



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ESTIMATIVA DE RADIÇÃO SOLAR DO MODELO GL/CPTEC UTILIZANDO IMAGENS SEVIRI-MSG.

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

Leandro de Oliveira Macedo (FATEC-GT, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: leandro.macedo@cptec.inpe.br

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

E-mail: juan.ceballos@cptec.inpe.br

Julho de 2009

RESUMO

Este trabalho, iniciado em agosto de 2008, tem como objetivo o estudo do comportamento do modelo GL de estimativa de radiação solar utilizando imagens geradas pelo satélite MSG. O modelo GL está operacional na DSA/CPTEC desde 2002, e atualmente encontra-se na versão 1.2. A estimativa de radiação solar é feita a partir de imagens do canal 1 geradas pelo sensor VIS do satélite GOES10 e processadas pelo modelo, gerando uma imagem com dimensões de 1800 por 1800 pixels, focalizadas na América do Sul. Baseado em imagens do GOES10, os dados de radiação gerados pelo modelo têm mostrado um bom comportamento estatístico ao se comparar com dados de estações solarimétricas de superfície. Desde o final de 2008, o modelo foi adaptado para processar imagens geradas pelo canal 1 do sensor SEVIRI, presente no satélite MSG. Este sensor apresenta estabilidade no que diz respeito à calibração. Esta adaptação permitiu observar outras áreas da superfície terrestre, e estender o campo de estimativa de radiação, obtendo uma imagem de 1625 por 3250 pixels que agora abrange parte da América do sul, o Oceano Atlântico e dois terços do continente Africano. Para estudar o comportamento desta adaptação do modelo, foi selecionada uma região do globo que pode ser observada pelos dois satélites: América do Sul oriental. Foi realizada uma série de análises, dispostas em três etapas: Na primeira avaliou-se o comportamento do modelo utilizando imagens GOES10 comparadas com dados obtidos de redes de estações; de forma semelhante à primeira, na segunda etapa avaliou-se o comportamento do modelo ao utilizar imagens MSG. Na terceira etapa foram comparados dados pontuais e campos de radiação gerados a partir dos dois satélites, a fim de comparar a coerência dos dois resultados. Os resultados obtidos nas três etapas descritas foram os seguintes: 1) a radiação solar estimada pelo modelo utilizando imagens GOES é coerente com os dados das redes de estações em março de 2009; 2) a radiação solar estimada com imagens MSG representa bem os dados das estações nesse período; 3) os dados de radiação do modelo com imagens GOES são coerentes com os dados de radiação do modelo com imagens MSG. Com efeito, a comparação para dados pontuais (com estações) evidencia uma boa linearidade entre os modelos, embora exista uma diferença sistemática entre os dois resultados; por outro lado, a diferença entre campos de radiação sugere que essa diferença possa atingir 50 W.m^{-2} para a irradiância média diária. Uma razão associada a esta diferença pode originar-se na estimativa de refletância dos dois satélites; por isso, um estudo sobre a calibração do canal VIS dos sensores GOES Imager e MSG SEVIRI (canal VIS) está em andamento. Para isso, estão sendo comparadas imagens do salar de Uyuni (Bolívia), de complexos de nuvens no Atlântico e de um “site” no deserto do Sahara (África).

SUMÁRIO

RESUMO	2
SUMÁRIO.....	3
CAPITULO 1 – OBJETIVOS DO TRABALHO	4
CAPITULO 2 – O MODELO GL DE RADIAÇÃO SOLAR	5
CAPITULO 3 – A GERAÇÃO DE CAMPOS DE RADIAÇÃO COM IMAGENS DO SATÉLITE MSG.....	7
CAPITULO 4 – VALIDAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO GL-MSG.....	9
CAPITULO 5 – PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS	10
CAPITULO 6 – ANÁLISE DE QUALIDADE	12
CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	21

CAPITULO 1 – OBJETIVOS DO TRABALHO

O modelo GL de radiação solar está operacional na DSA/CPTEC desde 2002, e atualmente encontra-se na versão 1.2. Até janeiro de 2009, o modelo GL utilizava imagens geradas no canal 1 (VIS) do sensor Imager, presente no satélite GOES10. Em fevereiro de 2009, o modelo GL sofreu adaptações para utilizar imagens geradas pelo sensor SEVIRI (canal VIS), presente no satélite MSG (Meteosat Second Generation). Estas novas imagens permitiram estender o campo de estimativa de radiação solar com o modelo para uma área que abrange parte da América do Sul, o Oceano Atlântico e dois terços do continente Africano.

Com o modelo GL agora adaptado a calcular a radiação solar por imagens MSG, surgiu a necessidade de avaliar os resultados obtidos. Para isso foi necessário desenvolver uma série de análises onde se procurou comparar estes resultados, com dados obtidos através de redes de estações solarimétricas (verdade terrestre). Ainda foi necessário realizar uma comparação entre os resultados obtidos com o modelo GL utilizando imagens MSG com resultados do próprio modelo utilizando imagens GOES.

Assim, o principal objetivo do estudo consiste na geração de campos de radiação solar com o modelo GL utilizando imagens MSG, além de uma validação preliminar destes dados de radiação gerados. Contudo, foram desenvolvidas outras atividades que forneceram a base teórica e prática para que este objetivo pudesse ser alcançado, nas quais destacam-se:

- **Estudar os conceitos básicos de radiação solar e terrestre.** Para isso foram propostas pelo orientador algumas leituras e exercícios para fixação destes conceitos;

- **Estudar os métodos de calibração do satélite.** Todo o processamento do modelo GL 1.2 depende dos valores de Refletância calculados a partir de imagens binárias geradas pelos sensores dos satélites utilizados. Logo um estudo sobre a calibração dos satélites GOES e MSG foi necessário para saber se os dados de entrada do modelo são corretos.

- **Estudar a região do salar de Uyuni (Bolívia) como alvo de observação para calibração absoluta do GOES.** A calibração absoluta pode ser realizada observando alvos terrestres com grande refletância. Neste caso o estudo avaliou a região do salar de Uyuni como um possível “site” de calibração para o satélite GOES. Este estudo ainda está em andamento.

- **Realizar uma validação de dados preliminar para o sistema modelo GL + imagens MSG.** Esta é uma validação preliminar para verificar se o comportamento dos dados do modelo representa bem a verdade terrestre (dados de PCDs) e os dados de radiação gerados com imagens GOES.

CAPITULO 2 – O MODELO GL DE RADIAÇÃO SOLAR

Durante o período diurno a superfície terrestre está exposta a radiação eletromagnética emitida pelo sol. Esta radiação, também chamada de radiação solar, é a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e pelas características climáticas do planeta. Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do espectro eletromagnético e o restante na do infravermelho próximo e como radiação ultravioleta.

Ao penetrar na atmosfera uma parte da radiação é absorvida por partículas suspensas (sob a forma de gases). Outra parte é absorvida pelos continentes e águas. O restante da radiação incidente mais a radiação incidente na cobertura de nuvens é refletida de volta ao espaço.

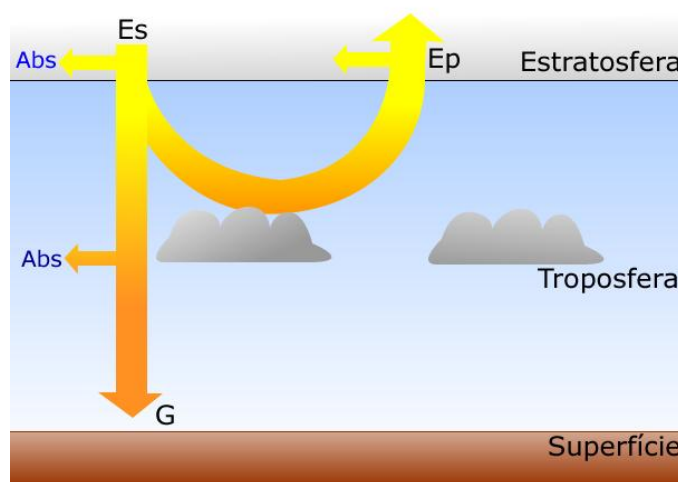


Figura 1 - Radiação Solar na superfície

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

A radiação solar pode ser estimada de dois modos: 1) pelos modelos estatísticos; 2) pelos modelos físicos.

Os modelos estatísticos procuram ajustar E_p no topo da atmosfera com base em dados de estações solarimétricas, têm validade regional e requerem validação sistemática.

Já os "modelos físicos" propõem relações entre fluxos no topo e à superfície baseadas em equações de transporte da radiação (Gautier *et al.* 1980; Stuhlmann *et al.* 1990; Whitlock *et al.* 1995; Ceballos e Moura 1997), dependem da condição atmosférica no momento e podem ser generalizados para áreas extensas.

O modelo GL 1.2, é um modelo físico 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. O albedo é a razão entre a radiação incidente e a radiação refletida.

Este modelo estima a radiação solar em dois intervalos espectrais de banda larga: 1) ultravioleta+visível (UV+VIS), e 2) infravermelho próximo (IV), e não considera o efeito de aerossóis.

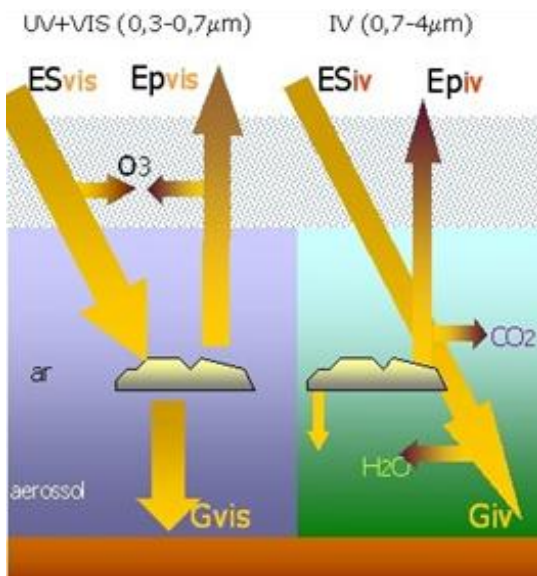


Figura 2 - Estrutura do modelo nos intervalos UV+VIS e IV.

Ao lado pode se verificar a estrutura conceitual do modelo GL 1.2 para os intervalos espectrais de banda mencionados.

Segundo Ceballos e Bottino (2007), as imagens do canal visível do GOES imager permitem avaliar de forma simples a radiação global no intervalo 0,3-0,7 μm , uma vez descontada a absorção pelo ôzônio.

No intervalo infravermelho (0,7-4 μm) supõe-se escassa dispersão pela atmosfera e que a transmitância por nuvens é desprezível; a irradiância à superfície é principalmente a direta, atenuada ao atravessar gases atmosféricos (H_2O e CO_2 principalmente).

Em sua versão atual (1.2), o modelo GL assume para o intervalo UV+VIS: 1) considera-se que parte da irradiância advinda do sol é absorvida na estratosfera ou no solo, e outra parte é refletida ao espaço; 2) considera que a troposfera é conservatória, ou seja, as nuvens não absorvem na banda UV+VIS; e 3) não considera o efeito de aerossóis. O balanço de radiação neste intervalo de banda resulta em:

$$\mu_0.S_{vis} = ES_{vis} = Ep_{vis} + A_3 + (1-R_{svis}).G_{vis} \quad (1)$$

onde S_{vis} é o fluxo solar no topo da atmosfera, e R_{svis} é a refletância no solo, ES_{vis} é a radiação incidente no topo da atmosfera, A_3 é a absorção da radiação na atmosfera, G_{vis} é a absorção da radiação no solo e Ep_{vis} é a radiação refletida no topo da atmosfera.

Para o intervalo IV, o modelo assume as seguintes características: 1) a dispersão Rayleigh é desprezível, e a radiação direta passa pelas nuvens e é absorvida por gases como H_2O e CO_2 ; 2) a absorção de nuvens é alta porém sua transmitância é desprezível; 3) reflexões múltiplas entre o solo e a base de nuvens. Neste intervalo espectral, o balanço de radiação é descrito por:

$$G_{iv} = \mu_0.S_{iv}.T_2.(1 - C)/(1-C.R_n.R_{iv}) \quad (2)$$

onde C é a nebulosidade, T_2 é a transmitância direta de H_2O e CO_2 , e R_n e R_{iv} são as refletâncias de base de nuvem e de solo, respectivamente.

A variável nebulosidade (C) tem um papel fundamental para o modelo GL. Segundo Galvão (2007), 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:

$$L = (1-C) L_{min} + C L_{max} \quad (3)$$

onde L_{min} , descreve a condição de céu claro (refletância mínima), enquanto que L_{max} descreve a condição de céu coberto (radiância máxima).

Ainda segundo Galvão (2007), Vale ressaltar que este conceito é válido apenas para cobertura de nuvem cumuliforme. ***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:

$$C = (R - Rmin)/(Rmax - Rmin) \quad (4)$$

CAPITULO 3 – A GERAÇÃO DE CAMPOS DE RADIAÇÃO COM IMAGENS DO SATÉLITE MSG

O modelo GL 1.2 de radiação solar está operacional na DSA/CPTEC desde 2002. Contudo existem resultados do modelo desde janeiro de 1996. Convém abordar sobre as mudanças que ocorreram no modelo desde então.

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. A tabela a seguir mostra algumas modificações que ocorreram no modelo desde sua adaptação ao sensor GOES Imager.

Satélite	Período	Área de Cobertura (Divisão de Satélites e Sist. Ambientais)	
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

Tabela 1 - Sucessivas adaptações do modelo GL aos diversos satélites da série GOES-E.

Até janeiro de 2009 o modelo estimava radiação solar a partir de imagens do canal VIS do satélite GOES 10. As imagens de saída do modelo têm dimensões de 1800 x 1800 pixels, com resolução de um pixel a cada 0.04° (4 Km no ponto sul-satélite), focalizada na América do Sul. Em 2007-2008, o modelo foi adaptado para estimar radiação solar através de imagens geradas pelo canal VIS do sensor SEVIRI, que equipa os satélites da série MSG (Meteosat Second Generation). Em 2009, o modelo está operacional em fase de testes.

Com esta nova adaptação, o modelo GL 1.2 passa a estimar radiação sobre uma imagem de 3250 por 1625 pixels, com resolução de um pixel a cada 0.04°, que agora focaliza parte da América, o Oceano Atlântico e dois terços do continente Africano.

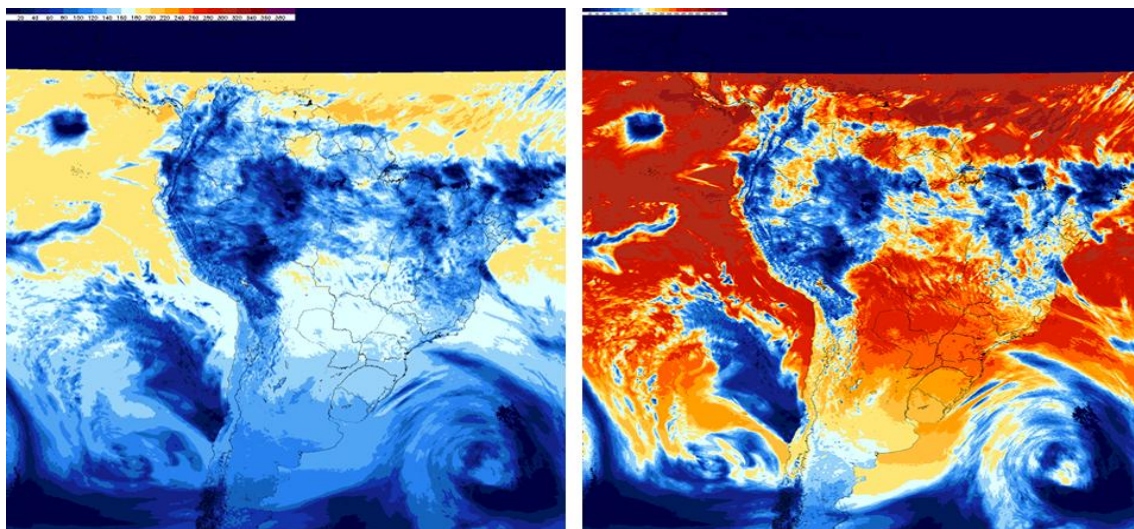


Figura 3 A - Exemplo de campos de radiação GOES. Banda UV+VIS à esquerda, binário global (UV+VIS+IV) a direita.

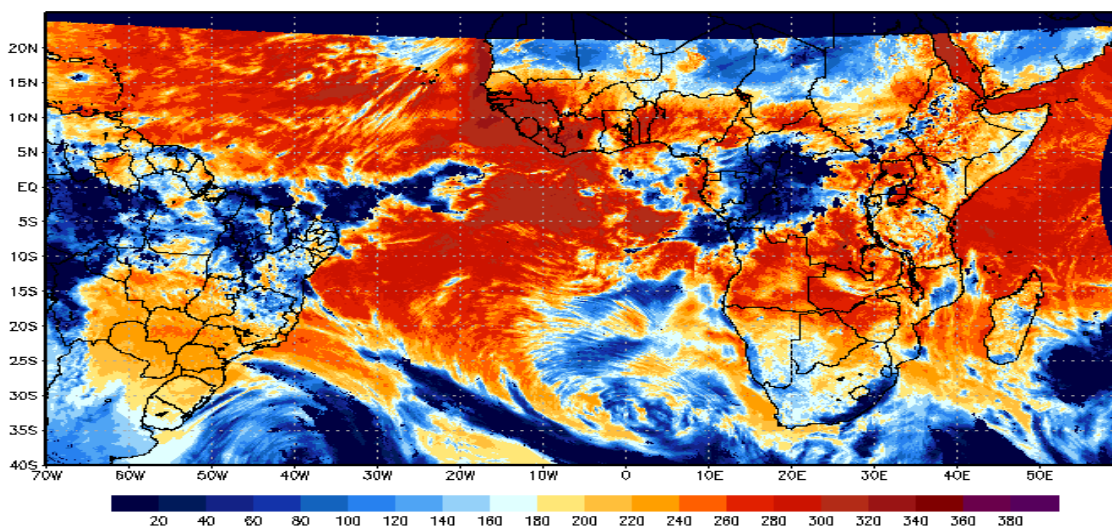
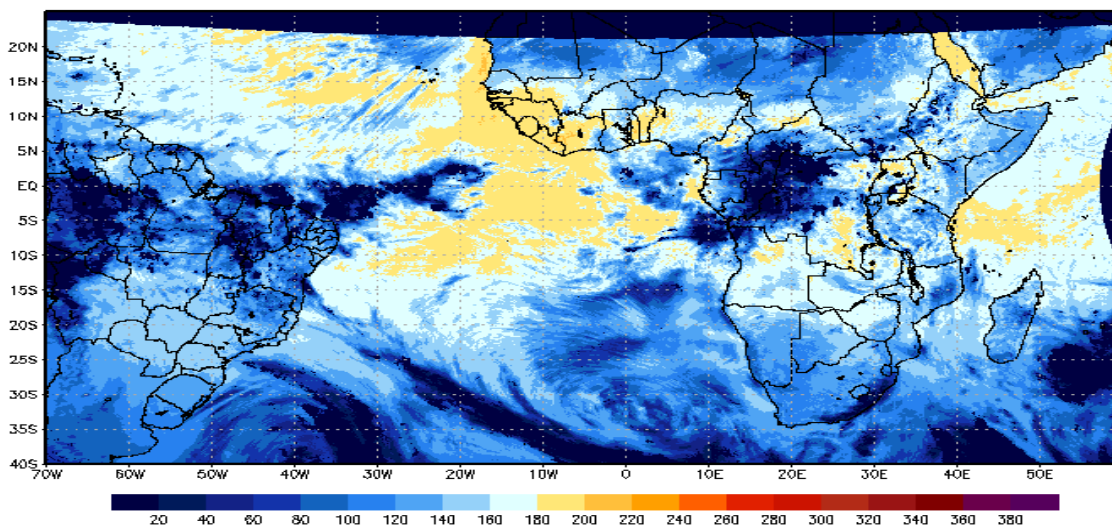


Figura 3 B - Exemplo de Campo de radiação MSG, saída do modelo GL. Banda UV+VIS acima, binário global (UV+VIS+IV) a direita.

A nova alteração permitiu visualizar um campo quase duas vezes maior com relação à longitude (ver figuras 3A e 3B), mas ainda está em fase de testes. Também está sendo desenvolvido um esquema de validação sistemática de dados do modelo GL-MSG comparado com dados de verdade terrestre. Um esquema de validação de dados preliminar será discutido mais adiante, sendo que este tem a finalidade de verificar o comportamento dos dados gerados pelo modelo GL-MSG comparando com dados de estações solarimétricas de superfície, e com dados gerados pelo modelo GL-GOES.

CAPITULO 4 – VALIDAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO GL-MSG

Está sendo implementado o esquema de validação de dados semelhante ao descrito em Galvão (2007). Segundo o autor, este esquema permite comparar os resultados do modelo GL com as “verdades terrestres” que são fornecidas por estações de superfície munidas de piranômetros. A validação de dados para o modelo GL-GOES utiliza dados de estações do CPTEC, INMET, PIRATA, SONDA e SOLRADNET. Atualmente a rotina de obtenção direta de dados do INMET está temporariamente inoperante, devido a mudanças no site do referido instituto (ver <http://www.inmet.gov.br/>).

Eventualmente o INMET fornece os dados de estações automáticas ao CPTEC, na taxa de um conjunto horário. Está em fase de implementação a “desbufferização” deste fluxo de dados e seu consequente armazenamento em base de dados da DSA.

Para validar dados do modelo GL-MSG além de contar com os dados fornecidos pelas redes de estações citadas, a DSA está buscando meios de obter dados de estações pertencentes a países do continente Africano.

Além de garantir a qualidade dos dados fornecidos pelo modelo, a validação ainda permite constatar:

- **O impacto de desconsiderar a presença de aerossol.** Observa-se que nas regiões com queimadas sazonais 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 dos satélites GOES e MSG.** O canal visível do sensor Imager presente no satélite GOES apresenta degradação de sinal em decorrência do tempo. Publicações da NOAA e NASA descrevem coeficientes de calibração para ajustar o sinal degradado. Por outro lado, o sensor SEVIRI que equipa o satélite MSG apresenta boa estabilidade de sinal no canal visível. Um estudo está sendo desenvolvido e tem o objetivo de verificar a degradação de sinal apresentada no sensor Imager e propor: 1) uma calibração vigária simplificada, observando “sites” com grande refletância; 2) um ajuste entre os sensores Imager e SEVIRI no canal VIS, observando sistemas convectivos no Atlântico Tropical (ver Ceballos e Oliveira, 2009).

- **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). Observa-se que uma análise preliminar já foi realizada, considerando a distribuição de água precipitável descrita pelo modelo de previsão de tempo do CPTEC. Os resultados sugerem que (exceto para fontes constantes de água precipitável) o impacto é de 2ª ordem (Ceballos e Bottino, comunicação pessoal).

CAPITULO 5 – PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS

A adaptação recente do modelo implica na necessidade de verificar a qualidade dos dados gerados utilizando imagens MSG. Para isso foi desenvolvido um estudo que consiste na comparação de dados em três modalidades: 1) verdade terrestre (PCD) *versus* modelo GL-GOES; 2) verdade terrestre *versus* modelo GL-MSG; 3) modelo GL-GOES *versus* modelo GL-MSG. Na primeira avaliou-se o comportamento do modelo utilizando imagens GOES10 comparadas com dados obtidos de redes de estações; de forma semelhante à primeira, na segunda etapa avaliou-se o comportamento do modelo ao utilizar imagens MSG. Na terceira etapa foram comparados dados pontuais e campos de radiação gerados a partir dos dois satélites, a fim de comparar a coerência dos dois resultados.

A metodologia utilizada para comparação é semelhante à mencionada em Galvão (2007), salvo algumas particularidades, e acrescentando apenas uma comparação de áreas de radiação dos dois modelos através de histogramas. Foi selecionada uma área que compreende a região nordeste e sudeste do Brasil (longitude inicial na faixa de 43°W).

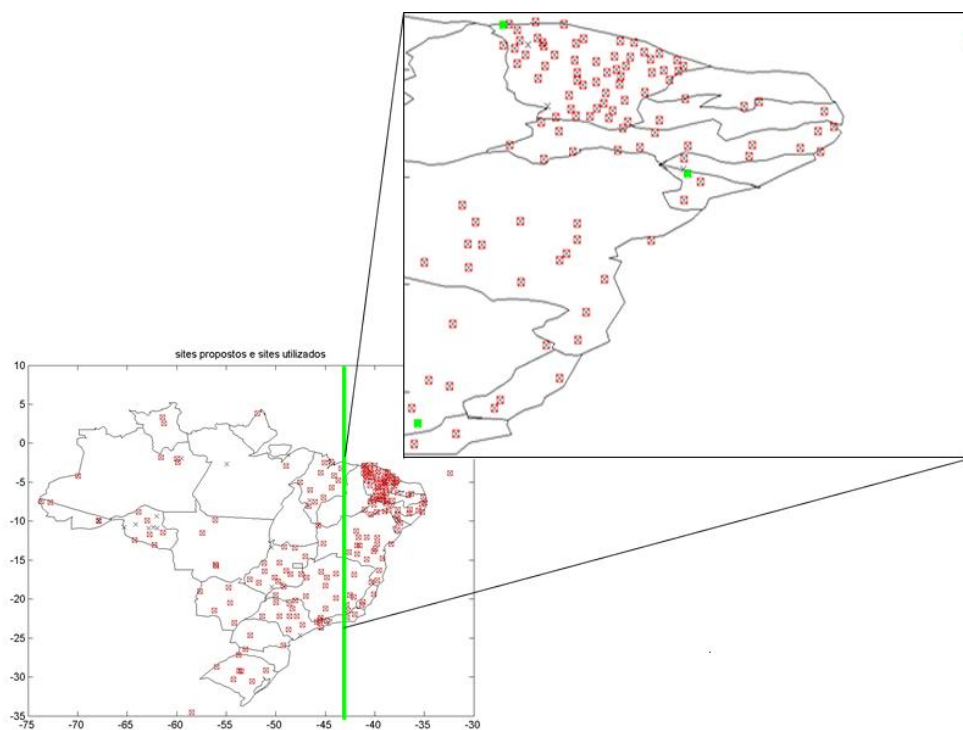


Figura 4 - Rede de estações SCD-CPTEC. Área de análise a leste de 43°W.

Esta faixa foi escolhida pelo fato dos dois satélites observam de forma semelhante a região do nordeste brasileiro, em longitudes típicas de 30-40°W, enquanto que GOES encontra-se em 60° e MSG em 0°. Em princípio o modelo GL baseado no GOES e no MSG deveria fornecer resultados semelhantes.

Os dados de estações foram obtidos na página de radiação solar da DSA, no seguinte link: http://satelite.cptec.inpe.br/PCD/historico/consulta_radsol.jsp, para março e abril de 2009. Portanto, foram incluídas apenas estações ligadas ao satélite SCD. Os dados a serem comparados provem de: 1) estações de superfície, organizadas em tabelas (arquivos TXT); 2) modelo GL-GOES: arquivos binários de radiação global diária (um por dia); 3) modelo GL-MSG: mesma estrutura que para GOES.

A análise centrou-se nos meses de março e abril de 2009. Área de análise: região do Brasil a leste de 43° W (ver figura 4).

5.1 – Processamento de dados de superfície e de satélite

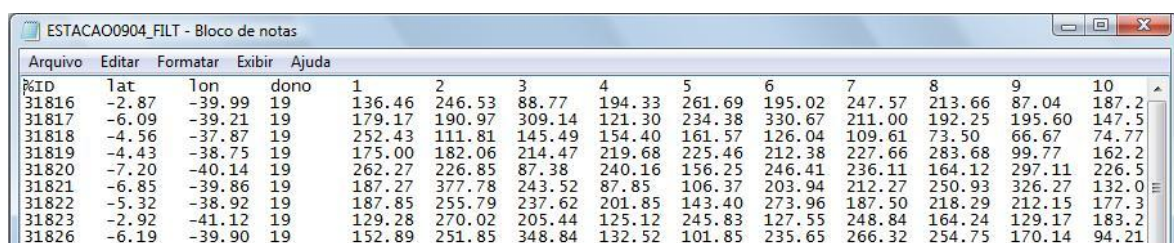
O método segue o padrão seguinte: Etapa 1: a partir das listas obtidas no site mencionado foi realizada uma primeira filtragem, eliminando os sites que não serão utilizados para comparação. Este primeiro processo gera o arquivo de estações selecionadas, onde se encontram a identificação da estação, coordenadas de latitude e longitude e 30 ou 31 valores diários de radiação. O mesmo script gera outros dois arquivos com estrutura semelhante ao primeiro, sendo um arquivo contendo valores de radiação retirados do modelo GL-GOES e outro contendo dados de radiação retirados do modelo GL-MSG. Os programas responsáveis pelo tratamento dos dados de radiação estão escritos em MatLab7. Os nomes dos arquivos têm a seguinte estrutura:

- **Prefixo:** identifica o que é contido no arquivo. Pode ser atribuído o prefixo ESTACAO, MODELOGOES ou MODELMSG. Por exemplo se o prefixo do arquivo é ESTACAO, sabe que este contém dados de radiação referente a estações solarimétricas.

- **Data:** mostra o ano e o mês aos que os dados presentes no arquivo se referem. Observa-se que no exemplo da figura 5 a data é referente ao ano de 2009 do mês de abril (0904).

- **Sufixo:** mostra que o arquivo foi gerado por determinado script. No exemplo, o arquivo ESTACAO0904_filt mostra que este arquivo foi gerado pelo script “filtragem_inicial.m”.

Etapa 2: é o processo de eliminação de dados inválidos. Aqui são executadas as rotinas que: 1) elimina dados com menos de 10 dias; 2) eliminar os dias inexistentes (GL = -999); 3) agora, com as listas de dados de radiação referentes a estações, GL-GOES e GL-MSG em mãos, calcula-se a diferença entre: 1) Estação-GOES; 2) Estação-MSG e 3) GOES-MSG. O script “calcula_diferenca.m” recebe como parâmetro de entrada os três arquivos citados e calcula as diferenças, gerando mais três arquivos seguindo a mesma estrutura descrita anteriormente.



Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda	%ID	lat	lon	dono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
					31816	-2.87	-39.99	19	136.46	246.53	88.77	194.33	261.69	195.02	247.57	213.66	87.04	187.2
					31817	-6.09	-39.21	19	179.17	190.97	309.14	121.30	234.38	330.67	211.00	192.25	195.60	147.5
					31818	-4.56	-37.87	19	252.43	111.81	145.49	154.40	161.57	126.04	109.61	73.50	66.67	74.77
					31819	-4.43	-38.75	19	175.00	182.06	214.47	219.68	225.46	212.38	227.66	283.68	99.77	162.2
					31820	-7.20	-40.14	19	262.27	226.85	87.38	240.16	156.25	246.41	236.11	164.12	297.11	226.5
					31821	-6.85	-39.86	19	187.27	377.78	243.52	87.85	106.37	203.94	212.27	250.93	326.27	132.0
					31822	-5.32	-38.92	19	187.85	255.79	237.62	201.85	143.40	273.96	187.50	218.29	212.15	177.3
					31823	-2.92	-41.12	19	129.28	270.02	205.44	125.12	245.83	127.55	248.84	164.24	129.17	183.2
					31826	-6.19	-39.90	19	152.89	251.85	348.84	132.52	101.85	235.65	266.32	254.75	170.14	94.21

Figura 5 - Exemplo de arquivo gerado na primeira parte do processamento.

Após o cálculo das diferenças, o script “filtragem_fina.m” recebe todos os outros arquivos gerados e elimina os dados considerados inválidos para validação. Este script também gera um novo arquivo chamado “ESTATanomes.txt”, contendo as primeiras estimativas de média (m) e desvio padrão (d) para os dados de estações, modelo GL-GOES, modelo GL-MSG, e ainda calcula uma média das 3 diferenças (md);

Para considerar um site nesta validação preliminar observa-se se o número de dias com dados válidos. O site é válido para comparação quando o número de dias após a filtragem for maior que 10.

São dados válidos para comparação aqueles que: 1) são diferentes de -999 (dado inexistente); 2) possuem valores de radiação maiores que 30 W/m^2 ; 3) possuem valores de radiação menores que 400 W/m^2 ; 4) aqueles cuja média das diferenças seja maior que -120 W.m^{-2} e menor que $+120 \text{ W.m}^{-2}$.

A estrutura do arquivo ESTATANomes.txt é composta por 22 colunas onde as primeiras quatro são referentes a identificação e localização do site, e as colunas restantes correspondem aos dados de validação do modelo.

Identificação / localidade				Pcd-Filtro Grosseiro			Pcd-Filtro Fino			GOES-Filtro Grosseiro		
%ID	lat	lon	dono	NdPCDG	DpPCDG	MdPCDG	NdPCDF	DpPCDF	MdPCDF	NdGOEG	DpGOESG	MdGOESG
31816	-2.87	-39.99	19	30	70.26	161.58	27	67.51	163.49	27	86.8	179.02
31817	-6.09	-39.21	19	29	56.57	186.49	25	38.48	170.07	29	43.69	152.5
31818	-4.56	-37.87	19	22	54.44	101.51	18	54.47	111.87	27	65.63	164.92
31819	-4.43	-38.75	19	28	70.93	169.54	24	64.57	171.89	28	67.69	171.29
31820	-7.2	-40.14	19	29	76.77	187.42	23	75.51	168.68	29	46.53	136
31821	-6.85	-39.86	19	29	72.39	178.41	26	53.43	161.92	29	56.87	152.76
31822	-5.32	-38.92	19	29	65.45	183.72	26	59.96	179.51	29	67.89	185.72
31823	-2.92	-41.12	19	30	63.35	174.05	27	56.6	173.44	29	59.94	170.06
31826	-6.19	-39.9	19	29	68.21	190.71	26	53.65	176.52	28	49	160.01

Figura 6 - Estrutura do arquivo ESTAT0904.txt.

CAPITULO 6 – ANÁLISE DE QUALIDADE

Em março de 2007, adotava-se o GOES10 como fornecedor complementar de imagens de satélite para o modelo pelo fato de ser exclusivo para a América do Sul e disponibilizar imagens a cada 15 minutos. Em janeiro de 2009, adota-se o MSG como fornecedor de imagens do modelo, que ainda está em fase de adaptação e testes. O sucesso desta adaptação é importante, porque a desativação do GOES 10 está prevista para dezembro de 2009.

Após a filtragem preliminar dos dados de radiação, foi realizado um estudo para constatar se de fato os campos de radiação gerados a partir de imagens MSG eram coerentes com campos de radiação gerados a partir de imagens GOES. Também se avaliou os dados do modelo comparando com dados de “verdade terrestre”.

Em um primeiro momento, compararam-se os dados de irradiância média diária das estações alvo com valores estimados pelo modelo GL-GOES e GL-MSG nas mesmas coordenadas das estações.

Durante os meses de março e abril de 2009 foram selecionados dias aleatórios e coletado os valores de irradiância média diária das estações escolhidas como amostra (ver figura 4). A partir daí foram gerados os gráficos de dispersão para verificar a linearidade: 1) de valores de estações com o modelo GL-GOES; 2) de valores de estações com o modelo GL-MSG; 3) de valores do modelo GL-GOES com o modelo GL-MSG.

Nesta primeira comparação, os dados do modelo GL-GOES representam bem os dados das estações alvo, salvo alguns dados do modelo e de estações que apresentam dispersões consideráveis. Estes dados ruidosos certamente estão dentro do conjunto de dados inválidos para comparação.

Os dados do modelo GL-MSG representam bem as estações e demonstram boa linearidade comparando com as mesmas. Também existem dados de estações e do modelo que serão descartados pelo processo de validação de dados.

Os valores do modelo GL-MSG apresentam boa linearidade comparando com valores do modelo GL-GOES, o que significa que os dados de irradiância média diária estimada tanto pelo GL-GOES quanto pelo GL-MSG estão sendo bem calculados pelo modelo. Contudo, foi observada a diferença dos campos de radiação gerados pelo modelo GL-GOES e GL-MSG. Foi considerado um recorte de 1400 linhas por 1000 colunas que

representa a região nordeste e parte da região sudeste e do Atlântico Sul. Um histograma representa a diferença entre os campos de radiação. O modelo GL-GOES estima uma correção para a degradação do canal VIS de acordo com publicação da NOAA (<http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/vicarious-calibration.htm>, <http://satelite.cptec.inpe.br/home/>). Esta correção ainda está sujeita a discussão. Por outro lado, a calibração do MSG aparenta não precisar (por enquanto) de grandes ajustes, como pode ser observado pela calibração vigária publicada pela Eumetsat (SEVIRI Solar Channel Calibration Coefficients VIS 0.6 (PDF, 13 KB), através do link http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/Meteosat_Meteorological_Products/Calibration/SP_1119512219822).

Uma pesquisa preliminar procurou realizar uma calibração vigária no GOES, e uma inter comparação das calibrações GOES-MSG, como descrito no trabalho em anexo (Ceballos e Oliveira, 2009), apresentado no XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. O método desenvolvido mostrou-se promissor, mas uma definição da calibração do GOES10 ainda está em análise.

A comparação dos recortes binários sugere a diferença possa atingir $+50 \text{ W.m}^{-2}$ para a irradiância média diária com desvio padrão da ordem de 43 W.m^{-2} . Uma razão associada a esta diferença pode originar-se na estimativa de refletância dos dois satélites.

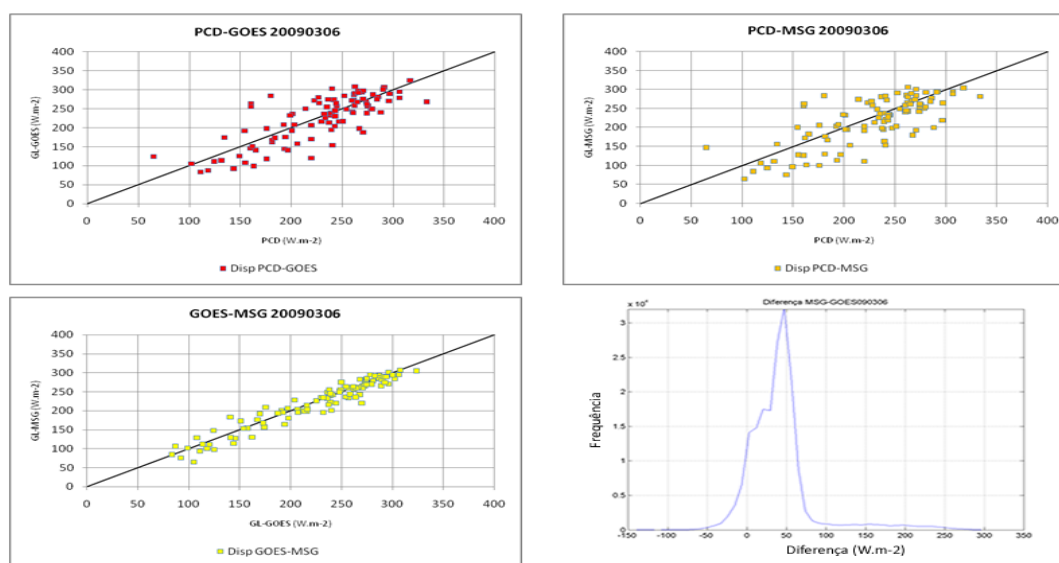


Figura 7 - Irradiância média diária e diferença de recortes GL-GOES - GL-MSG para 6/3/2009.

Para o dia 6 de março de 2009, os valores de irradiância média diária, calculados pelo modelo se ajustam bem aos dados fornecidos por estações CPTEC. Os campos de radiação dos modelos GL-GOES e GL-MSG subtraídos mostram a diferença a cerca de $+50 \text{ W.m}^{-2}$ e desvio padrão de $43,07 \text{ W.m}^{-2}$.

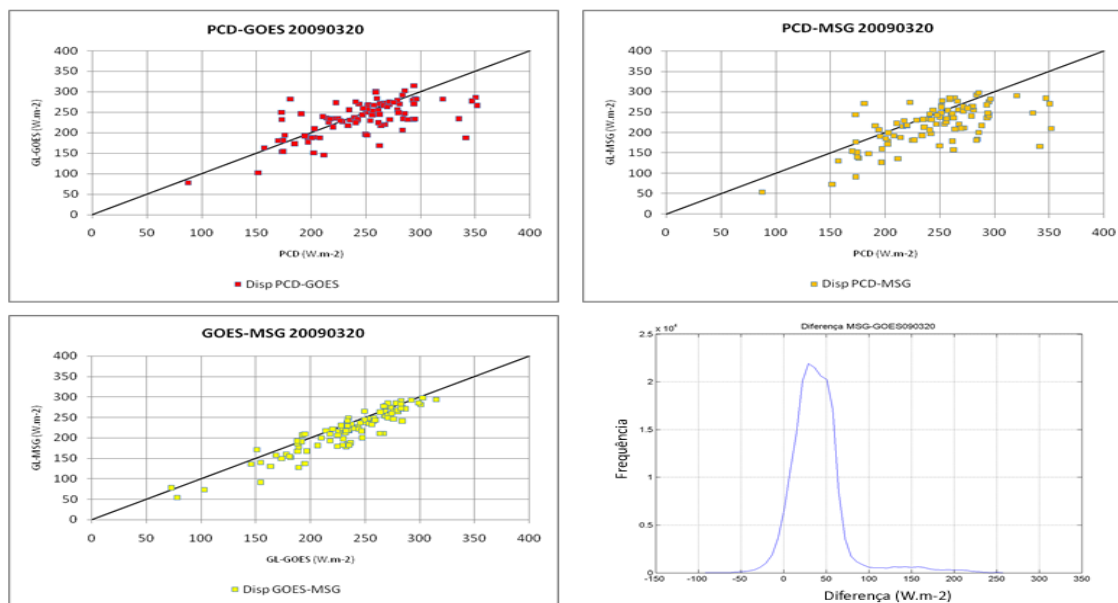


Figura 8 - Irradiância Média Diária e diferença de recortes GL-GOES - GL-MSG para 20/3/2009.

Para o dia 20 de março de 2009, os valores de irradiância média diária, calculados pelo modelo se ajustam bem aos valores de estações CPTEC. Nota-se no gráfico de dispersão GOES-MSG uma ligeira diferença, mas ainda sim os dados possuem boa linearidade. A diferença de campos de radiação sugere o valor a cerca de $+30 \text{ W.m}^{-2}$ e desvio padrão de $33,15 \text{ W.m}^{-2}$.

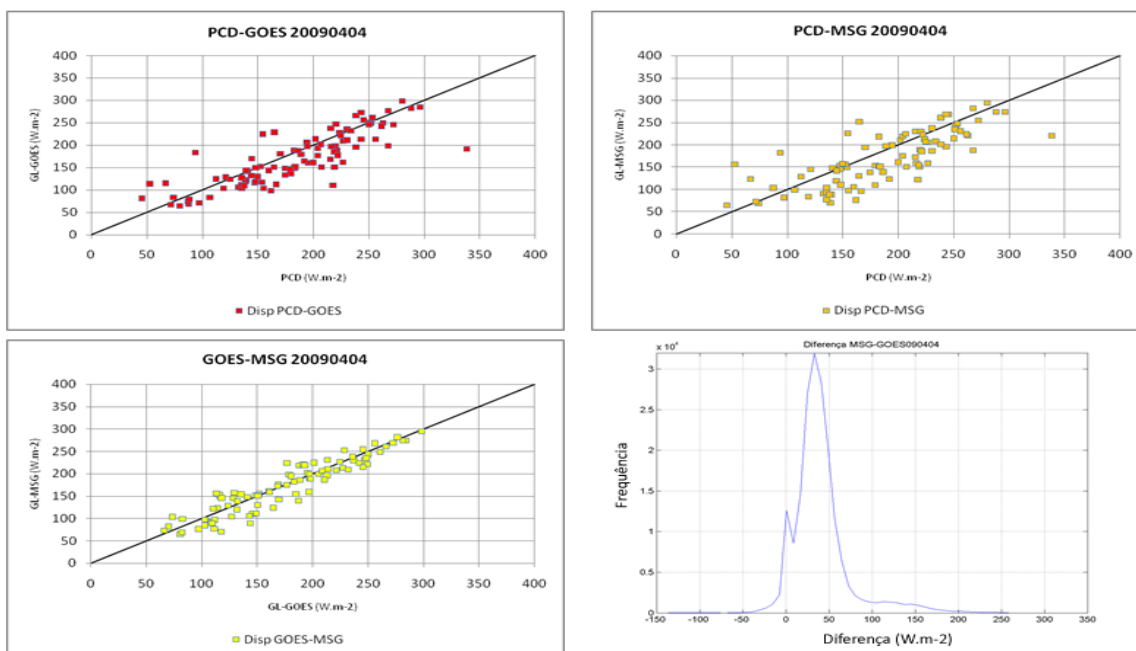


Figura 9 - Irradiância Média Diária e diferença de recortes GL-GOES - GL-MSG para 4/4/2009.

Para o dia 4 de abril de 2009, os dados de irradiância média diária, calculados pelo modelo são coerentes com os dados de estações CPTEC. A diferença dos campos de radiação está a cerca de $+40 \text{ W.m}^{-2}$ e desvio padrão de $33,20 \text{ W.m}^{-2}$.

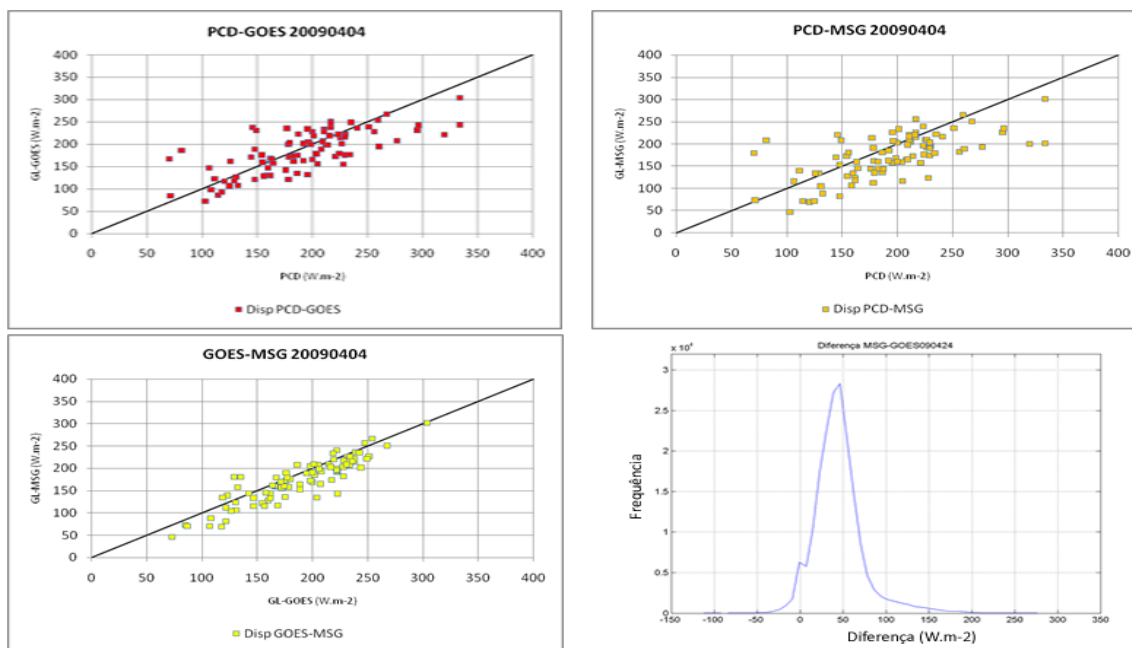


Figura 10 - Irradiância Média Diária e diferença de recortes GL-GOES - GL-MSG para 24/4/2009.

Para o dia 24 de abril de 2009, os valores de irradiância média diária, calculados pelo modelo representam bem os dados de estações CPTEC. A diferença de campos de radiação está a cerca de $+50 \text{ W.m}^{-2}$ e o desvio padrão é de $29,54 \text{ W.m}^{-2}$.

Através desta comparação, consegue-se perceber que o modelo GL-MSG representa bem os dados de irradiância média diária das estações. Nota-se uma diferença sistemática quando comparados os campos de radiação gerados pelo modelo GL-GOES e GL-MSG.

Uma segunda comparação mais leva em consideração os valores de irradiância média diária ao longo do mês. Observa-se o comportamento de uma dada estação e compara-se a mesma com valores obtidos no modelo para ambos os satélites. Para esta comparação, faz-se a filtragem dos dados da estação e do modelo, conforme descrito no capítulo cinco.

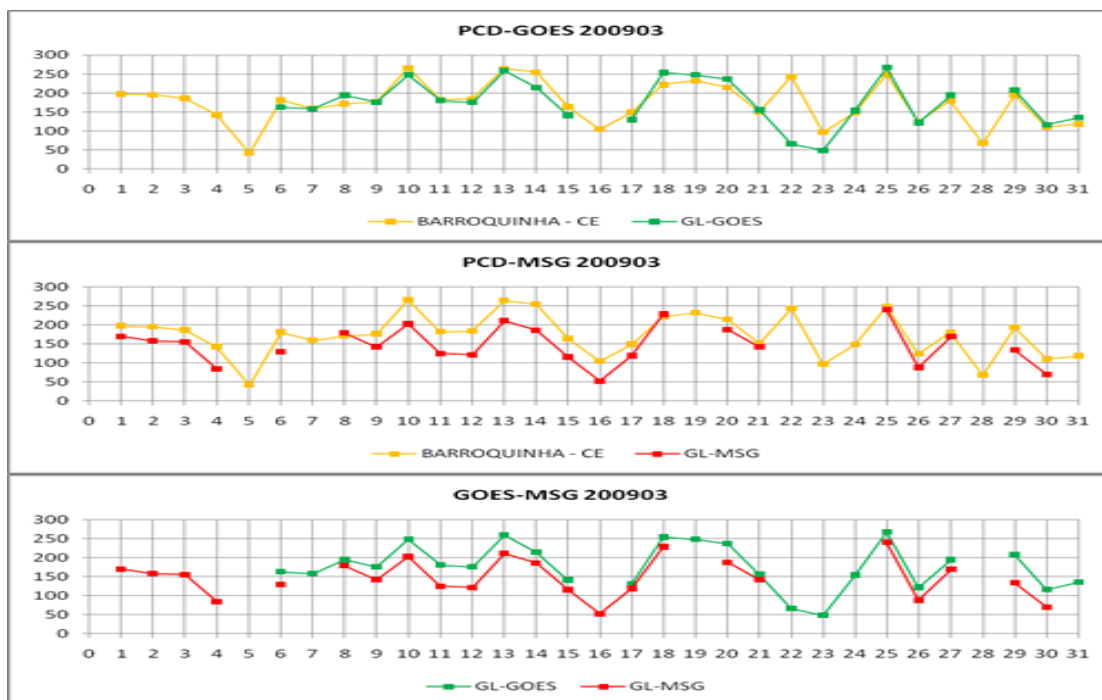


Figura 11 - Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Março de 2009.

Para a estação Barroquinha, no mês de março, observa-se que o modelo GL-GOES se ajusta bem a estação, salvo no dia 22 onde se constata que o modelo subestima a irradiância média diária e ocorre falta de dados do modelo para os dias 1, 2, 3, 4 e cinco. Para o modelo GL-MSG observa-se um bom ajuste aos dados da estação, porém existem muitos dias em que o modelo não fornece dados para este site. Quanto à comparação entre GL-GOES e GL-MSG observa-se um bom ajuste entre os modelos para este site, apesar de faltar dados em vários dias para ambos.

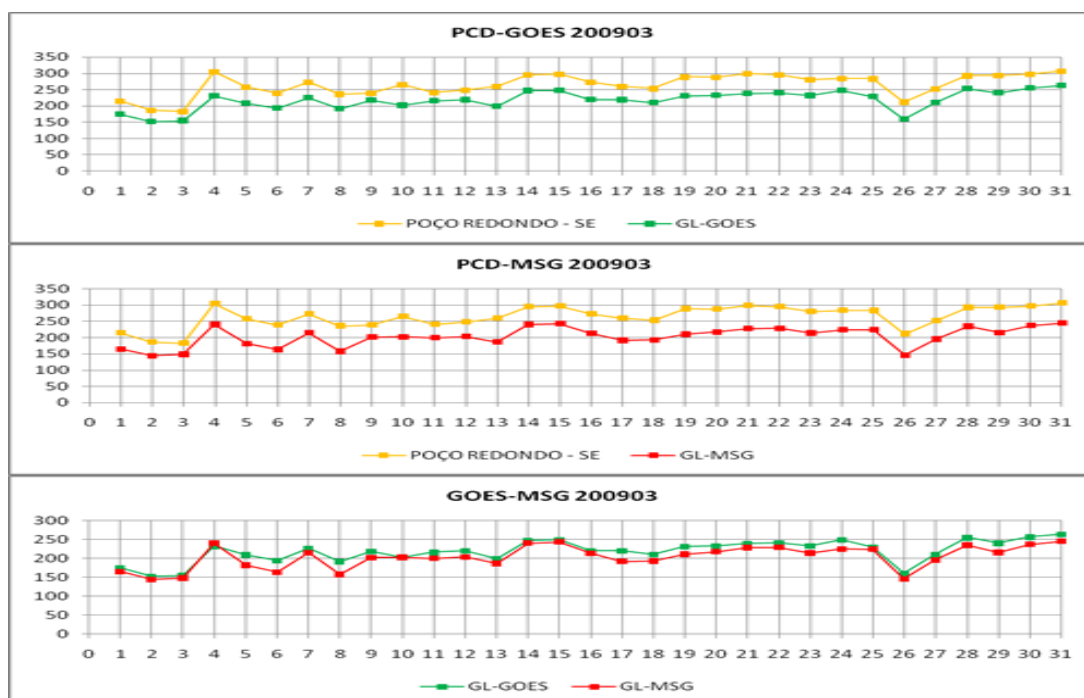


Figura 12 - Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Março de 2009.

Para a estação Poço Redondo, observa-se que tanto o modelo GL GOES quanto o modelo GL-MSG se ajustam bem aos dados da estação, porém nos dois casos constata-se uma diferença entre estação e modelo. Constata-se que esta diferença é da ordem de 50 W.m^{-2} tanto para o GL-GOES quanto para o GL-MSG. O modelo GL-MSG representa muito bem o modelo GL-GOES ao longo domes de março de 2009 neste site.

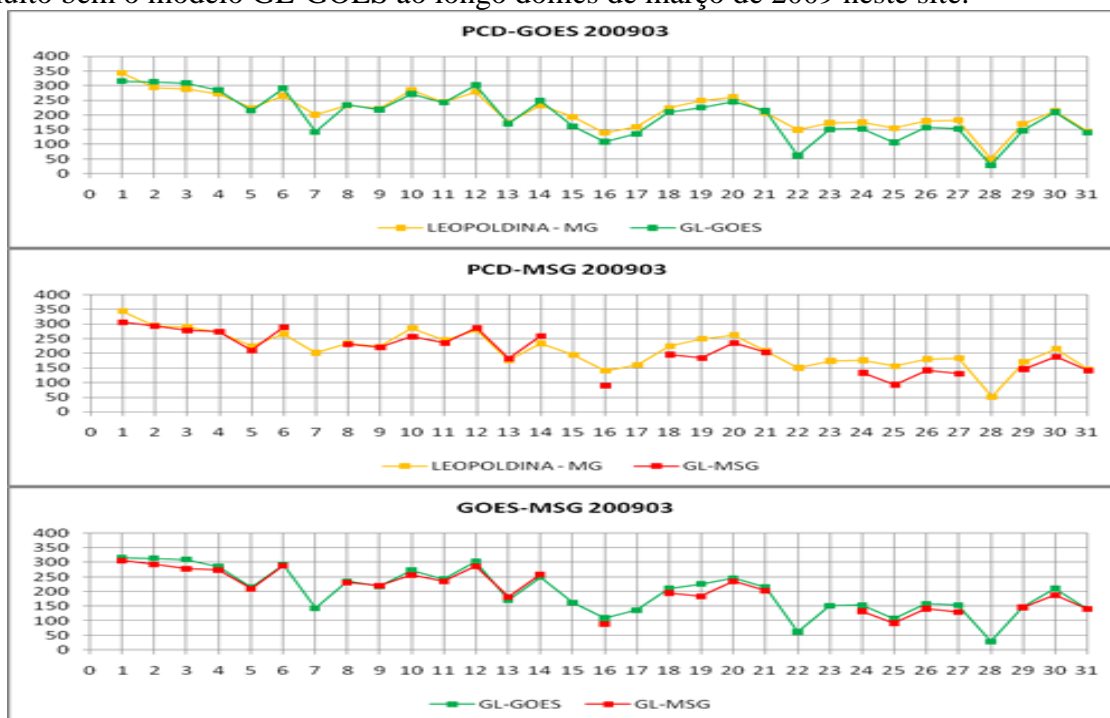


Figura 13 - Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Março de 2009.

Na estação Leopoldina os dados da estação estão bem representados pelo modelo com ambos os satélites. Há ausência de dados no modelo GL-MSG nos dias 7, 15, 17, 22, 23 e 28. O modelo GL-MSG representa bem os dados do modelo GL-GOES para este site.

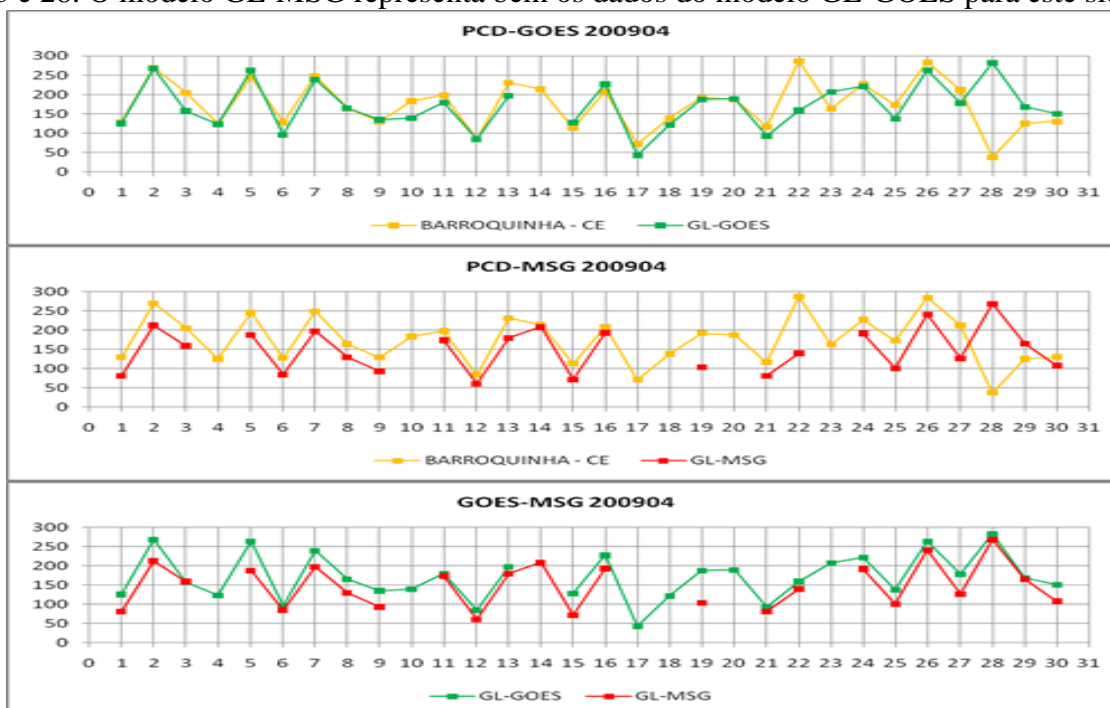


Figura 14 - Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Abril de 2009.

Verifica-se para o mês de Abril de 2009 que o modelo GL-GOES se ajusta muito bem a estação Barroquinha, salvo no dia 14 onde o modelo não oferece dados. Nos dias 22 e 28 percebe-se uma diferença considerável entre o modelo e a estação. Entende-se que o modelo subestima a irradiância média nos dias mencionados. Para o modelo GL-MSG, observa-se um bom ajuste com a estação, salvo nos dias 4, 10, 17, 18, 20 e 23 onde o modelo não apresenta dados. Também se evidencia que no dia 28 ocorre uma subestimativa de radiação do modelo comparado à estação. O modelo GL-MSG representa bem o modelo GL-GOES embora exista um leve desvio da ordem de 30 a 50 $W.m^{-2}$.

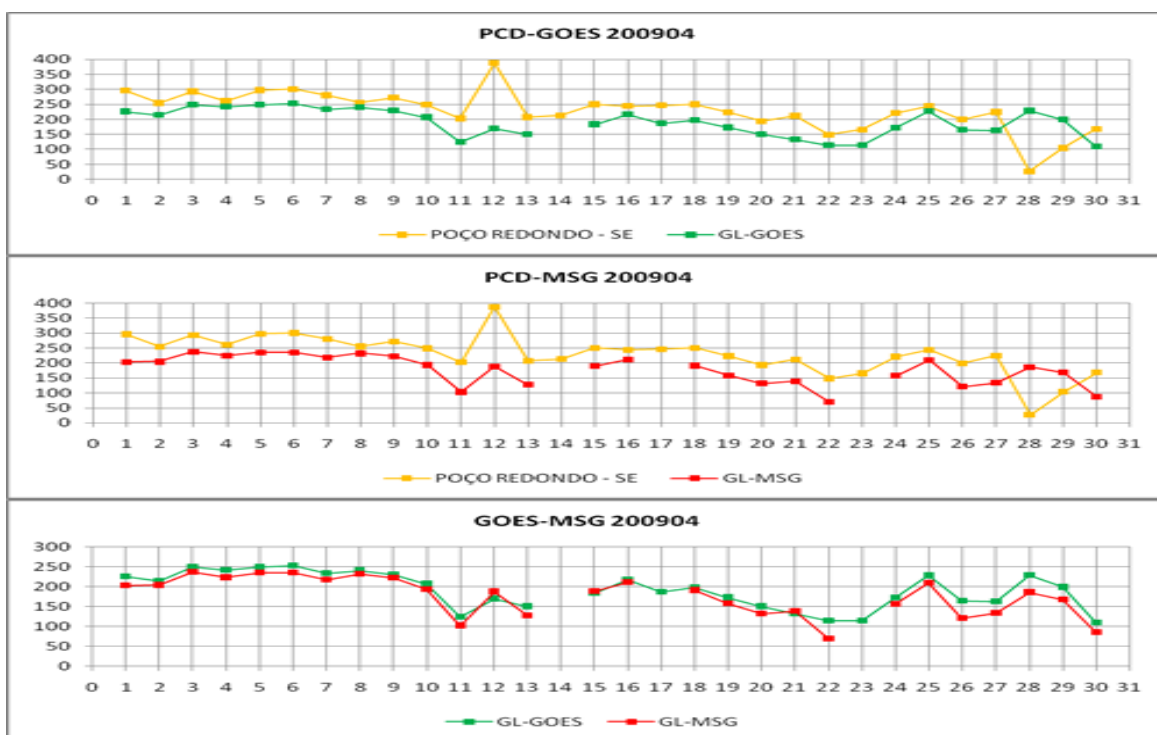


Figura 15 – Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Abril de 2009.

Para a estação Poço Redondo no mês de abril de 2009, observa-se certa coerência dos dados da estação com os dados dos modelos GL-GOES e GL-MSG, porém há ausência de dados do modelo GL-GOES no dia 14 e também nos dias 14, 17 e 23 para o GL-MSG. Pode-se observar também que nos dias 12 e 28 os dados da estação demonstram total incoerência com dados do modelo. Provavelmente nestes dias pode ter ocorrido algum tipo de erro na estação. Os modelos se representam muito bem. A diferença entre modelos e estação ainda se mantém a cerca de 50 $W.m^{-2}$ para este site.

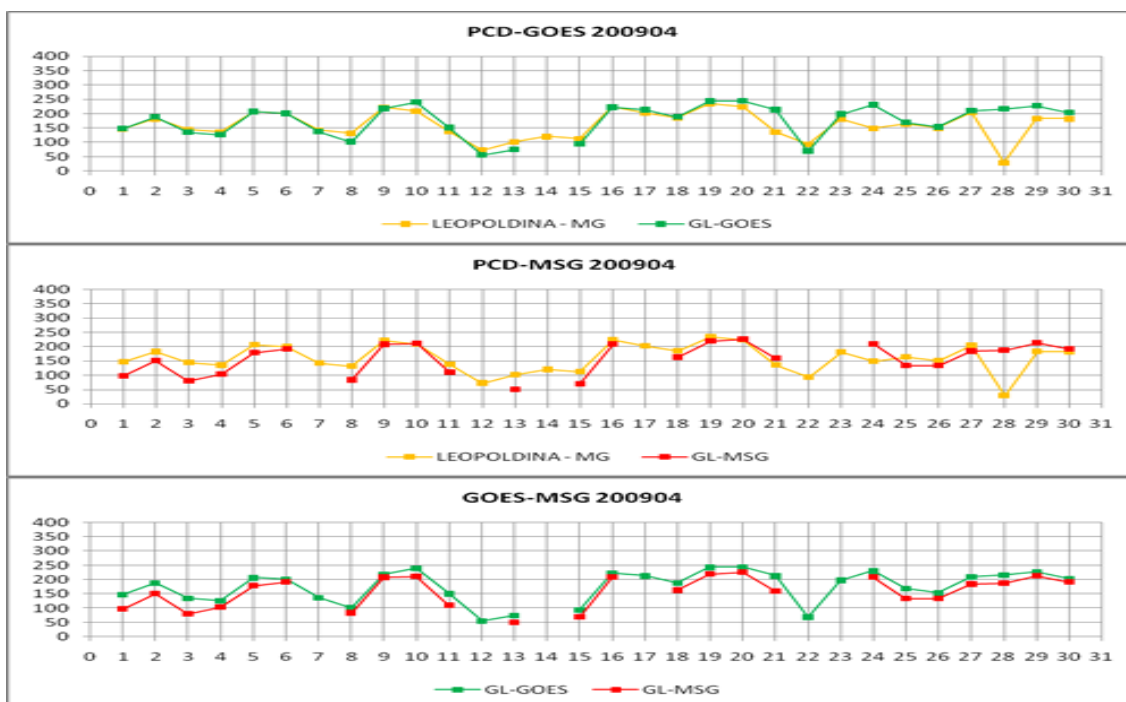


Figura 16 - Comparação do modelo com estação ao longo do mês de Abril de 2009.

Para a estação Leopoldina ao longo do mês de Abril de 2009, Observa-se um bom ajuste entre os dados da estação e os dados do modelo para ambos os satélites. Consta-se que no dia 28 possa ter ocorrido algum problema com a estação. Os valores dos modelos se ajustam muito bem, observando diferenças que variam da ordem de 20 a 50 $W.m^{-2}$.

Uma terceira comparação leva em consideração a média mensal de radiação das estações e dos modelos. Os diagramas de dispersão mostrados nas figuras 17 e 18 mostram as comparações de valores mensais dos sites de amostra comparados com os valores mensais dos modelos GL-GOES e GL-MSG.

Estatisticamente o modelo GL-GOES mostra uma boa correspondência com dados coletados das estações de amostra (Modelo = 0.975Estação para Março e Modelo = 0.973Estação para Abril de 2009).

As médias mensais do modelo GL-MSG se ajustam bem as medias mensais das estações (Modelo = 0.958Estação para Março e Modelo = 0.948Estação para Abril de 2009).

Os modelos se correspondem muito bem, demonstrando boa linearidade na dispersão de médias mensais (Modelo = 0.983Estação para Março e Modelo = 0.976Estação para Abril de 2009).

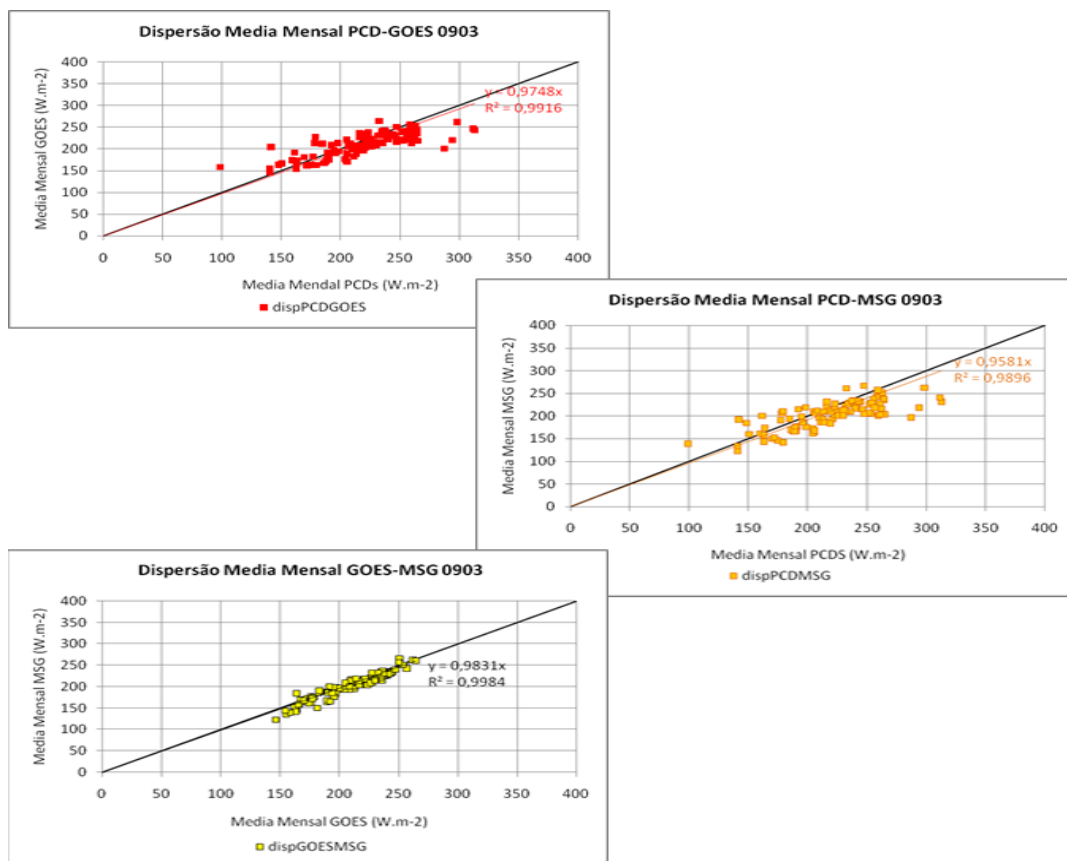


Figura 17 - Diagramas de dispersão das médias mensais para Março de 2009.

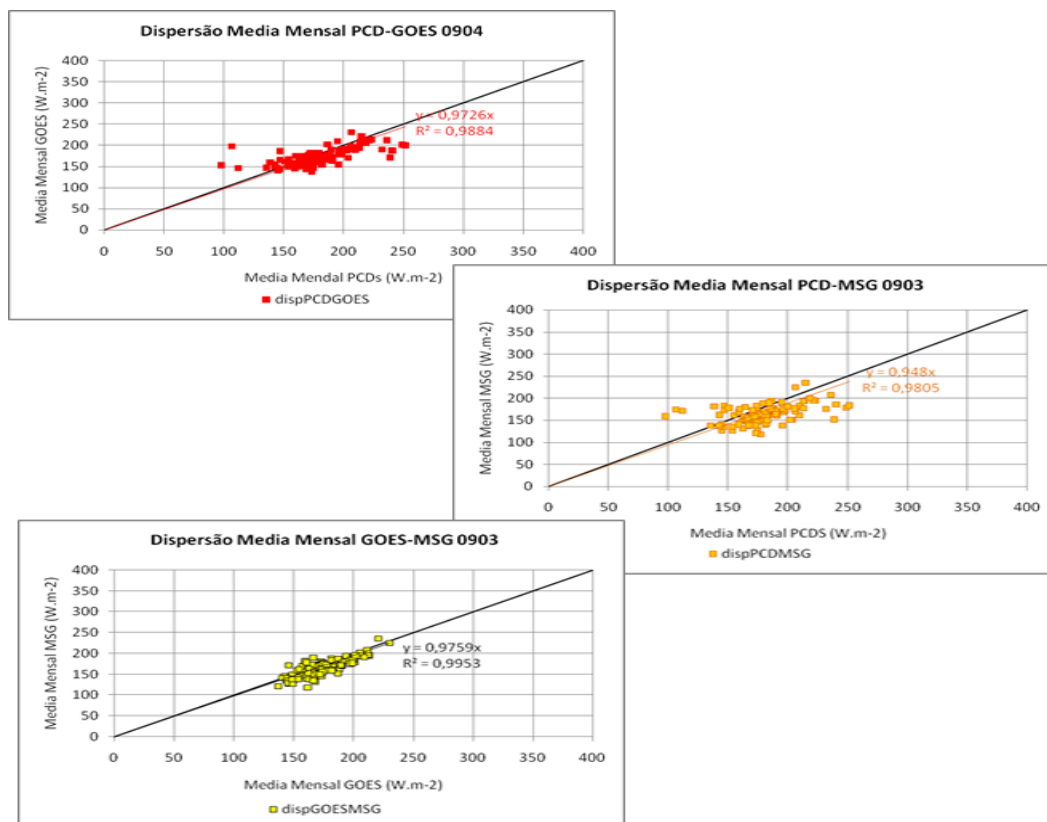


Figura 18 - Diagramas de dispersão das médias mensais para Abril de 2009.

CAPITULO 7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com este estudo, conclui-se que 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 com relação a qualidade de estimativa de radiação solar com o GL-GOES obtendo resultados positivos. Ainda esta validação preliminar mostrou que o modelo GL adaptado ao satélite MSG gera campos de radiação coerentes com a “verdade terrestre”, e se ajusta bem aos campos de radiação gerados com o modelo GL-GOES para a região estudada.

Como trabalhos futuros propõe-se:

- Concluir os testes do modelo GL adaptado ao satélite MSG;
- Aperfeiçoar o esquema de validação de dados apresentado neste documento, para ser implementado Operacionalmente na DSA;
- Disponibilizar os dados de radiação solar para o público da DSA, de maneira que o usuário possa interagir com estes dados através do sistema Sigma, realizando consultas deles, e tendo acesso a análises estatísticas e comparações com dados de radiação vindos de diversas fontes (INMET, SOLRADNET, SONDA, dentre outros).
- Organizar uma base de dados incluindo o histórico de valores GL GOES e MSG, e de medições de radiação solar obtidas por redes de estações do CPTEC, INMET, SOLRADNET, SONDA, dentre outros. Esta base de dados será de grande utilidade para o processo de análise de qualidade do modelo, mas também para usuários das áreas de climatologia, agrometeorologia e recursos renováveis;
- Desenvolver um banco de dados para interagir com essa base de dados, com o sistema SIGMA de representação de dados, e com usuários afins.

REFERENCIAS

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.

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.

CEBALLOS, J. C., BOTTINO, M. J., O modelo GL/CPTEC de radiação solar por satélite: potencial de informações para agrometeorologia. XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – Aracaju, SE, julho 2007.

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.

CEBALLOS, J. C.; OLIVEIRA, L. M. Uma calibração preliminar do canal VIS do sensor GOES 10 Imager. XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. (SBSR) – Natal RN, 2009. Anais em DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15852-PRE/10462). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.07.39>>.

GALVÃO, A.M. (J.C. Ceballos orientador). Análise de desempenho do modelo GL na estimativa de radiação solar por satélite. Relatório de Iniciação Científica PIBIC-INPE, julho 2007. 29 pp.

Uma calibração preliminar do canal VIS do sensor GOES 10 Imager

Juan Carlos Ceballos ¹
Leandro Macedo de Oliveira ²

¹ Centro de Previsão de Tempo e estudos Climáticos/INPE
12630-000 Cachoeira Paulista – SP
juanc_ceballos@yahoo.com.br

² FATEC Guaratinguetá
leandro.oliveira@cptec.inpe.br

Abstract.

Satellite image receiving and processing systems provide reflectance factor according to pré-launch calibration. GOES Imager does not perform onboard calibration for VIS channel, which has continuously degraded since GOES launching, more than ten years ago. We present results of two methods suitable for correcting GOES-VIS signal degradation. The first one is a first-order approximation which performs atmospheric correction at low aerosol loading conditions. It was applied to Salar de Uyuni taking profit of existent ground data; the results suggest to use a correction factor $K_{GOES} = 1,50-1,60$. The second method is especially useful for intercomparison between satellites. In lieu of searching fixed well-defined targets, it proposes intercomparison of statistical properties of extended complex systems. Comparison is made between cumulative distribution function for one reference satellite, and several similar functions obtained from applying different correction factors to another satellite. Comparison consists of verifying Euclidean distance between both distributions and choosing the best factor. It is found a scale relationship $K_{G-M} = 1,45$ for GOES-MSG. Results are preliminary but encouraging for creating a local simple but efficient calibration system for VIS- channel of several environmental satellites.

Palavras-chave: GOES 10, SEVIRI, Meteosat Second Generation, calibration, calibração, canal VIS, VIS channel

1. Introdução

Os sensores multiespectrais do tipo Imager nos satélites GOES; AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) nos satélites da série NOAA-n; SEVIRI (no MSG: Meteosat Second Generation) ou MODIS (na série EOS), têm conjuntos de detectores em vários intervalos espectrais da radiação solar (0,4 a 4 μm) e numa faixa restrita do espectro termal terrestre (4 a 14 μm). Basicamente, cada detector é uma célula fotoelétrica que recebe fluxo radiativo F num intervalo espectral estreito $\delta\lambda$, gera uma corrente elétrica e registra uma voltagem U num circuito adequado (Weinreb *et al.* 1997). Em geral, essa voltagem varia quase linearmente com o fluxo F , que por sua vez é proporcional à radiância L incidente:

$$L \propto F = a_0 + b_0 U \rightarrow L = a + b U. \quad (1)$$

A radiância L costuma ser espectral, em unidades $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{ster}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, e a voltagem (uma variável contínua) é discretizada em 2^n níveis; este critério permite transmitir a informação sobre U em termos de n bits (formato binário). A informação GOES, NOAA ou MSG tem $n=10$ bits (que descrevem números inteiros entre 0 e 1023: *counts* ou “níveis de cinza”). Assim, a eq. (1) pode ser pensada com U em termos de *counts*, sendo (a,b) os coeficientes de calibração do detector respectivo.

Os detectores expostos ao processo de lançamento, às condições do espaço interplanetário, à espera em órbita até habilitação operacional e ao próprio funcionamento contínuo sofrem degradação progressiva, de forma que os valores dos coeficientes na eq. (1) são variáveis no

tempo. Os canais termais têm um sistema de calibração interna (*onboard*) que permite uma correção contínua dos coeficientes de calibração. O procedimento baseia-se na exposição dos detectores à radiação de um corpo negro com temperatura conhecida, comparando-se seu sinal com a lei de Planck (Weinreb *et al.*, 1997). Este sistema não existe para os canais no espectro solar, para os quais a calibração publicada é a de pré-lançamento (ver por exemplo Weinreb *et al.*, 1999). Para atualizar os coeficientes de calibração, dois métodos usuais podem ser mencionados. O primeiro baseia-se na observação de alvos terrestres com refletância conhecida, podendo-se simular a radiância esperada para o detector e comparar com a radiância aparente medida, ou seja, realizando uma calibração vigária (¹) (Knapp e vonder Haar, 2000). O segundo, consiste da comparação com o sinal observado por outros satélites (Minnis *et al.* 2002, Nguyen *et al.*, 2004).

Neste trabalho apresentamos duas aplicações à calibração do canal VIS do GOES 10 Imager: uma calibração vigária simples e uma comparação com as radiâncias observadas pelo MSG.

2. Materiais e métodos

A descrição de operações dos satélites GOES pode ser encontrada na direção de internet <http://www.oso.noaa.gov/goes/>, e a do sensor Imager em especial, na página <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/imager.html> (acessada em: 02 novembro 2008). O GOES 10 foi originalmente utilizado como GOES-W (localizado sobre o Oceano Pacífico em 134°W), substituído pelo GOES 11 nessa posição, e re-posicionado em 60,405°W. Atualmente fornece arquivos dedicados à América do Sul (Imager a cada 15 minutos, e Sounder completando a varredura do continente a cada 4 horas). A órbita elíptica tem semi-eixo maior com $R_s = 42162,5$ km e excentricidade orbital de 0,000321 (dados orbitais em 29/10/2008). O GVAR informa os coeficientes de calibração *prelaunch* do canal VIS.

2.1. Um método simples de calibração vigária

O método usa o mesmo critério do aplicativo 6S (Vermote *et al.*, 1997), ilustrado na figura abaixo.

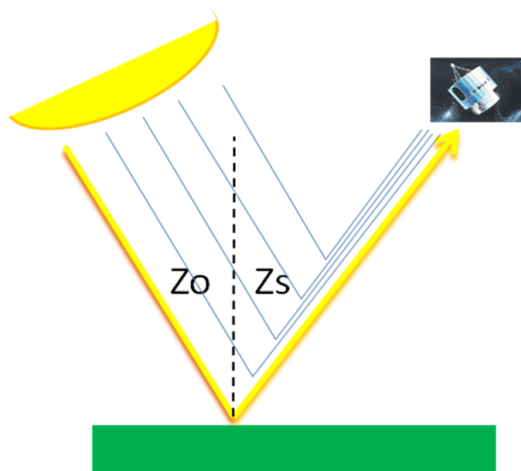


Figura 1: Aproximação de primeira ordem na composição de radiação refletida na atmosfera

Z_o = ângulo zenital dos raios solares
 Z_s = ângulo zenital de visada ao satélite
 R_s = refletância do solo
 τ = profundidade óptica da atmosfera

Amarelo: radiação direta, com reflexão no solo (componente de ordem 1)
Azul claro: raios com dispersão única por ar+aerossol (componente de ordem zero)

Uma aproximação de primeira ordem para a radiância L_s recebida pelo satélite (à esquerda) considera: 1) contribuição L_I , raios diretos incidindo no solo com reflexão lambertiana, mais

¹ Na literatura científica em inglês é usual a frase *vicarious calibration*. Sua tradução literal não é um anglicismo. Segundo o **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa** (2001) tem-se **Vigário: 1.** aquele que substitui outro; **2.** religioso que, investido dos poderes de outro, exerce em seu nome suas funções. Etimologia: do latim *vicarium*, 'o que faz as vezes de outro, substituto'.

propagação na direção do satélite; 2) contribuição L_o , raios diretos interagindo com a atmosfera na linha de visada ao satélite, e sendo dispersados na direção deste. O efeito (1) tende a diminuir o sinal por atenuação de raios diretos na atmosfera, tanto na propagação descendente e como na ascendente, enquanto que o efeito (2) tende a aumentar o “ruído” atmosférico por contribuição da radiação difusa produzida na atmosfera. Uma aproximação de segunda ordem incluiria a contribuição L_2 de raios diretos refletindo-se no solo na vizinhança do alvo, propagando-se em trajetória ascendente e sofrendo uma dispersão na linha de visada ao satélite. Quando a profundidade óptica da atmosfera não é elevada, a aproximação de primeira ordem fornece resultados de boa qualidade na simulação do sinal de satélite.

A componente L_o pode ser avaliada por integração das contribuições de cada espessura dz de atmosfera,

$$dF(dz) = \underline{S_o \lambda \cdot T(m_o, \tau')} \cdot \underline{dA} \cdot \kappa p \, ds \cdot (\omega/4\pi) \cdot \underline{P(\Theta)} \, d\Omega \cdot T(ms, \tau'), \quad (2)$$

onde o fluxo dF que chega em dz numa área dA perpendicular aos raios diretos (primeiro termo sublinhado) é atenuado por interação com a atmosfera (fração $\kappa p \, ds$) no trajeto $ds = m_o \cdot dz$; dessa energia, a expressão sublinhada a seguir expressa a fração dispersada dentro do ângulo sólido $d\Omega$ (²). Essa energia é transmitida (atenuando-se) até o topo da atmosfera. As funções $T(m, \tau') = \exp(-m\tau')$ expressam transmitâncias. A integração da eq. (2) na coluna atmosférica τ' : $(0, \tau)$ produz a estimativa de ordem zero

$$R_{po} = 1/4 \, \omega \, P(\Theta) \{1 - \exp[-(m_o + m_s) \tau]\} / (\mu_o + \mu_s). \quad (3)$$

A componente de radiância espectral L_I observada por um satélite com ângulo zenital Z_s ($\mu_s = \cos Z_s$, $m_s = \sec Z_s$) e com ângulo zenital solar Z_o ($\mu_o = \cos Z_o$, $m_o = \sec Z_o$) deve ser

$$L_I = S_o \lambda \, \mu_o \cdot T(\mu_o) \cdot (R_s/\pi) \cdot T(\mu_s), \quad (4)$$

onde T é a transmitância atmosférica, R_s a refletância do solo e o divisor π permite avaliar a radiância emergente sob hipótese de reflexão lambertiana. A refletância planetária medida é a soma das duas contribuições: $R_p = R_{po} + R_{pI}$. Dessa forma, a refletância da superfície R_s pode ser recuperada através do algoritmo seguinte (³):

$$R_{pI} = \pi L_I / \mu_o \cdot S_o \lambda = R_s \cdot T(\mu_o) \cdot T(\mu_s) \rightarrow R_s = (R_p - R_{po}) \exp[(m_o + m_s) \tau]. \quad (5)$$

Para aplicação do algoritmo, escolheu-se como alvo a área do Salar de Uyuni, na Bolívia, coordenadas aproximadas de 20°S 67°W e altitude de 3700 m (Figura 2). Trata-se de uma salineira (*salar*) com pelo menos 10 metros de espessura, 20000 km² de área e grande homogeneidade superficial, seco durante o inverno, com escassa nebulosidade, e com fator de refletância quase constante na faixa espectral do sensor VIS do GOES 10 (Lamparelli *et al.* 2003). Medições em junho de 1999 encontraram para a banda 3 do radiômetro CIMEL e do Landsat TM (0,67 μm) um valor típico de profundidade óptica $\tau = 0,077$ (particionado em 0,027 para dispersão Rayleigh e 0,051 para aerossol). As medições de fator de refletância em três locais do Salar forneceram os valores 0,76±0,08; 0,71±0,11; 0,69±0,17 (Ponzoni *et al.* 2004).

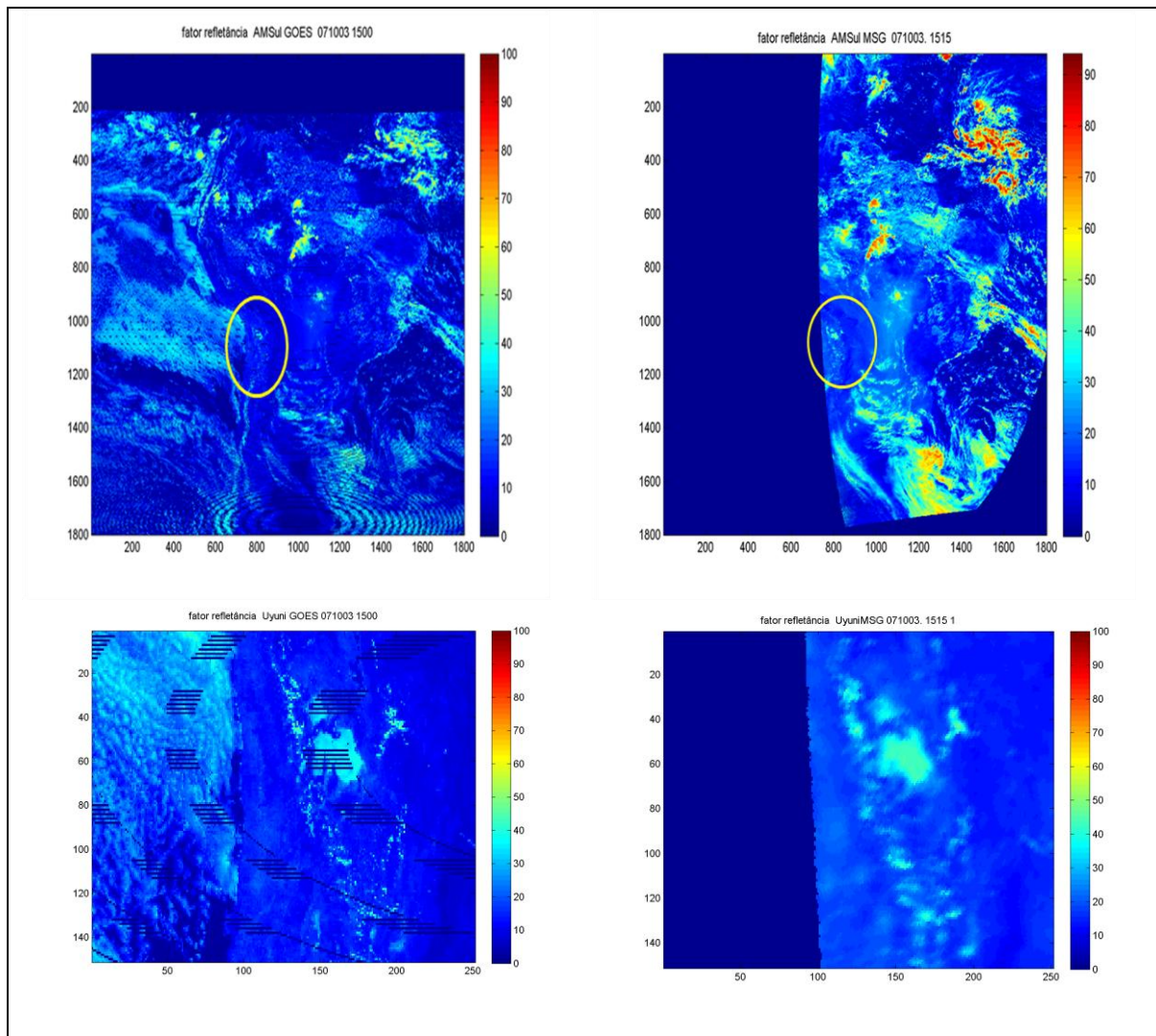
Os valores reduzidos de espessura óptica justificam o uso da aproximação de ordem 1. O cálculo de R_{po} com $\omega = 1$, $P(\Theta) = 1$, $\mu_s = 0,7$ e para o meio-dia local em junho ($Z_o \cong 40^\circ$, $\mu_o \cong 0,77$) fornece $R_{po} \cong 0,28$. Portanto, a correção de ordem zero é pequena e consideramos $\omega = P(\Theta) = 1$ no que segue.

² Aqui, ω é o albedo para dispersão simples (*single scattering albedo*), e $P(\Theta)$ a função de fase padronizada para ângulo de dispersão Θ .

³ Um fator de correção pode ser aplicado na expressão (3), associado à transmitância do ozônio no visível, aqui considerado $F_3 = 1$; assumindo uma aproximação de primeira ordem, também desprezamos outro fator associado a múltiplas reflexões no sistema Terra-atmosfera (Vermote *et al.* 1997).



Figure 2. Localização geográfica do Salar de Uyuni, no contexto das imagens do sensor CCD do satélite CBERS2. Imagens em “falsa cor”. Imagens obtidas na URL <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>



Figuras 3. Fatores de refletância fornecidos em 03/10/2008 15UTC para GOES 10 (esquerda) e MSG (direita). Projeção regular. Acima: América do Sul; abaixo: região do Salar de Uyuni.

As Figuras 3 ilustram os arquivos de fator de refletância de GOES e de MSG fornecidos pelo sistema de ingestão da DSA/CPTEC ⁽⁴⁾ em 03/10/2008 15 UTC. Percebe-se que os valores para GOES são inferiores que para MSG. A diferença se deve a degradação do GOES VIS e não a anisotropia da reflexão, já que o sistema convectivo no Atlântico, em longitudes do terceiro fuso horário, tem de fato geometria similar de ângulo entre incidência e reflexão de luz solar para GOES e MSG.

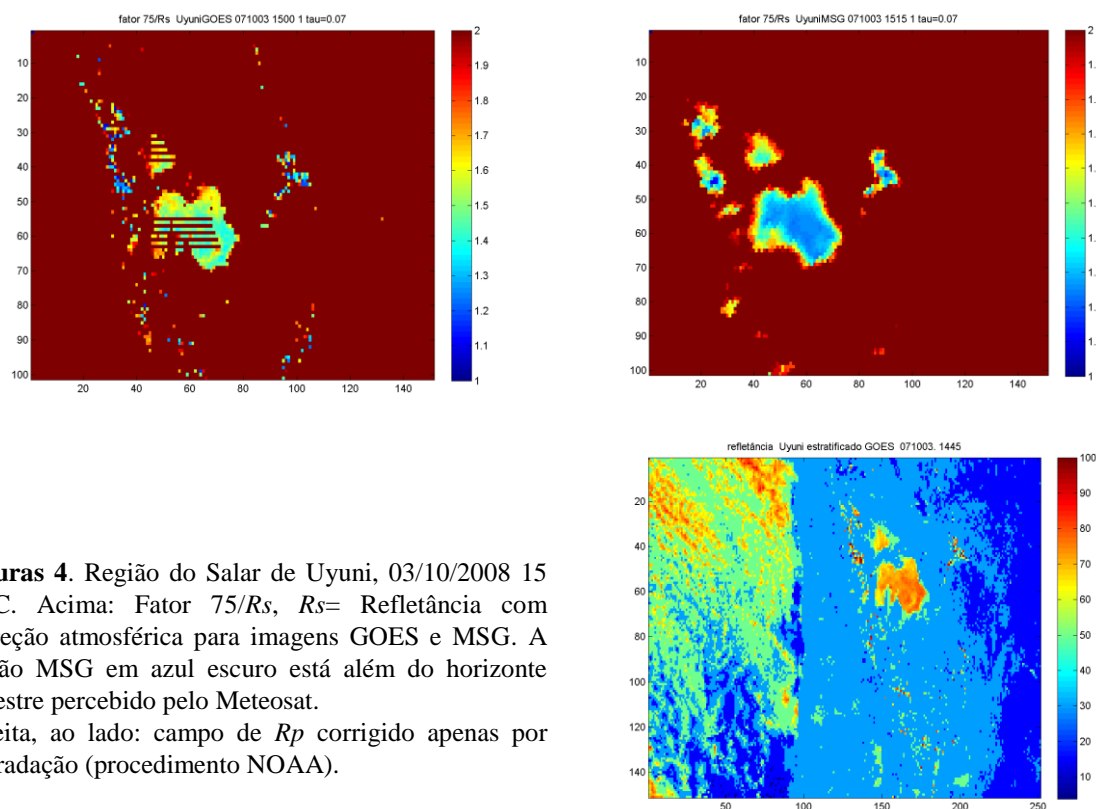
2.2. Um método estatístico de intercomparação

Apesar de sua homogeneidade espacial, as medições *in situ* da refletância do solo apresentam flutuações consideráveis (Ponzoni *et al.* 2004). Aliado a erros de navegação, este fato dificulta a intercomparação entre sinais de satélites. Por outro lado, GOES e MSG têm tamanhos de pixel diferentes (resolução 1 km no nadir com amostragem a cada 4 km, para GOES na DSA/CPTEC; 3 km para MSG). Ainda, a região de Uyuni encontra-se na borda de imagens MSG com deformação considerável da resolução e erros de navegação maiores.

Entretanto, pode-se esperar que médias estatísticas de sistemas não homogêneos apresentem valores semelhantes para diferentes satélites (desde que calibrados), e/ou ofereçam informação sobre fatores de escala que permitam unificar as propriedades estatísticas de dois diferentes sensores. Seguindo este raciocínio, foi escolhido o sistema convectivo observado na Figura 2, no Atlântico ao norte do litoral brasileiro, em longitude da ordem de 40°W. Foram construídas funções de distribuição de frequência acumulada do fator de refletância Fr GOES, $FDP(f * Fr)$ com a escala de Fr afetada por fatores f variados. Procurou-se o fator f que produzisse a menor distância euclidiana entre $FDP(f * Fr)$ e a $FDP(MSG)$.

3. Resultados

As figuras 4 são resultados da correção atmosférica proposta, e de representar o quociente $75/R_s$ (que pode ser interpretado como o fator de correção do sensor VIS no Salar de Uyuni).



Figuras 4. Região do Salar de Uyuni, 03/10/2008 15 UTC. Acima: Fator $75/R_s$, R_s = Refletância com correção atmosférica para imagens GOES e MSG. A região MSG em azul escuro está além do horizonte terrestre percebido pelo Meteosat. Direita, ao lado: campo de R_p corrigido apenas por degradação (procedimento NOAA).

⁴ Os arquivos são fornecidos em projeção satélite. A figura ilustra a projeção de cada pixel em projeção regular LAT/LON.

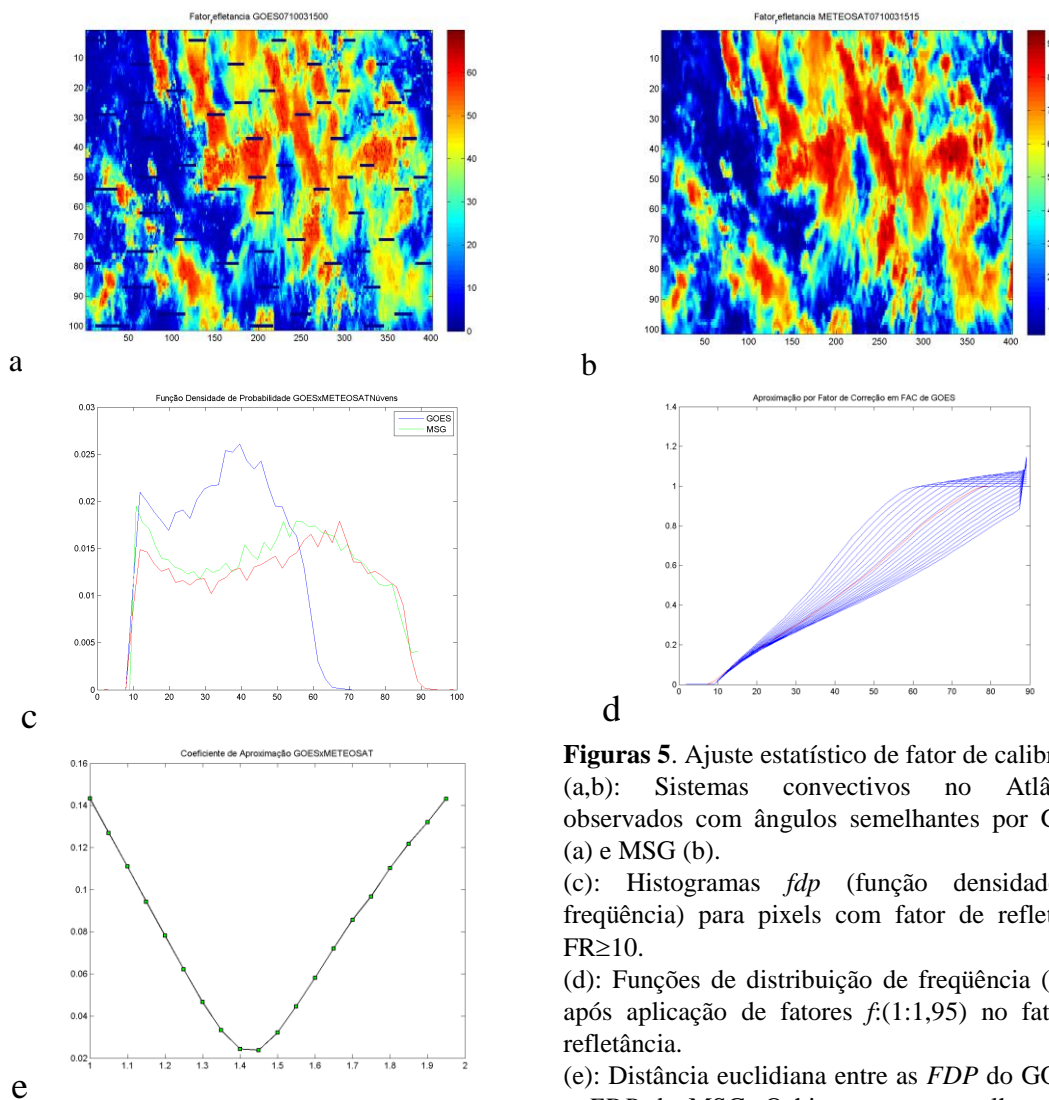
Anexo 01

Observa-se que o fator de correção para GOES dentro de Salar teria uma variabilidade espacial maior do que a esperada; considerando os locais de medição informados por Ponzoni et al. (2004), o fator K_{GOES} parece estar entre 1,5 e 1,6. Para o canal VIS do MSG, o fator seria da ordem de $K_{MSG}=1,3$. É interessante observar a coerência da imagem, apesar de situar-se na borda do campo de observação do Meteosat.

A figura apresenta também a refletância planetária R_p gerada como subproduto do Modelo GL de radiação solar (descrição e resultados do modelo na página internet <http://satellite.cptec.inpe.br/radiacao/>), a qual aplica correção por degradação utilizada na NOAA, segundo Chang *et al.* (página internet acessada em 2007). A imagem apresenta valores de R_p no Salar que são compatíveis com as medições *in situ*. O resultado geral é relativamente indefinido, e sugere realizar um número elevado de observações e sua estatística. As figuras 5 abaixo descrevem o ajuste estatístico entre a mesma cena em GOES e MSG. A vantagem do processo é que não precisa de uma correspondência explícita pixel-a-pixel ou de exatamente a mesma área. Na construção dos histogramas de frequência (c) são considerados pixels com nuvens, portanto um limiar de fator de refletância. A distância entre FDPs é avaliada segundo

$$\langle d^2 \rangle = \sum_{i=1, Nbins} [FDP(FR_i^*) - FDP(FR_i)]^2 / Nbins, \quad FR^* = f \cdot FR$$

$Nbins$ é o número de intervalos nos histogramas; o fator f gera uma nova escala de FR , com uma nova distribuição de frequências.



Figuras 5. Ajuste estatístico de fator de calibração. (a,b): Sistemas convectivos no Atlântico, observados com ângulos semelhantes por GOES (a) e MSG (b).

(c): Histogramas f_{dp} (função densidade de frequência) para pixels com fator de refletância $FR \geq 10$.

(d): Funções de distribuição de frequência (FDP) após aplicação de fatores $f:(1:1,95)$ no fator de refletância.

(e): Distância euclidiana entre as FDP do GOES e a FDP do MSG. O histograma vermelho em (c) corresponde à distância mínima (fator $f=1,45$)

Para outubro de 2008, o fator de ajuste entre as populações GOES e MSG é $K_{G-M} = 1,45$. O histograma resultante exibe excelente ajuste com o de MSG, de acordo com a figura (c). No método de calibração com alvo terrestre, tinha-se $K_{GOES}/K_{MSG} = 1,15-1,20$; todavia, as geometrias de visada ao alvo (Salar de Uyuni) eram muito diferentes e o resultado para MSG não confiável. Entretanto, o método estatístico produz resultados que sugerem alta confiabilidade para intercomparação. Nesse caso, $K_{GOES}/K_{G-M} = 1,03-1,10$ o que sugere uma considerável estabilidade do fator de calibração MSG.

4. Conclusões

Uma aproximação de primeira ordem permite aplicar algoritmo simples de correção atmosférica nos casos de profundidade óptica pequena. A comparação com dados de verdade terrestre indica que o fator de correção por degradação aplicável ao sensor GOES 10 VIS é da ordem de 1,50-1,60, compatível com correções aplicadas pela NOAA e pela NASA. O Salar de Uyuni aparece como um alvo excelente para calibração na banda visível.

Um método estadístico de ajuste fornece resultados extremamente coerentes na intercomparação de satélites. A aplicação a um sistema convectivo complexo indica que o coeficiente de correção do GOES relativo ao MSG é $K_{G-M} = 1,45$.

Estudos sistemáticos de comparação com alvo terrestre, assim como de intercomparação GOES-MSG e GOES-AVHRR são recomendados. O método estatístico pode manifestar-se de alta qualidade em intercomparações.

Reconhecimentos. O segundo autor é bolsista de iniciação científica do CNPq (programa PIBIC/INPE). O trabalho encontra-se no marco conceitual do projeto CNPq num.

Referências

Chang, I-Lok; Michael Weinreb, Charles Dean, David Crosby, Dejiang Han, Jeanette Baucom, Xiangqian Wu (2006). Vicarious Calibration of GOES Imager Visible Channel: Use of Stars for Responsivity Trending. URL <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/visible-channel.htm>

Knapp, K. R., and T. H. Vonder Haar. Calibration of the eighth Geostationary Observational Environmental Satellite (GOES-8) imager visible sensor. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 1639–1642, 2000.

Lamparelli, R.A.C., F.J. Ponzoni, J. Zullo Jr., G.Q. Pellegrino, Y. Arnaud. Characterization of the Salar de Uyuni for In-Orbit Satellite Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 41, 1461- 1468, 2003.

Minnis, P., L. Nguyen, D.R. Doelling, D.F. Young, W.F. Miller, D.P. Kratz. Rapid Calibration of Operational and Research Meteorological Satellite Imagers. Part I: Evaluation of Research Satellite Visible Channels as References. *J. of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 19, 1233-1249, 2002.

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

Ponzoni, F.J., J. Zullo Jr., R.A.C. Lamparelli, G.Q. Pellegrino. In-Flight Absolute Calibration of the Landsat-5 TM on the Test Site Salar de Uyuni. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 42, 2761- 2766, 2004.

Rao, C.R. Nagaraja (2001). Implementation of the post-launch vicarious calibration of the GOES imager visible channel. URL <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/vicariouscalibration.htm>

Anexo 01

Vermote, E.F., D. Tanré, J.L. Deuzé, M. Herman, J.J. Morcrette. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, V. 35, 675-686, 1997.

Weinreb, M.P., M. Jamison, N. Fulton, Y. Chen, J.X. Johnson, J. Bremer, C. Smith, and J. Baucom. Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and -9 imagers and sounders. *Applied Optics*, 36, pp 6895-6904, 1997.

_____ **Operational Calibration of the Imagers and Sounders on the GOES-8 and -9 Satellites.** NOAA Satellite and Information Service, Página internet NOAA <http://www.oso.noaa.gov/goes/goes-calibration/contents/page1.htm> [última revisão em 1997; acesso em outubro 2008].