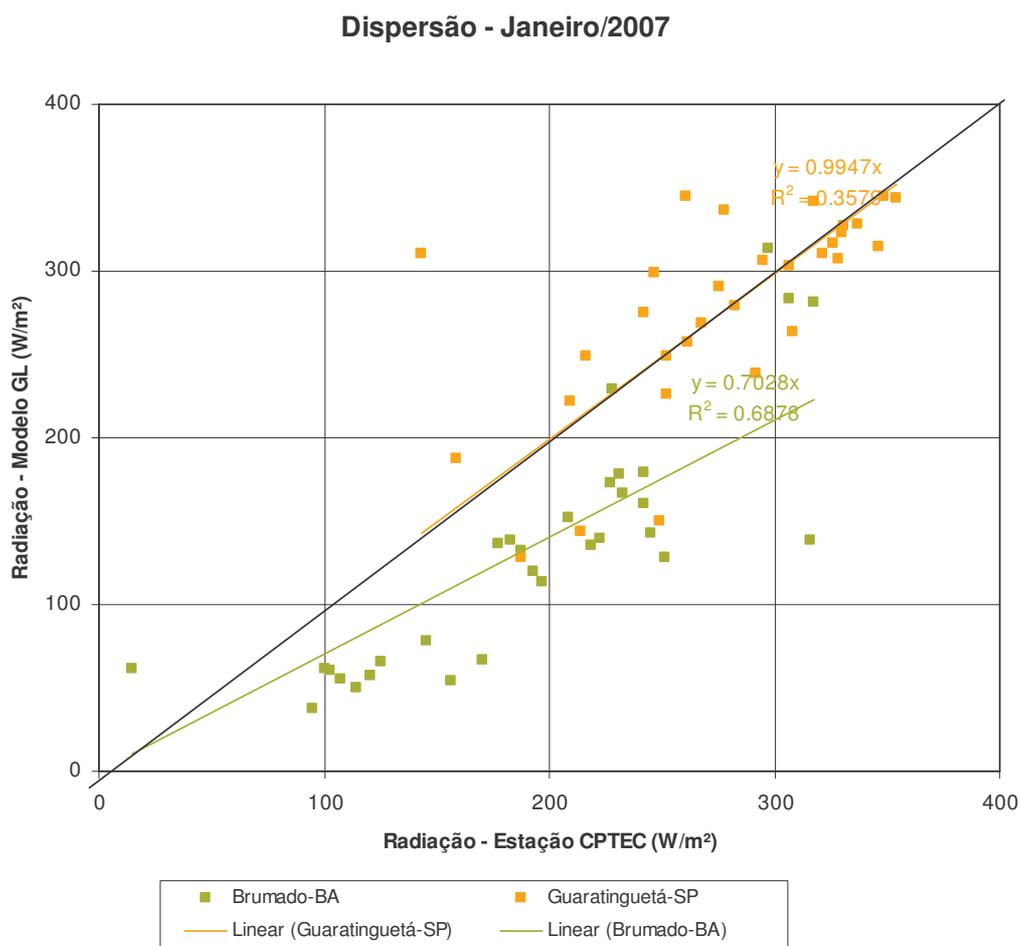


fig. 6.9 – Gráfico de dispersão GL x Estações CPTEC (Guaratinguetá-SP e Brumado-BA) para Janeiro/2007

Janeiro/2007 – Dispersão – (Brumado-BA e Guaratinguetá-SP) – GOES12

A figura apresenta a comparação do modelo GL com os dados de duas estações, como diagrama de dispersão.

A comparação do modelo GL com os dados da estação de Guaratinguetá apresenta uma melhor centralização, porém com desvios entre seus valores. Estatisticamente, o conjunto de dados se alinha com a verdade terrestre, já que a regressão MODELO/ESTAÇÃO vem dada pela reta $\text{MODELO} = 0,0995 \text{ ESTAÇÃO}$.

A estação da Bahia apresenta bom acompanhamento com os valores do modelo (figura 6.2), porém apresenta também desvios dos valores dos dados entre si. É preocupante o afastamento da diagonal principal, $\text{MODELO} = 0,703 \text{ ESTAÇÃO}$. Ele pode demonstrar um piranômetro com erro de calibração, com defeito ou a falta de imagem.

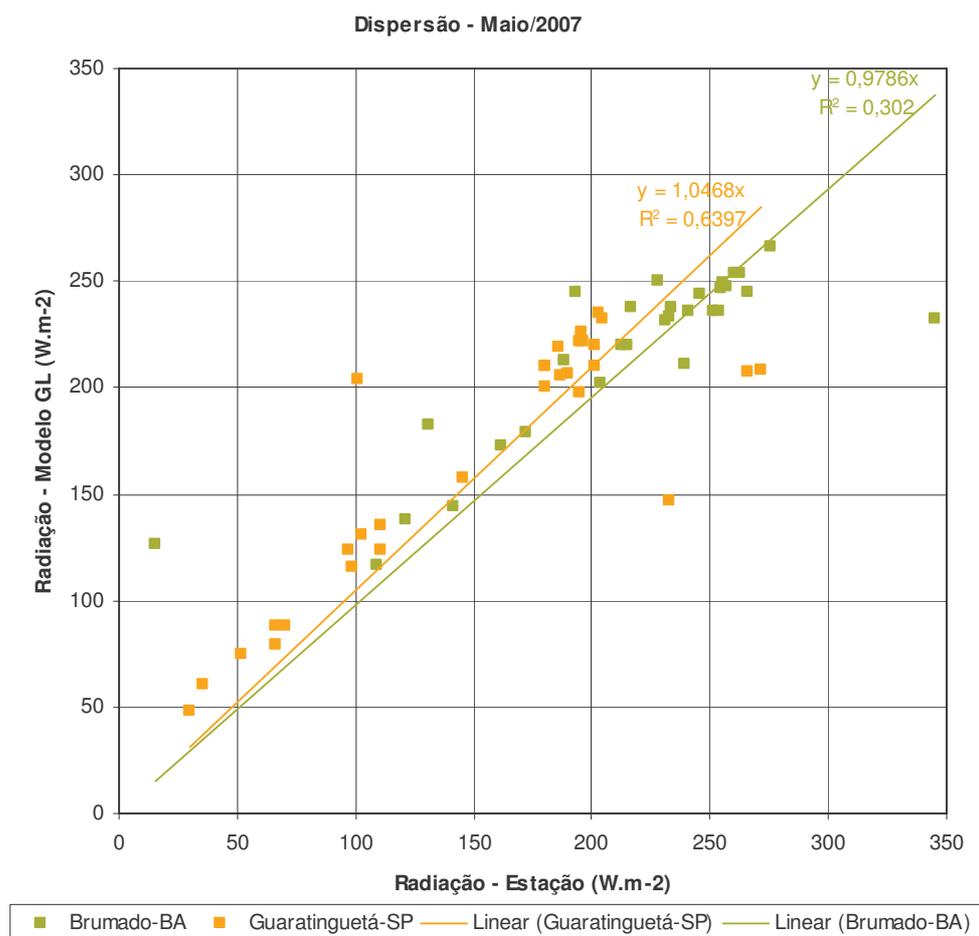


fig. 6.10 – Gráfico de dispersão GL x Estações CPTEC (Guaratinguetá-SP e Brumado-BA) para Maio/2007

Maio/2007 – Dispersão (Brumado-BA e Guaratinguetá-SP) – GOES10

Nesta regressão, o modelo GL apresenta excelente correspondência com a verdade terrestre:

Guaratinguetá – SP → MODELO = 1.045 ESTAÇÃO

Brumado – BA → MODELO = 0.979 ESTAÇÃO

Provavelmente, entre janeiro e maio houve manutenção das estações da Bahia, recuperando-se a qualidade de medição em Brumado.

Desvio Médio – Janeiro/2007(GOES12) e Junho/2007(GOES10)

Como demonstração dos desvios médios das estações nos meses analisados segue o mapa do recorte da região Nordeste do Brasil:

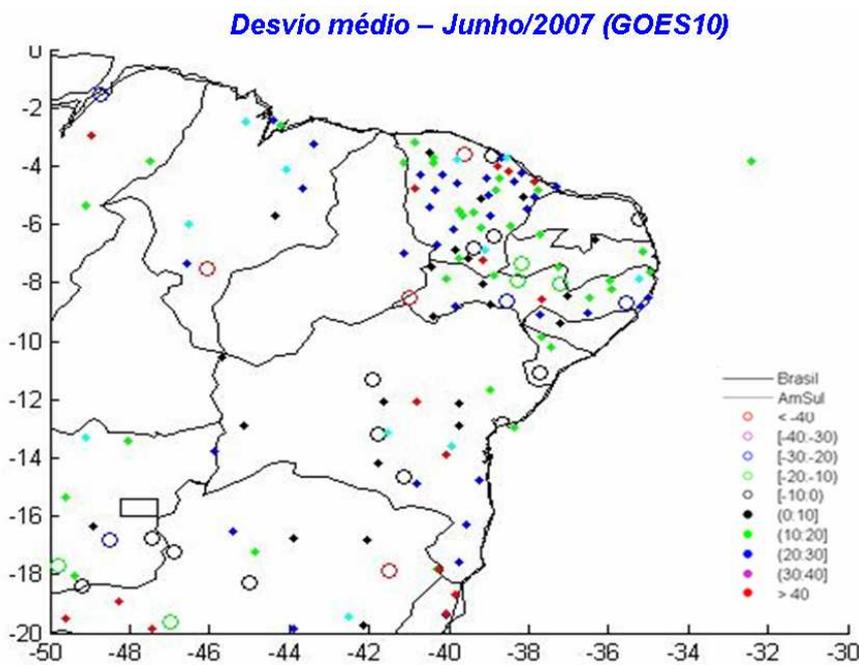


fig. 6.11 – Gráfico desvio médio no Nordeste do Brasil para Janeiro/2007

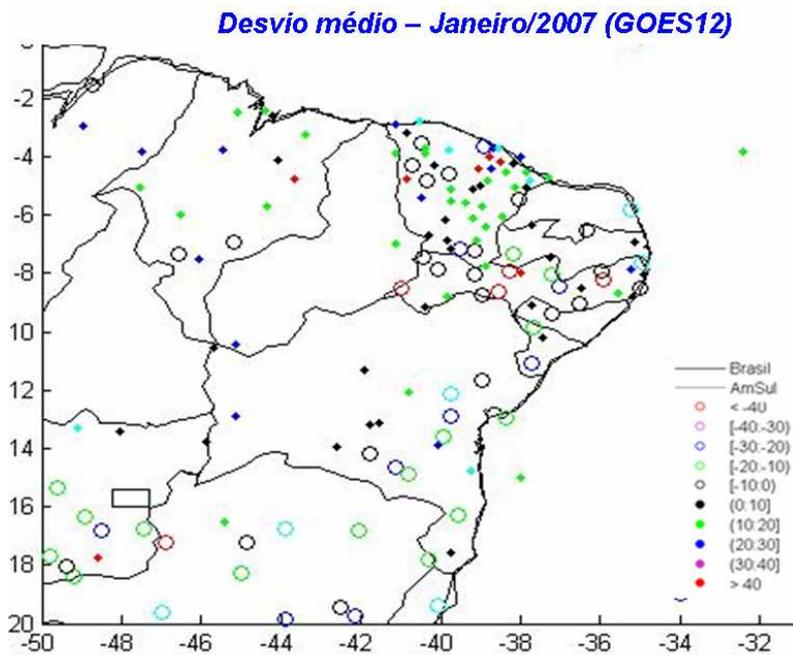


fig. 6.12 – Gráfico desvio médio no Nordeste do Brasil para Maio/2007

Nestes gráficos foram desconsideradas estações com menos de 10 dias de dados porque expressam clara situação irregular. Esses fatos evidenciam que o processamento serve para julgar a qualidade do modelo GL e também para gerar alertas sobre estações com comportamento irregular ou atípico.

A figura 2 ilustra a distribuição da DIFERENÇA média mensal para o Nordeste do Brasil em janeiro de 2007. Nessa figura observa-se que alguns locais têm diferença considerável (símbolos em vermelho).

Na figura 3, percebe-se que algumas estações mantêm o desvio elevado. A média geral dos desvios mensais para janeiro/2007 e junho/2007 é $\langle m \rangle = +2$ e 0 W.m^{-2} e a média dos desvios padrões é $\langle s \rangle = 36$ e 22 W.m^{-2} respectivamente. Comparado com análises anteriores (CEBALLOS e BOTTINO, 2006), este resultado sugere que:

- 1) desvios sistemáticos do modelo estão atualmente minimizados com correção apropriada do sinal do canal VIS;
- 2) as hipóteses simples adotadas no modelo são geralmente suficientes para se obter resultados satisfatórios para variados fins.

CAPÍTULO 4 – Conclusões e Trabalhos Futuros

Embora seja um método simples de filtragem de dados e análises estatísticas, a análise proporciona uma visão clara em quantidade e qualidade do comportamento médio do modelo GL obtendo resultados positivos. Além de colaborar para o monitoramento da rede de estações, gerando alertas visando a qualidade dos dados.

Como trabalho futuro deseja-se:

- reprocessar os resultados do modelo GL do período de 1996 a 2005 referente à degradação progressiva do sinal do satélite GOES8 e GOES12;
- operacionalizar o processamento de validação;
- atualizar a listagens de estações mensalmente evitando falta de dados, verificando o *status* atual de cada estação da rede e alertando os seus responsáveis;
- adicionar a análise horária dos arquivos gerados pelo modelo;
- verificar se há falta de dados das imagens de satélite, verificando também a qualidade do satélite GOES10;
- armazenar as análises geradas num banco de dados de modo que fiquem disponíveis ao público em geral na página da DSA;
- aplicar o modelo de radiação GL também para o continente africano utilizando imagens do satélite METEOSAT-8 e disponibilizar também a sua validação.

Referências Bibliográficas

CEBALLOS, J. C., BOTTINO, M. J., SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES-E imagery. *J. Geoph. Res.*, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.

M. J. BOTTINO, S. V. BOAS. Estimativa de Radiação Solar por Satélite: Processamento da Série Temporal de Janeiro de 1996 a Setembro de 2002 e Abril e Maio de 2003. Dezembro de 2006.

CEBALLOS, J.C. e M.J. BOTTINO. Solar radiation in South America, period 1998-2004: Some aspects of a satellite-based data base. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, SC. Anais em CD-ROM. 2006.

NGUYEN, L., D. R. DOELLING, P. MINNIS, J.K. AYERS. Rapid technique to cross calibrate satellite imager visible channels. Earth Observing Systems IX Conference, International Symposium on Optical Science and Technology, SPIE 49th Annual Meeting, Denver, CO, 2-6 August 2004. (Cópia disponível em URL <http://satellite.cptec.inpe.br/pesquisa/BIBLIO/biblio01.htm>).

MIRANDA, R. M.; CEBALLOS, J. C. Evaluation of burning aerosol influence on performance of solar radiation assessed by model GL - CPTEC. In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (ICSHMO), 8., 2006, Foz do Iguaçu. Proceedings... São José dos Campos: INPE, 2006. Poster, p. 843-850. CD-ROM. ISBN 85-17-00023-4.

BOTTINO, M.J., J.C. CEBALLOS, W.F.A. LIMA. Classificação de nuvens em imagens multiespectrais GOES-8 na região amazônica: comparação com radiossondagens. Third LBA scientific conference, Brasília, 27-29 July 2004.

J. C. CEBALLOS. Arquivos de Radiação Solar Estimada por Satélite: Séries Pentadais para a América do Sul. Versão V02: modelo GL1.2, Janeiro 1996 – Dezembro 2006. Julho de 2007. Disponível em: <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/Glseries/GLpentad0.htm>.