



Relatório Técnico 01/11-RST-DSA

DESEMPENHO DO MODELO GL versão 1.2 época: outubro 2010 – dezembro 2010

Juan Carlos Ceballos, Marcos Lima Rodrigues, Leandro Macedo de Oliveira

Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA/CPTEC/INPE

Cachoeira Paulista, junho de 2011

Conteúdo

Diagnóstico de comportamento do modelo de estimativa de radiação solar GL1.2 no período 201010-201012. Fonte de dados: arquivos binários GOES 12 Imager, canal VIS. Comparação com dados de superfície fornecidos por várias redes de medição na América do Sul. Descreve-se a estrutura de dados e arquivos utilizados para realizar a comparação.

Sumário

- Antecedentes
- Seleção de dados para o período outubro-dezembro 2010
- Médias mensais das redes SCD e INMET
- Dispersão de valores diários GL × “rede de referência”
- Dependência da acurácia com a irradiância média diária
- Discussão de resultados e recomendações
- Referências bibliográficas
- Anexo: rede de locais com amostragem de GL

Antecedentes

O modelo GL foi desenhado para avaliar campos de radiação solar à superfície a partir de informações do canal VIS de satélites geostacionários. Na sua versão 1.2, o modelo roda operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE processando imagens GOES Imager desde 1998. A fonte de imagens atual é GOES 12, fornecendo arquivos da América do Sul em projeção satélite a cada 15 minutos com cobertura aproximada entre 77°S e 13°N, e entre 130°W e 10°W. O dado básico (*count*) é processado na DSA e fornecido em arquivos binários na forma de fator de refletância. Os arquivos originais do GOES VIS contêm 4×4= 16 pixels com resolução de 1 km, por cada pixel IR (canal 4, infravermelho térmico, resolução 4 km). O GL utiliza arquivos degradados com resolução de 1 pixel VIS (amostrado) por cada 1 pixel IR. A estrutura conceitual para o cálculo de radiação global à superfície está detalhada em Ceballos *et al.* (2004).

Os produtos básicos do modelo GL são: refletância planetária, irradiância VIS+UV à superfície e irradiância global à superfície, a cada 15 minutos. Os pixels são projetados em grade regular de $0,04^\circ$ de resolução, 1800×1800 pixels, origem a oeste em $-100^\circ = 100^\circ W$, origem ao sul em $-50^\circ = 50^\circ S$. A partir desses arquivos, no final do dia é avaliada a média diária de irradiância para cada pixel. É importante notar que uma imagem pode apresentar defeitos (ruídos) e ausência conseqüente de informação num pixel dado. A integral diária para ele é rejeitada se for verificado um intervalo com duração maior do que 3 horas entre duas informações sucessivas. Os produtos gerados são disseminados através da página Web do CPTEC correspondente à DSA, www.satelite.cptec.inpe.br → Radiação Solar e Terrestre ⁽¹⁾. Nessa página são disseminados arquivos (gráficos) da média diária UVVIS e Global para América do Sul, assim como da média mensal.

Arquivos GL binários dos produtos básicos (frequências de 15 ou 30 minutos, e médias diárias) estão armazenados em fita magnética e DVDs na DSA ⁽²⁾. Atualmente, a série temporal do modelo GL versão 1.2 se inicia em 1996 baseada em imagens GOES 8 da América do Sul amostrada em 512×512 pixels (Bottino e Villasboas, 2006), continuando em resolução completa (amostra em 4×4 pixels do arquivo VIS original) a partir de outubro 1998. Desde então, vários satélites GOES têm fornecido as imagens de base (GOES 12 desde abril 2003, GOES 10 desde abril 2007, GOES 13 durante um curto intervalo em 2010, e novamente GOES 12 até a época deste Relatório). Sendo que análises climatológicas podem ser realizadas usando séries com aceitável degradação espacial e temporal, foi gerada uma série constituída por médias temporais (5 dias) e espaciais ($0,4^\circ \times 0,4^\circ$) para os períodos 1996-2006 e 2006-2010. Os dois arquivos (matrizes com dimensões $180 \times 180 \times 801$ e $180 \times 180 \times \dots$ respectivamente) podem ser baixadas na página Web referida (ver Solar Global → Séries Históricas). Algumas aplicações podem ser vistas em Ceballos et al. (2005) e Ortega et al (2008).

Algumas análises do desempenho do modelo GL 1.2 por comparação com medições de superfície podem ser encontradas em Ceballos e Bottino (2004, 2006) para o Brasil, e em Ortega et al. (2008) para a região chilena (ver também página web da DSA, Radiação Solar e Terrestre). Pela sua estrutura conceitual, dois parâmetros principais podem afetar especialmente a qualidade dos resultados do GL: uma correta calibração do canal VIS, e uma estimativa correta da refletância de superfície. O sensor VIS exibe degradação progressiva, e a correção de sua calibração *count* → radiância tem sido variável, dependendo do satélite utilizado e da antiguidade do sensor VIS. A evolução da calibração e seus efeitos sobre o GL será objeto de outro relatório. Por outro lado, a refletância de superfície é considerada constante $R_s = 0,09$ no GL 1.2, o que não introduz erros importantes na estimativa GL na maior parte do território brasileiro e oceânico; entretanto, regiões da América do Sul com alta refletância superficial podem afetar negativamente os valores, já que induzem a presença (falsa) de nuvens no pixel considerado. Na presente análise é avaliada apenas a acurácia evidenciada pelo modelo GL1.2 GOES nos meses mais recentes ⁽³⁾. Sendo o primeiro de uma

¹ Acesso direto em <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>

² O acervo completo está sendo armazenado e organizado em um banco de dados que permitirá acessos mais ágeis a informações textuais e arquivos binários (Macedo e Ceballos 2010).

³ Desde o segundo semestre de 2010 rodam a versão 1.2 e uma versão 1.4 utilizando imagens SEVIRI/ch1 do satélite geoestacionário Meteosat. Comparação preliminar entre resultados GL1.2 GOES e MSG sugere uma identidade básica entre eles (Ceballos e Rodrigues 2010). Análise sistemática dos comportamentos de GL1.2 e GL1.4 nas bases GOES e MSG será objeto de relatórios posteriores. A disseminação de resultados deverá acontecer em 2011.

série sistemática, o relatório coloca ênfase especial na descrição dos critérios de amostragem, das fontes de dados e da filtragem primária de dados espúrios.

Seleção de dados para o período outubro-dezembro 2010

A fim de permitir a discussão da acurácia do modelo (especificamente, das irradiâncias diárias médias), as medições publicadas por diversas redes na América do Sul vêm sendo armazenadas. Reciprocamente, os valores de modelo para um conjunto de locais com dados reais ou potenciais são amostrados nos arquivos binários diários, segundo uma lista de referência de locais (denominada de ListaUnicaCompleta = LUC) e atualizada uma vez por mês. O resultado é o preenchimento de uma matriz de 3800 linhas por 36 colunas, de acordo com o padrão seguinte:

Tabela 1. Estrutura das planilhas com dados de radiação solar diária (colunas 1 a 36)

Coluna(s)	informação	descrição
1	ID	Número de identidade do local (29000 a 32799)
2	latitude	=-999 se indefinido
3	longitude	=-999 se indefinido
4	altitude	=-999 se não houver informação
5	dono	Rede específica de instrumentos, ou apenas país, =-999 se indefinido
6 a 36	dado	Irradiância média dos dias 1 a 31 do mês. Sem dado: = -999

Tabela 2. Redes de medição (locais com dados atuais ou futuros) – Lista LUC em 01/04/2011

dono	rede	IDs	nlocais	dono	rede	IDs	nlocais
1	Argentina	29000-29099	44	11	Guianas	29750-29799	-
2	Bolívia	29100-29149	7	12	Uruguai	29800-29849	9
3	Brasil	29150-29249	17	13	Venezuela	29850-29899	3
4	Chile	29250-29349	9	14	SolRad Net	29900-29949	10(+3)
5	Colômbia	29350-29499	69	15	SONDA	29950-29999	20
6	Equador	29500-29549	2	16	Simepar	30000-30099	38
7	-	29550-29599	-	17	PIRATA	30100-30199	47
8	Guiana Fr.	29600-29649	-	18	INMET	30200-30799	459
9	Paraguai	29650-29699	7	19	SCD - INPE	30800-32799	375
10	Peru	29502-29511	10				
10	Peru	29700-29749	50		total	29000-32799	1176

Notas. As 3 estações SolRad Net adicionais situam-se fora da América do Sul (Barcelona, Espanha; Kishinev, Moldova; Sede Boker, Israel; Nairobi, Quênia). Em 20110101 o número de pontos amostrados era 1130; até 20110401 a lista incluiu até 1176.

As matrizes de dados são gravadas como arquivos de texto, em dois tipos de planilha:

Planilhas de dados do modelo: TabGML.yymmг_UNICA.txt. A sequência yymm se refere a ano (por exemplo 0502== ano 2005, fevereiro). Os dados de modelo foram retirados da coleção de arquivos binários de GL diário, segundo a LUC de 20110228.

Planilhas de dados de superfície: ESTACAO_yyyymm_yyyymm.txt. A primeira sequência yyyymm indica ano-mês de dados, a segunda indica ano-mês de recopilação ou atualização. Os dados de superfície foram baixados da internet (redes SolRad Net e SONDA; Luján na Argentina). Dados do Uruguai foram cedidos pelo Instituto de Física, Univ. de la República.

Os dados do SCD/CPTEC eram retirados da página internet do CPTEC e atualmente do SINDA (Sistema Nacional de Dados Ambientais do CRN/INPE, também na página CPTEC). Irradiâncias horárias da rede INMET (estações automáticas) são integradas em um dia, a partir de dados BUFR recebidos no CPTEC e processados na DSA ⁽⁴⁾.

A filtragem de dados para fins de comparação entre modelo GL e verdade terrestre segue os critérios abaixo:

Dada a série de 31 dados possíveis por cada local amostrado e com dados de superfície,

- O valor de irradiância média no dia deve estar no intervalo $G:[30,400]$ $W.m^{-2}$.
- A diferença entre modelo GL e medida G no dia deve ser $|GL - G| < 100$ $W.m^{-2}$.
- Aplicados os dois filtros anteriores, o número de pares (GL, G) restantes no mês deve ser não inferior a 15.

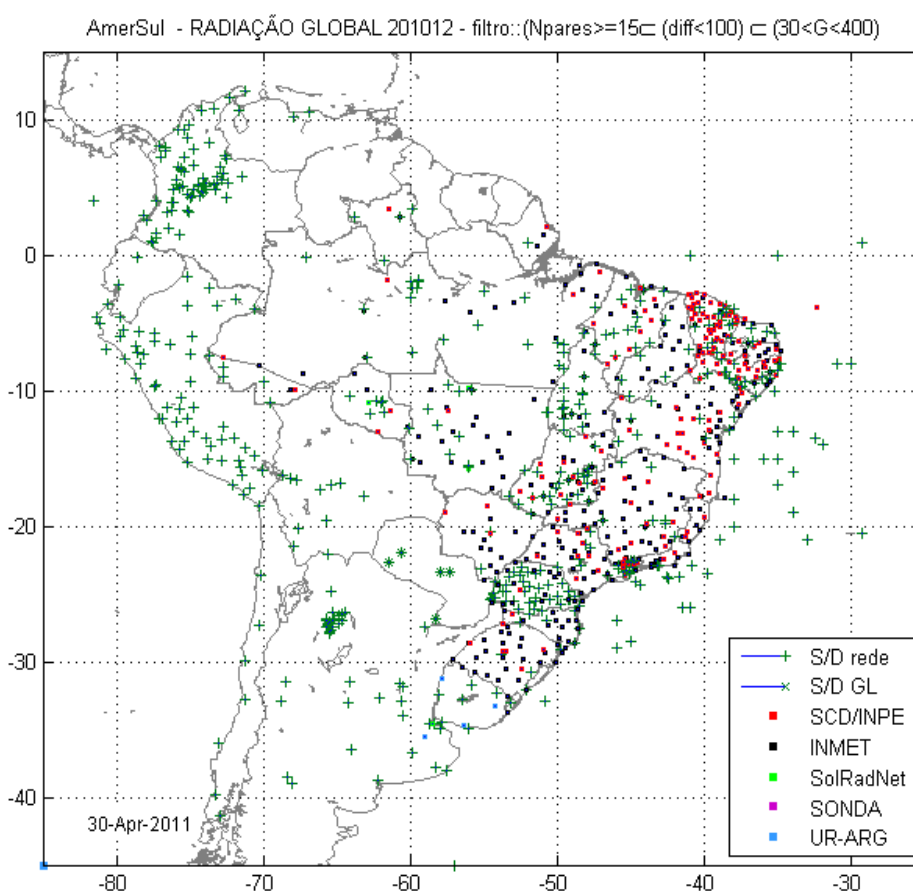
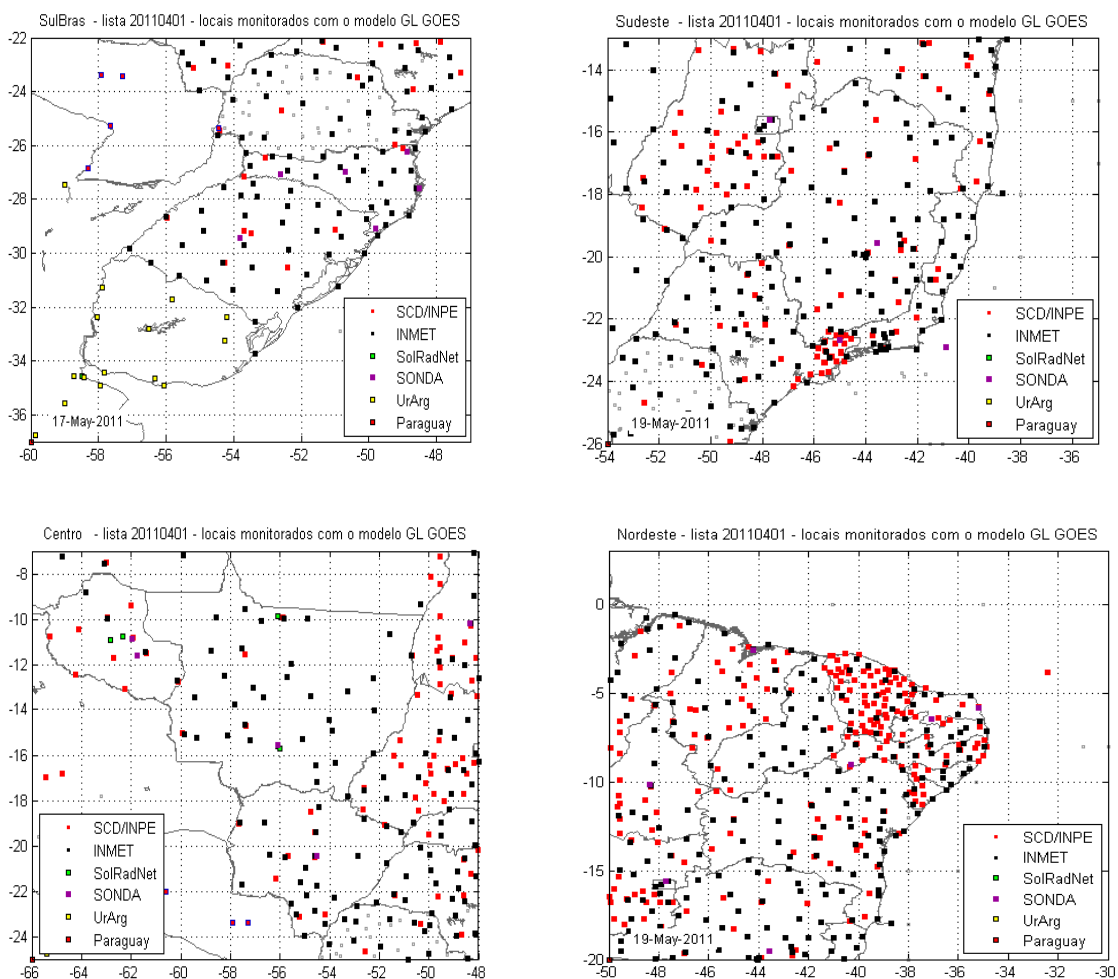


Figura 1. Distribuição de pontos amostrados sobre América do Sul e áreas oceânicas vizinhas em dezembro de 2010 (em torno de 1200 pontos), ilustrando resultados de uma filtragem primária. As cruzes indicam pixel não amostrado (\times) ou indisponibilidade atual de dado G de superfície ($+$). Para os pontos com pares modelo/superfície de dados foi aplicado um filtro primário (indicado no cabeçalho da figura, e explicado no texto do relatório).

⁴ O fluxo de dados BUFR (horário) atualmente é contínuo, mas a emissão de dados ainda está sujeita a falhas que podem ter impacto negativo significativo nas integrações diárias de irradiância solar. Como medida de cautela, a partir de janeiro de 2011 os dados horários de um conjunto seletivo de estações são baixados mensalmente da página Web do INMET.

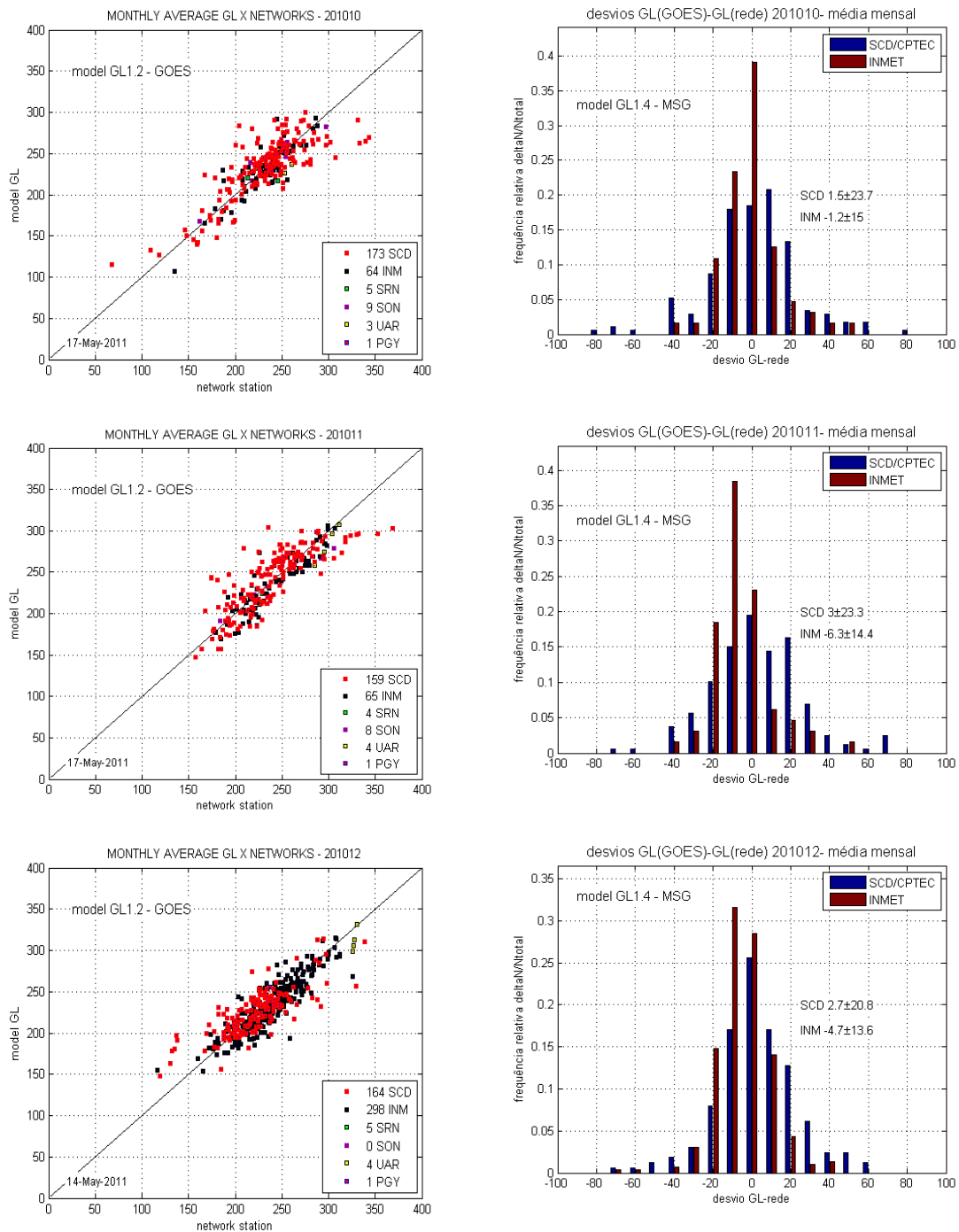


Figuras 2. Recortes ampliados da área brasileira. **Sul** inclui locais de Paraguai, Uruguai e Argentina, com dados de superfície, e uma de SONDA. **Sudeste** inclui uma estação SONDA. **Centro** inclui 2 SONDA e 3 SolRad Net. **Nordeste** inclui pelo menos 2 SONDA.

A **figura 1** ilustra a distribuição de locais aceitos pelo filtro na América do Sul, mês 201012. As cruzes verdes indicam locais sem dados (seja de satélite \times , seja de verdade terrestre $+$). A lista de locais de referência (LUC) corresponde à atualização de 20110401.

As **figuras 2** são recortes ampliados da figura 1, ilustrando os pontos amostrados para quatro regiões do Brasil. Em 2010 não tínhamos dados da rede SIMEPAR, do Paraná, nem das bóias oceânicas do programa PIRATA. O número de estações das redes INMET e SCD é elevado (mais de 800 pontos). Todavia, apesar de sua qualidade aceitável os instrumentos LiCor utilizados teriam acurácia inferior à das redes SONDA e SolRad Net, e à dos instrumentos utilizados no Uruguai, Paraguai e Argentina (Luján). Ainda, 1) os dados BUFR do INMET têm alguma instabilidade na frequência de fornecimento; 2) os instrumentos da rede SCD têm vários anos desde sua instalação (em numerosos casos, pode ser uma década ou mais) e não foram objeto de controle de calibração. Assim, apenas suas médias mensais foram comparadas com as do modelo GL.

Médias mensais das estações SCD e INMET



Figuras 3. Comparação das médias mensais de irradiância entre o modelo GL e as redes INMET e SCD.

As **figuras 3** ilustram o resultado para as estações na América do Sul. As figuras à esquerda evidenciam que, para médias mensais, entre o modelo GL e as estações SCD e INMET existe uma linearidade genérica. Por outro lado, os desvios entre modelo e medida são menores para baixa nebulosidade (valores mais elevados de GL) e para dias com nebulosidade elevada (valores mínimos de GL). É fato que nem todas as estações têm o mesmo comportamento

estatístico (algumas delas apresentam desvios fora do padrão genérico, e são listadas na **tabela 4**; identificação geográfica de IDs encontra-se no anexo). Os histogramas dos desvios (à direita) mostram máximos (ou seja, frequência maior) no intervalo (-10 +10) W.m². Na **tabela 3** são mostrados resumos estatísticos da população de desvios.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos associados à média mensal de GL (especificamente, seu desvio com relação a uma rede). N= número de estações; med= média geral dos desvios; dpp= desvio padrão da população de desvios; dpm= dpp/ \sqrt{N} = desvio padrão estimado para a média da população.

	outubro				novembro				dezembro			
	N	med	dpp	dpm	N	med	dpp	dpm	N	med	dpp	dpm
SCD	173	1,5	24	1,8	159	3	23	1,8	164	2,7	21	1,6
INMET	64	-1,2	15	1,9	65	-6,3	14	1,8	298	-4,7	14	0,8

A tabela 3 sugere que existe uma diferença de calibração entre as estações SCDE e as INMET. Observa-se que a média geral nos meses outubro-dezembro está dentro de [1,5 3,0] para SCD, e dentro de [-7 -1] para INMET. Por outro lado, as estações das duas redes encontram-se espalhadas de forma semelhante no país, e deveria esperar-se que as médias regionais das duas redes sejam idênticas (ou não separáveis estatisticamente). Entretanto, o desvio padrão (dpp) dos desvios mensais GL-SCD tem valores dpp \approx 23, e aqueles GL-INMET valem dpp \approx 14; assim, a dispersão esperável dessa média geral é da ordem dpm= dpp/ $N^{1/2} \approx 1,8$ nos dois casos. Conclui-se que:

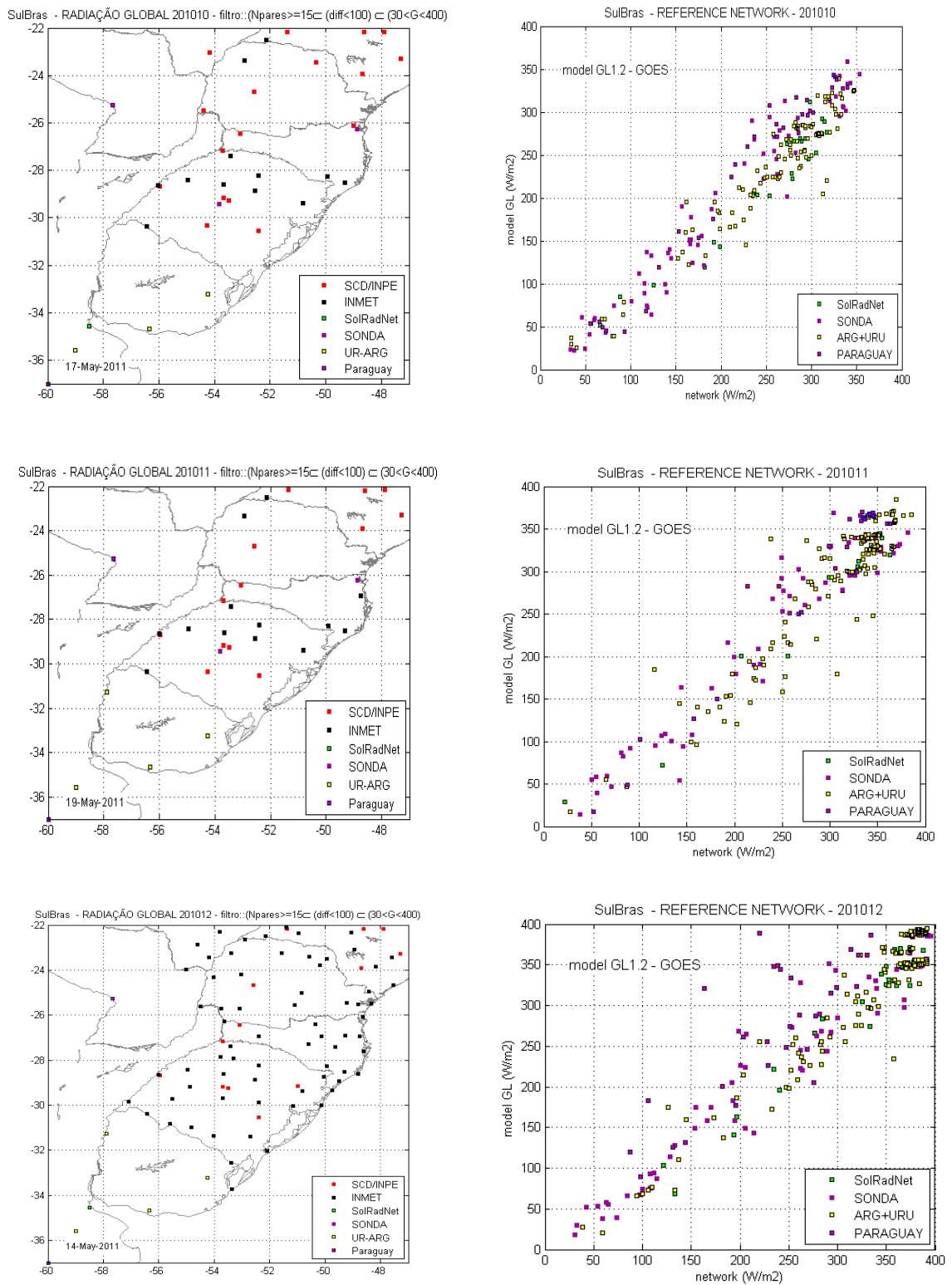
1. Pelo menos em novembro e dezembro, existe uma diferença significativa entre as médias gerais de GL-SCD e de GL-INMET; com efeito, a separação entre elas é maior que duas vezes dpm. Em outubro, a separação já é maior do que uma vez dpm.
2. A média geral de GL-SCD é positiva e a de GL-INMET negativa. Este fato indicaria que os solarímetros SCD têm degradação maior do que os INMET.
3. Genericamente, o modelo GL fornece valores médios intermediários entre SCD e INMET.

Estes resultados sugerem que o erro médio geral do GL está no intervalo [-10 +10] W.m² mas não quantificam o erro absoluto do modelo. Para isso, as redes de piranômetros de precisão: 1 (apenas Luján) , 9 (apenas Asunción), 12, 14 e 15, serão consideradas de referência.

Tabela 4. Estações INMET e SCD com desvio mensal maior que 2*dpp; z=desvio normalizado

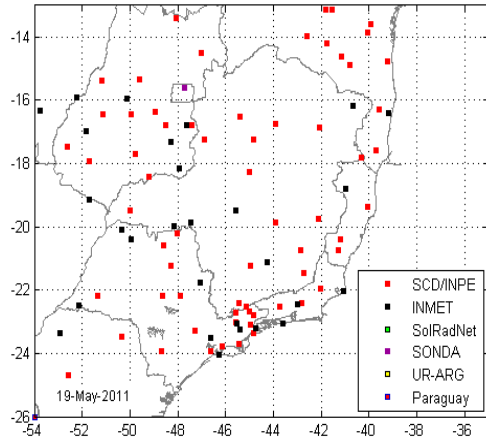
outubro 2010				novembro 2010				dezembro 2010			
ID	z	ID	z	ID	z	ID	z	ID	z	ID	z
30304	2.94	31828	2.04	30202	3.76	31818	2.89	30214	3.16	31833	2.56
30461	2.18	31926	2.33	40461	2.41	31828	2.21	30346	2.75	31836	2.09
30521	-2.50	32033	-3.05	30482	2.43	31833	2.83	30382	-2.23	31928	-2.05
30597	3.26	32285	-3.14	30597	2.9	31836	2.87	30439	2.97	31858	-2.06
		32324	2.49			31858	2.44	30482	2.19	32285	-2.92
		32579	3.33			31920	-1.89	30504	-3.92	32322	2.80
						32025	-2.53	30505	3.17	32325	2.20
						32579	2.79	30574	2.16	32328	2.12
								30597	3.42	32475	-2.41
										32579	2.48

Dispersão de valores GL × “rede de referência”

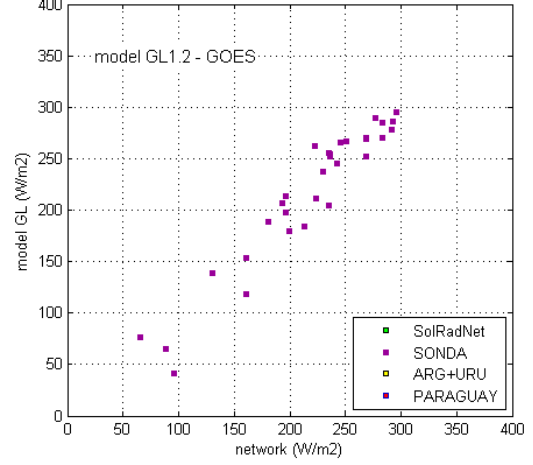


Figuras 4. Região Sul + Uruguay, Argentina, Paraguai, meses outubro-dezembro de 2010. A região dispõe de dados SolRad Net, SONDA, e piranômetros de Argentina, Uruguai e Paraguai. Representadas apenas as estações aprovadas pelo filtro ($N_{pares} \geq 15 \cap (|GL - \text{estação}| < 100) \cap (30 < G < 400)$). Observa-se razoável linearidade.

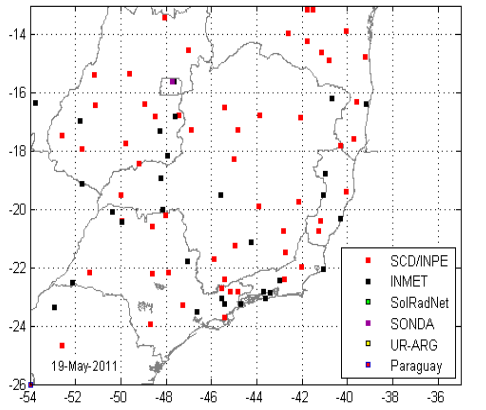
Sudeste - RADIAÇÃO GLOBAL 201010 - filtro: (Npares>=15 & (diff<100) & (30<G<400))



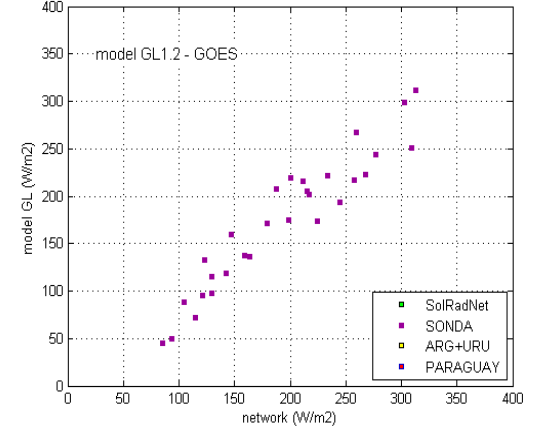
Sudeste - REFERENCE NETWORK - 201010



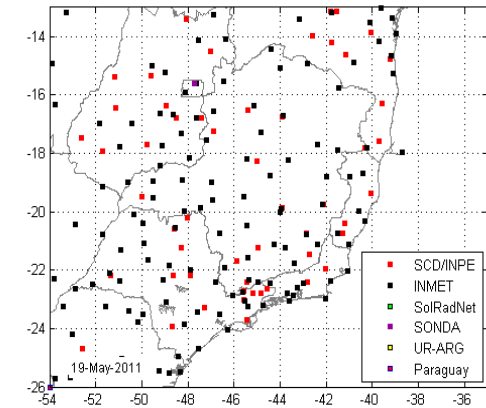
Sudeste - RADIAÇÃO GLOBAL 201011 - filtro: (Npares>=15 & (diff<100) & (30<G<400))



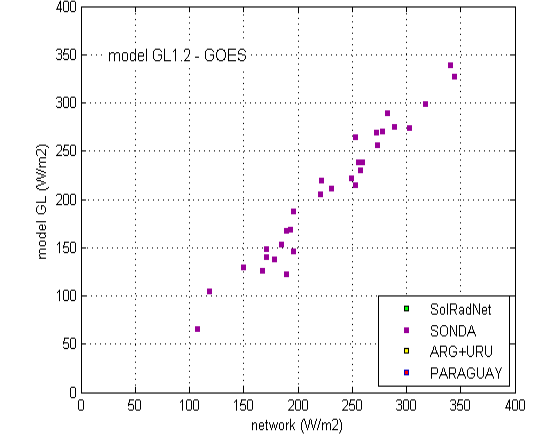
Sudeste - REFERENCE NETWORK - 201011



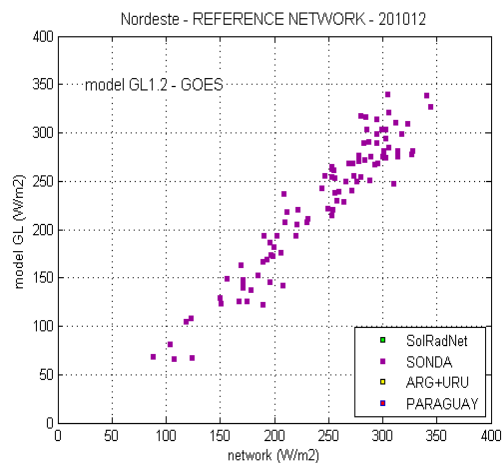
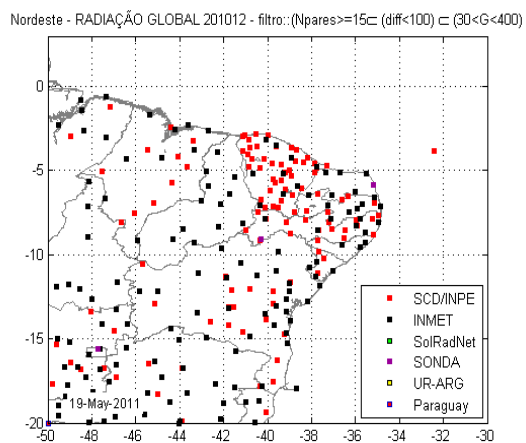
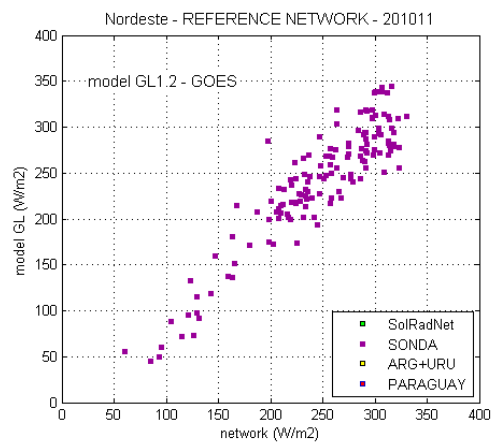
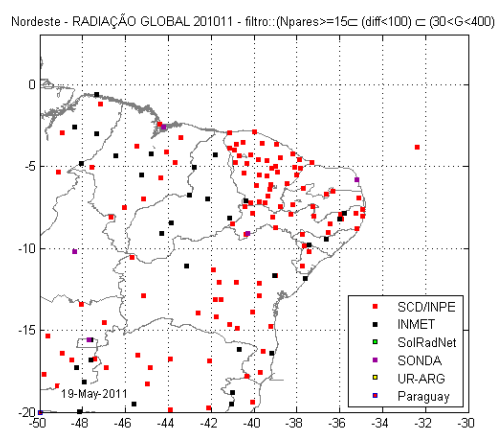
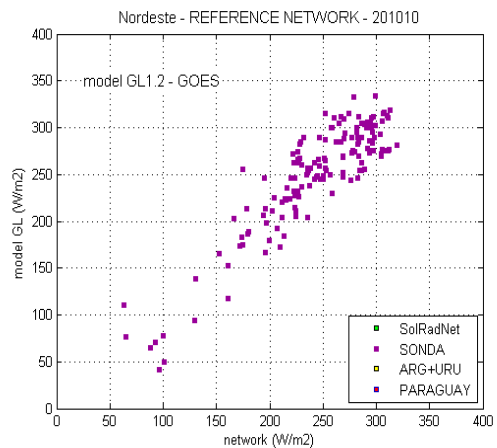
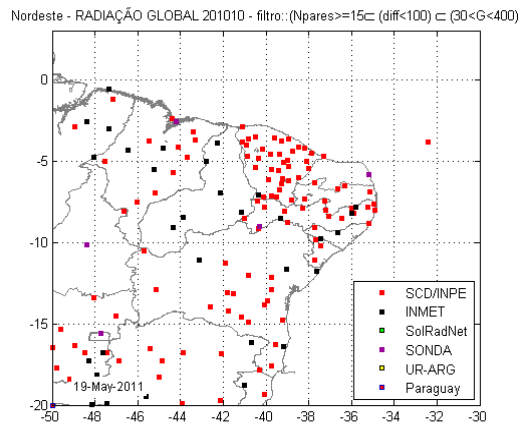
Sudeste - RADIAÇÃO GLOBAL 201012 - filtro: (Npares>=15 & (diff<100) & (30<G<400))



Sudeste - REFERENCE NETWORK - 201012

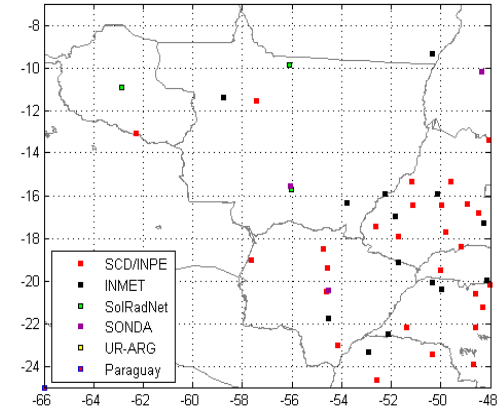


Figuras 5. Região Sudeste. Apenas uma estação de referência, da rede SONDA (em Brasília). Observe-se uma razoável linearidade, mas a comparação com Brasília pode não ser representativa da região no seu conjunto.

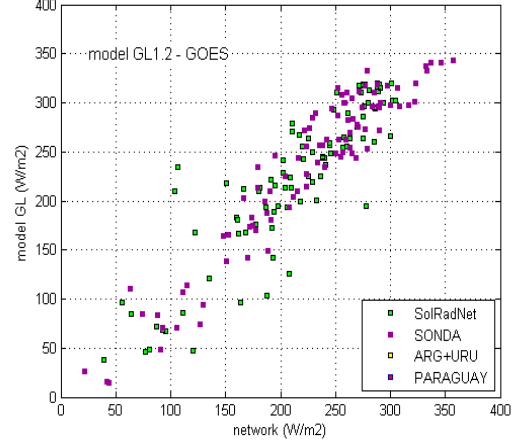


Figuras 6. Região Nordeste. Duas estações SONDA (Brasília e Petrolina). Existe linearidade geral razoável, mas observa-se uma dispersão relativamente elevada para $G > 250 \text{ W.m}^{-2}$

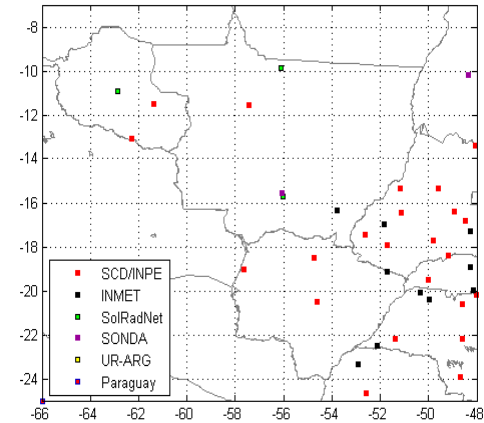
Centro - RADIAÇÃO GLOBAL 201010 - filtro: (Npares>=15) & (diff<100) & (30<G<400)



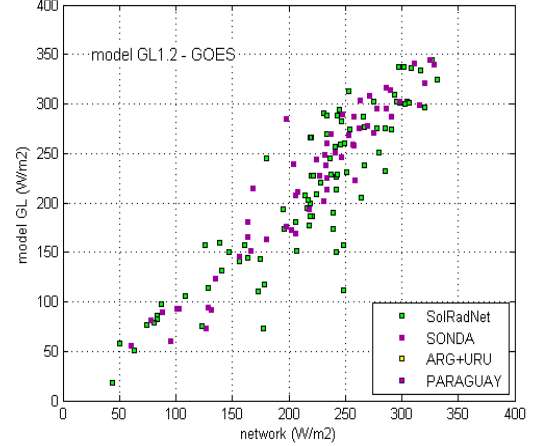
Centro - REFERENCE NETWORK - 201010



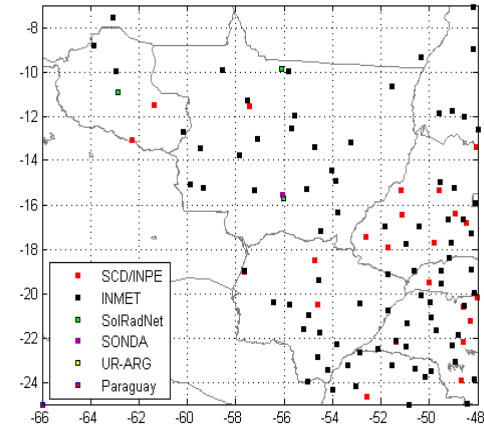
Centro - RADIAÇÃO GLOBAL 201011 - filtro: (Npares>=15) & (diff<100) & (30<G<400)



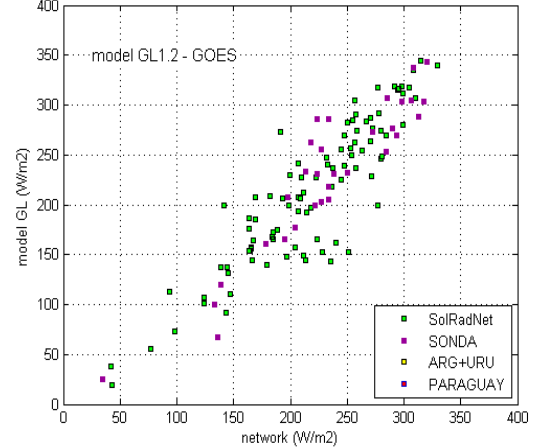
Centro - REFERENCE NETWORK - 201011



Centro - RADIAÇÃO GLOBAL 201012 - filtro: (Npares>=15) & (diff<100) & (30<G<400)

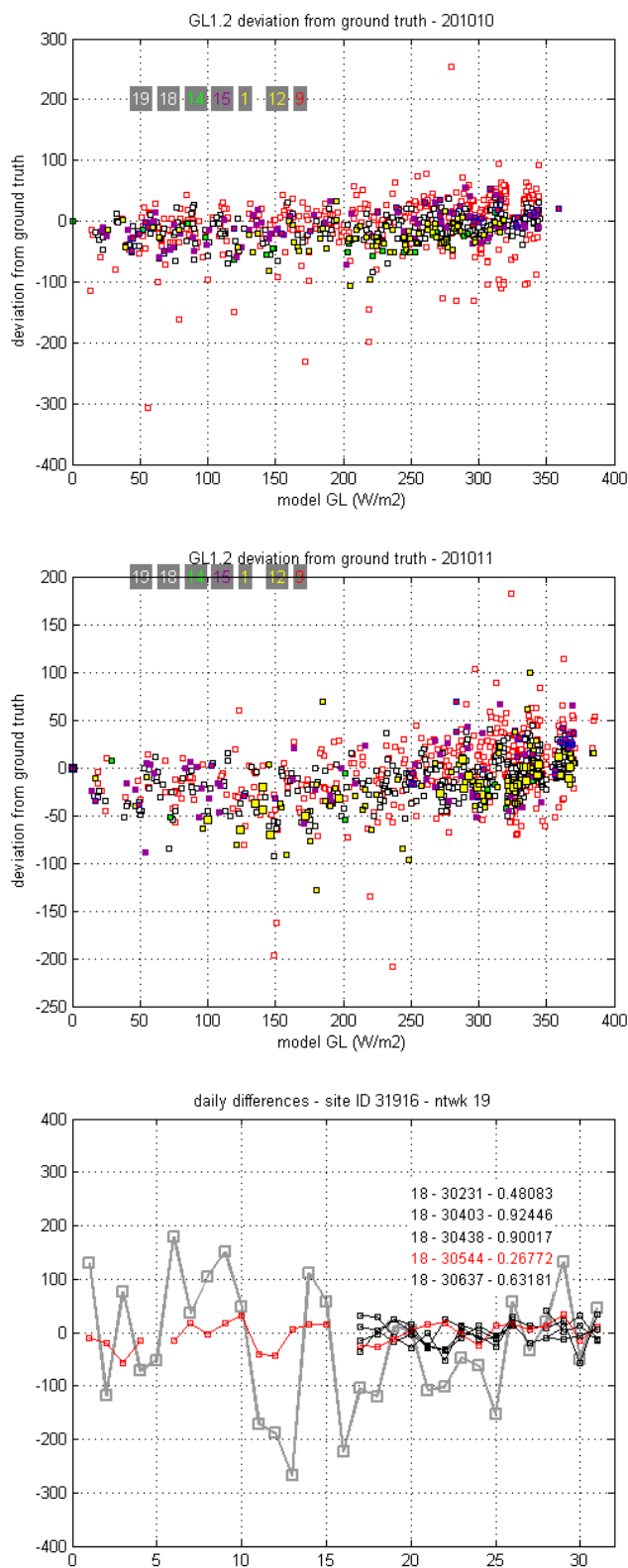


Centro - REFERENCE NETWORK - 201012



Figuras 7. Região Centro-Oeste. Existem estações das redes SolRad Net e SONDA. Observa-se linearidade geral, mas também dispersão maior comparada com a de outras regiões.

Nas figuras 4 a 7, o modelo GL reproduz valores diários com razoável linearidade. Entretanto, o desvio de GL com relação a medidas parece variável com o valor medido G.



Figuras 8. Desvios do modelo GL com relação à medição de superfície (região Sul), 201010 e 201011. Na sequência inferior, 31 dias da estação 31916 são comparados com os de outras estações dentro de 1° de distância.

Dependência da acurácia com a irradiação média diária. Isto é: o “erro” do modelo é independente da rede, e do valor de GL?

As figuras ao lado ilustram o desvio do modelo com relação aos valores da rede na região Sul, em função dos valores do modelo GL. Os números sobre fundo cinzento indicam a rede (de acordo com a numeração da **Tabela 2**, variável *done*). Estão incluídas todas as redes disponíveis em 201010 e 201011, somando em torno de 110 estações na região. Foram eliminadas estações com comportamento irregular, comparando com as flutuações de estações dentro de um grau geográfico de distância. (em unidades de arco de meridiano, 1°≈110 km). Essa distância foi avaliada segundo

$$d^2 = \delta lat^2 + \cos^2(lat) * \delta lon^2 < 1$$

Esta expressão é aceitável para distâncias de 1°, para as quais a curvatura da esfera terrestre pode ser desprezada (na equação aplicou-se o teorema de Pitágoras para a distância entre dois pontos, caracterizada pela composição de um segmento de arco de meridiano e outro de paralelo; este é variável com a latitude). A terceira figura ilustra os desvios em 31 dias da estação 31916 (rede SCD, linhas cinzentas), comparados com os de 5 estações a menos de 1°; a sequência vermelha 30544 corresponde a menos de 0,3° (aprox. 30km). Obviamente, o local 31916 exibe flutuações bem maiores que o 30544 (e este mantém coerência com os sítios vizinhos, sequências em preto). Assim, as flutuações são atribuíveis à estação 31916.

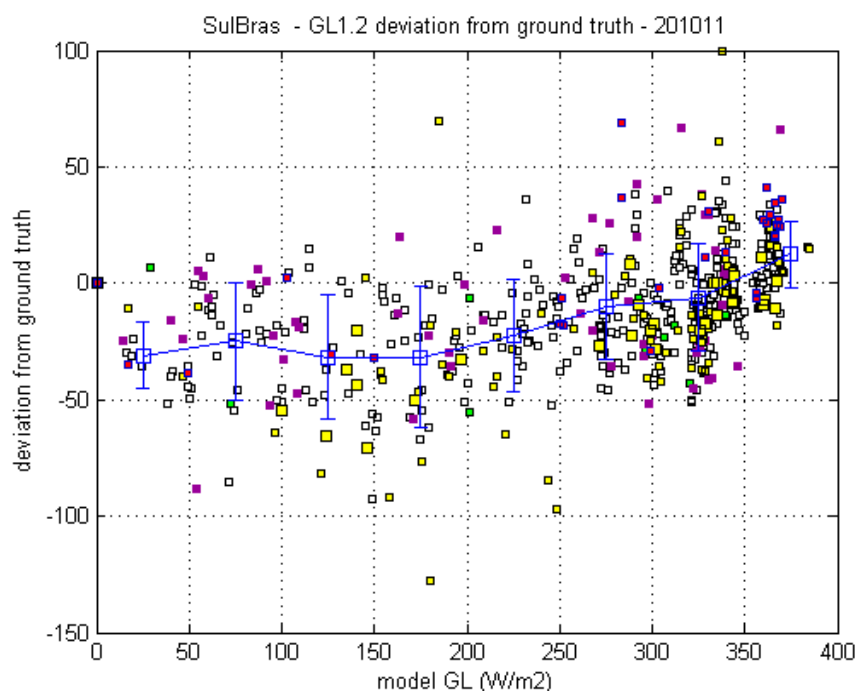


Figura 9. Variação do desvio GL(estimado) – G(medido), em $W.m^{-2}$, com o valor de GL. Região: Sul, mês 201011. Estão incluídas apenas estações INMET, SolRad Net, SONDA, Argentina, Uruguai, Paraguai. Foram considerados intervalos de $50 W.m^{-2}$; indica-se média e desvio padrão observados em cada intervalo.

É interessante notar que menos de 5 locais exibiram grandes desvios. Comportamento semelhante foi encontrado para as outras regiões. Coerentemente com a **tabela 4**, não mais de 20 estações podem ter sido descartadas em cada mês.

As **figuras 8** sugerem que os desvios do modelo com relação às medidas de superfície (“verdade terrestre”) dependem do valor de GL. Em princípio, os erros menores se registram para situações meteorologicamente homogêneas, correspondentes ao máximo e mínimo de G: céu claro e céu totalmente coberto. Foram avaliados os desvios $\delta G = GL - G(\text{medido})$ para as quatro regiões consideradas, incluindo apenas as redes INMET, SolRad Net, SONDA, UAR, PGY. A exclusão da rede SCD deveu-se à maior dispersão apresentada ao se considerar valores diários de GL (a **tabela 3** já permitia esperar esse comportamento). A figura 9 abaixo apresenta os desvios δGL observados na região Sul, 201011. Foram considerados intervalos de GL de $50 W.m^{-2}$, e avaliados a média e desvio padrão de δGL . Este procedimento permite equalizar, para fins estatísticos, a importância de cada intervalo. Note-se que a figura 9 é equivalente à segunda das **figuras 4**, na qual o comportamento da dispersão parece absolutamente linear e afetado apenas pela dispersão dos pontos.

A **tabela 5** resume os resultados para cada mês e região. No caso da região Centro-Oeste, foi registrado também o resultado de excluir a rede INMET. Observa-se que o erro $\langle \delta GL \rangle$ tende a ser deslocado (é adicionado um termo positivo, o que não necessariamente aumenta o desvio absoluto), enquanto o desvio padrão das estimativas ($dp\delta GL$) cresce um pouco mas conserva a mesma ordem de valores. O fato sugere que a rede INMET apresenta valores médios sistematicamente inferiores à “rede de referência” escolhida. Se o valor médio $\langle \delta GL \rangle$

for escolhido como indicador estatístico de uma correção a ser aplicada ao modelo GL, o desvio padrão associado resulta $dp\delta GL/\sqrt{N} \sim 4-9 \text{ W.m}^{-2}$ (N = número de pontos no intervalo de GL).

Tabela 5. Média e desvio padrão do desvio δGL ($\langle \delta GL \rangle \pm dp\delta GL$) apresentados pelo modelo para diferentes intervalos de GL, em quatro regiões. Redes: INMET, SolRad Net, SONDA, Argentina, Uruguai, Paraguai. No caso da região Centro-Oeste, avalia-se o resultado de eliminar a rede INMET; Erro média indica a média $\langle \delta GL \rangle$ e o desvio padrão dessa estimativa ($dp\delta GL/\sqrt{N}$).

Região	mês	0-50	50-100	100-150	150-200	200-250	250-300	300-350	350-400
Sul	201010	-24±17	-19±23	-25±24	-12±23	-25±26	-10±20	0±18	20
	201011	-31±14	-25±25	-32±27	-32±30	-22±24	-10±22	-6±23	12±14
	201012	-35±19	-32±20	-27±25	-22±25	-12±25	-2±26	4±30	14±27
Sudeste	201010	-32±19	-21±25	-24±24	-15±24	-7±22	6±22	12±17	
	201011	-36±16	-32±20	-29±22	-21±24	14±18	-1±23	9±20	27±15
	201012	-38±14	-37±22	-29±26	-20±26	-9±25	0±26	11±6	26±19
Centro	201010	-23±23	-16±23	-15±29	-5±25	12±31	14±26	19±22	
	201011	-29±8	-27±28	-29±29	-14±23	-10±20	7±24	8±19	21±9
Sem INMET			-18±29	-36±41	-23±28	-5±26	18±25	19±17	
Erro media			-18±7	-36±11	-23±6	-5±5	18±4	19±4	
	201012	-32±14	-30±25	-25±25	-16±26	-6±24	7±26	19±23	29±21
Sem INMET		-12±10	-40±20	-31±29	-21±34	-3±22	12±28	18±15	
Erro media		-12±6	-40±9	-31±8	-21±6	-3±4	12±5	18±4	
Nordeste	201010	-41±15	-20±23	-24±27	-13±22	2±22	7±23	17±18	
	201011	-37±9	-33±17	-25±18	-19±23	-9±22	0±25	12±19	27±8
	201012	-41±15	-34±23	-29±24	-17±27	-5±26	4±25	11±22	21±16

Discussão de resultados e recomendações

Com base nos resultados descritos até aqui, podem ser enumerados vários comportamentos sistemáticos do modelo GL:

- **Primeiro comportamento.** Para o extremo superior de GL, o erro médio δGL é da ordem de +12 a +27 W.m^{-2} , para todas as regiões. Isto representa +5% de erro no intervalo 350-400 W.m^{-2} ; se a origem do erro se encontra em hipóteses associadas a céu claro a influência pode propagar-se ao intervalo 300-350 (com escassa nebulosidade).

Um erro em condições de céu claro pode ser gerado pela estrutura simplificada do modelo GL para água precipitável, considerada constante sobre extensas regiões (3,5 g.cm^{-2} ao sul de 20°S, 4,5 g.cm^{-2} ao norte dessa latitude). A irradiância no infravermelho é avaliada como

$$E_{IV} = \mu_0 [S_{IV} - \Delta S_{IV}(m_0 w_2) - \Delta S_{IV}(w_{CO_2}, m_0)]. (1 - C)/(1 - C R_{IV} R_{nuv}),$$

sendo S_{IV} = constante solar no IV para a época considerada; $\mu_0 = \cos Z_0 = 1/m_0$; w_2 = água precipitável; w_{CO_2} = coluna de CO_2 ; ΔS_{IV} = absorção do fluxo inicial S; C = nebulosidade (na escala de um pixel); R_{IV} e R_{nuv} representam refletância do solo no IV e da base de nuvem. Para céu claro, C=0. Uma correção pode ser obtida monitorando o regime sazonal da água precipitável, e revisando as parametrizações utilizadas para estimar a absorção pelo vapor d'água e dióxido de carbono. As atuais utilizam expressões desenvolvidas por Ceballos e Fattori (1986), baseadas em medições publicadas por Howard et al. (1956).

Também no extremo superior de GL, o albedo da superfície no intervalo VIS pode introduzir erros, desde que é considerado genericamente constante $R_{VIS} = 0,09$ e a irradiância é estimada como

$$E_{VIS} = \mu_0 S_{VIS} (1 - R_p) / (1 - R_{VIS}),$$

sendo S_{VIS} a constante solar para o intervalo VIS (na época escolhida); R_p = refletância observada no canal GOES VIS; R_{VIS} = refletância do solo no intervalo VIS = 0,09. A expressão provém de supor uma atmosfera não absorvente no visível, para a qual registra-se um simples balanço de radiação. Quando são observados valores $R_p < 0,09$ adota-se uma variante do modelo de Lacis & Hansen para estimar E_{VIS} (Ceballos, 2000). Entretanto, existe uma distribuição regional e variações sazonais de R_{VIS} . Exemplos óbvios: para o oceano, certamente $R_{VIS} < 0,09$ e no semi-árido nordestino pode ser $R_{VIS} > 0,09$ na época seca; ainda, o Salar de Uyuni no planalto boliviano aparecerá continuamente nublado. Se o valor adotado para R_{VIS} é maior que o valor real, é gerado um erro $\delta GL > 0$. Esta observação sugere considerar distribuições regionais para R_{VIS} , com variações sazonais monitoradas.

Não consideramos aqui outras fontes de erro, como a refletância não isotrópica de algumas superfícies, ou as propriedades de absorção do aerossol local (supõe-se uma carga de aerossol normal, não superior a $\tau_{aer}(0,55 \mu m) \leq 0,2$).

- **Segundo comportamento.** Para os valores inferiores de GL o desvio $\langle \delta GL \rangle$ é sistematicamente negativo, da ordem de -20 a -40 W.m⁻².

Neste caso, descarta-se um efeito devido ao vapor d'água ou cobertura nubosa (as condições são de cobertura completa). Pelo menos três fatores podem ser apontados: 1) a calibração do canal VIS tem erros; 2) a refletância para cobertura completa não é isotrópica; 3) a cobertura pode ser completa mas as condições não são homogêneas: existem, por exemplo, torres com ocultamento parcial entre elas e efeitos de refletância lateral. Em particular, os meses outubro-dezembro apresentam nuvens convectivas com grande desenvolvimento vertical.

- **Terceiro comportamento.** Para irradiâncias GL entre os valores mínimo e máximo, existe uma evidente tendência a ser $\delta GL < 0$, da ordem de -30 a -20 W.m⁻² para $GL < 200$, e da ordem de -10 a +20 W.m⁻² para $GL > 200$.

A nebulosidade (na resolução de um pixel) é avaliada de acordo com a regra

$$C = (R_p - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}) \text{ se } R \leq R_{max} = 0,465$$

$$C = 1 \text{ se } R > R_{max}$$

O valor R_{max} foi encontrado a partir de classificação de nuvens e representa um valor de transição de cobertura cumuliforme a estratiforme. O valor de R_{max} parece ser estável geograficamente. Todavia, efeitos geométricos não são considerados nesta expressão: por um lado, o crescimento de nuvens cumuliformes tende a conservar seu “fator de aspecto” igual a 1 (Plank, 1969). Este fator é a relação entre espessura e diâmetro, o que implica em não-linearidade entre cobertura e refletância. Com efeito, se a área coberta for duplicada cada nuvem será também mais espessa e sua refletância individual maior: o aumento da refletância seria maior do que linear com a nebulosidade ou, reciprocamente, um determinado aumento de refletância entre os extremos R_{min} e R_{max} representaria aumento previsto menor da nebulosidade, e por consequência mais radiação do que a prevista. Este efeito teria influência sobre a estimativa de E_{IV} .

Por outro lado, a nebulosidade estimada para nuvens com grande desenvolvimento vertical pode ser menor se observada verticalmente (satélites de órbita polar) quando se compara com

uma linha de visada muito inclinada (“slant”) associada a imagens de satélites geoestacionários.

Recomendações para aprimoramentos imediatos do GL 1.2.

1. Gerar campos de água precipitável e refletância do solo no visível e infravermelho, renovados periodicamente.
2. Adaptar o GL1.2 para trabalhar com esses campos (definidos na resolução de um pixel).
3. Aprimorar a parametrização para absorção pelo vapor d’ água.
4. Controlar sistematicamente calibração do canal VIS de GOES, no que concerne a correção por degradação.
5. Análise crítica da estimativa de nebulosidade como simples expressão linear entre valores extremos.

De fato, estas modificações conduzem a uma versão GL1.4 (atualmente em andamento).

Finalmente, em termos de estimadores ligados ao comportamento do modelo GL 1.2, foram definidos os seguintes, baseados na comparação com a “rede de referência” (dados INMET não foram incluídos).

1.
Regressão linear $GL \times G$ (medida), considerando o conjunto de dados (figuras 4 a 7) $GL = b G + a$
2.
Regressão linear $GL \times G$, considerando médias em intervalos de 50 W.m-2. Conjuntos: $x = [25 \ 75 \ 125 \ \dots \ 325 \ 375]$; as ordenadas são $y = x + [\delta GL1 \ \delta GL2 \ \delta GL3 \ \dots \ \delta GL8]$. $GL = b_1 G + a_1$
3.
Regressão quadrática $GL \times G$, considerando médias em intervalos de 50 W.m-2. Conjuntos $[x; y]$ como no caso 2, mas divididos por 100: $gl = y/100, g = x/100$ $gl = c_2 g^2 + b_2 g + a_2$
4.
Regressão quadrática inversa $G \times GL$, desenhada para recuperar o valor de G a partir do estimador GL. $g = c_3 gl^2 + b_3 gl + a_3$

Os resultados estão apresentados na tabela 6. Os coeficientes de regressão no caso (1) são em geral superiores a $R = 0,9$.

Tabela 6. Ajustes por quadrados mínimos entre GL e G(medido) para dados de “redes de referência”.

	b	a	R	b ₁	a ₁	c ₂	b ₁	a ₂	c ₃	b ₃	a ₃
Sul											
201010	0.9928	-15.6	0.9591	1.1044	-34.5	0.0709	0.8210	-0.1544	-0.0512	1.1015	0.2072
201011	1.038	-21.6	0.9468	1.1057	-40	0.0921	0.7373	-0.1532	-0.0683	1.1628	0.229
201012	0.9468	6.96	0.9301	1.0669	-27.9	0.0328	0.9356	-0.1910	-0.0267	1.0365	0.2094
Sudeste											
201010	1.0778	-18.8	0.9573	1.0808	-19.4	0.1073	0.7054	0.0808	-0.0809	1.2036	-0.0124
201011	0.9955	-18.7	0.9503	1.1067	-38.9	-0.0151	1.1596	-0.4206	0.0097	0.8714	0.3667
201012	1.1187	-49.0	0.9767	1.1375	-50.6	-0.0284	1.2510	-0.5985	0.0190	0.8117	0.4864
Centro-Oeste (estação 29902 eliminada em 201012)											
201010	1.0486	-1.6	0.9220	1.1966	-36.8	0.0095	1.1635	-0.3484	-0.0041	0.8473	0.3058
201011	0.9963	-4.5	0.8434	1.2091	-49.2	0.0994	0.8113	-0.1668	0.0523	1.0275	0.2710
201012	1.066	-20.1	0.9057	1.14	-33.3	0.0654	0.9125	-0.1979	-0.0336	0.9862	0.2451
Nordeste											
201010	0.9717	12.3	0.8988	1.1785	-38.2	-0.0531	1.3910	-0.5247	0.0342	0.7145	0.3927
201011	1.0132	-9.8	0.9188	1.1737	-44.7	0.0082	1.1408	-0.4249	-0.0063	0.8744	0.3726
201012	1.0835	-36.6	0.9542	1.1658	-51.5	0.054	0.9495	-0.3378	-0.0348	0.9847	0.3604

Reconhecimentos.

Pela autorização para uso de dados da rede SolRad Net, agradecemos aos Dres. Elian A. Wolfram e Eduardo J. Quel (estação CEILAP, Buenos Aires), e a Brent Holben – NASA (estações amazônicas de Cuiabá-Miranda, Ji-Paraná, Rio Branco, Alta Floresta).

Ao Dr. Gonzalo Abal (Instituto de Física, Universidad de La República), pela cessão de dados piranométricos de estações do Uruguai.

Ao Dr. Raúl Righini (GERSOL, Universidad Nacional de Luján), pela cessão de informação sobre rede integrada de dados solarimétricos na Argentina, e dados do GERSOL (disponíveis em internet).

Ao pessoal da rede SONDA, pelo esforço na disponibilização de dados na sua página internet.

Referências bibliográficas

Os artigos sinalizados com (*) estão disponíveis (formato PDF) na página Web de Radiação Solar e Terrestre → Publicações.

* BOTTINO, M.J., S. VILLAS BOAS NETO. Estimativa de radiação solar por satélite: Procesamento da série temporal de janeiro de 1996 a setembro de 2002 e abril e maio de 2003. **Climanálise**, ano 3, numero 1, 28-35, 2006.

- * CEBALLOS, J.C. Estimativa de radiação solar à superfície com céu claro: um modelo simplificado. **Revista Brasileira de Meteorologia** v. 15(1), 113-122, 2000.
- * CEBALLOS, J.C. Algunas características del régimen de radiación solar en Argentina, período 1996-2006. X Congremet, Buenos Aires, Argentina, 2010.
- * CEBALLOS, J.C., M.J. BOTTINO. Shortwave radiation flux monitoring over South American Area using GOES VIS imagery. Proceedings, **13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography**, USA, 2004.
- * CEBALLOS, J.C., M.J. BOTTINO. Solar radiation in South America, period 1998-2004: Some aspects of a satellite-based data base. Anais, XIV **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Florianópolis, SC, 2006.
- * CEBALLOS, J.C., A.P. FATTORI. Avaliação de água precipitável a partir de determinações de fluxo direcional solar em banda larga – Um estudo para a região de Bauru (SP). Anais, IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 1986.
- * CEBALLOS, J.C., M.L. RODRIGUES. Coherence of solar irradiation assessed with a simplified physical model using GOES and MSG2 VIS imagery. Proceedings, 2010 Eumetsat Meteorological Satellite Conference, Córdoba, Espanha, 2010. (<http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/index.htm?l=en>)
- * CEBALLOS, J.C., M.J. BOTTINO, J.M. SOUZA. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **J. of Geophys. Research**, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- * CEBALLOS, J.C., M.J. BOTTINO, R. RIGHINI. Radiación solar en Argentina estimada por satélite: Algunas características espaciales y temporales. Anais, **IX Congremet**, Buenos Aires, Argentina, 2005.
- HOWARD, J.N., D.E. BURCH, D. WILLIAMS. Infrared transmission in synthetic atmospheres. III: Absorption by water vapor. **J. Opt. Soc. Am.**, v 46, 242-245, 1956.
- * MACEDO, L.O., J.C. CEBALLOS. Sistema de Processamento de Dados de Radiação Solar (SPDRAD). Anais, **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém, PA, 2010.
- * ORTEGA, A., R. ESCOBAR, H. VIDAL, S.L. ABREU, S. COLLE. Avaliação do recurso solar no Chile. Anais, II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis, novembro de 2008.
- PLANK, V.G. The size distribution of cumulus clouds in representative Florida populations. **J. Appl. Meteor.** V 8, 46-67, 1969.

Acesso internet a fontes de dados mencionadas neste relatório

GER SOL (Grupo de Estudos de Radiação Solar), Universidad Nacional de Luján, Argentina. <http://www.gersol.unlu.edu.ar/>

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia – Brasil). SONABRA – Rede de estações automáticas. <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>

SolRad-Net (Solar Radiation Network), Goddard Space Flight Center, NASA – Estações automáticas de radiação solar e UV. http://solrad-net.gsfc.nasa.gov/data_menu.html

SONDA (Sistema de Organização Nacional de DADOS Ambientais), Centro de Ciências do Sistema Terrestre, INPE. <http://sonda.ccst.inpe.br/>