

AVALIAÇÃO DE ESTIMATIVAS DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE BASEADAS EM EXTRAPOLAÇÃO E INTERPOLAÇÃO NA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL

Ricardo A. Guarnieri¹, Fernando R. Martins¹, Enio B. Pereira¹, Sheila A. B. Silva¹.

RESUMO: A estimativa da incidência de radiação solar, em um local que não dispõe de radiômetros, pode ser realizada por extrapolação/interpolação de medidas realizadas por estações vizinhas ou através de modelos baseados em imagens de satélites. Ambas são formas aproximadas de estimativa, e seus empregos dependem da quantificação de suas incertezas. Neste trabalho, dados de radiação solar coletados por 32 Plataformas de Coletas de Dados do CPTEC/INPE, situadas no sudeste do Brasil, foram empregados na geração de extrapolações e interpolações. Uma análise dos erros das estimativas obtidas para diferentes distâncias entre as estações é apresentada. Em seguida, esses erros são comparados com o erro médio verificado no processo de estimativa de radiação solar incidente utilizando o modelo BRASIL-SR.

ABSTRACT: The estimation of the solar irradiation for a place, where ground data is not available, can be accomplished by two approaches: extrapolation/interpolation of measurements performed by neighbor stations and the use of radiative transfer models based on satellite images. The choice between these two approaches depends on the evaluation of their uncertainties. In this study, solar radiation data collected by 32 CPTEC's ground measurements sites, located in the Brazilian southeast region, were employed for extrapolations and interpolations. Statistical analysis of the estimates errors as a function of the distance from the closest measurement site is presented. The extrapolation/interpolation estimates errors are also compared with the mean error observed for estimates provided by the BRASIL-SR model.

Palavras-Chave: radiação solar, extrapolação e interpolação, plataformas de coleta de dados.

INTRODUÇÃO

Dados de intensidade de radiação solar incidente na superfície terrestre encontram aplicações em diversos setores produtivos, podendo-se citar a agropecuária, a arquitetura (iluminação e aquecimento natural de ambientes), estudos climatológicos e o setor de energia. O setor de energia demanda informações e previsões de incidência de energia solar tanto para o aproveitamento energético desta forma de energia, como para otimizar o despacho de carga em linhas de transmissão, uma vez que o aquecimento radiativo dos cabos pode ocasionar perdas de energia e danos às instalações. Muitas vezes, porém, essas informações não se encontram disponíveis para o local ou região de interesse. O custo de instalação e operação de um sensor ou uma rede de sensores pode inviabilizar a realização de estudos e o desenvolvimento de projetos.

Para suprir as informações requeridas em locais que não dispõe de medidas de radiação pode-se adotar duas abordagens: a extrapolação/interpolação de dados medidos por estações próximas; ou

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), Avenida dos Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos (SP), (12)3945-{6738,6778,6786,6738}, ricardog@cptec.inpe.br, fernando@dge.inpe.br, eniobp@cptec.inpe.br, sheila@dge.inpe.br.

o emprego de imagens de satélite e modelos de transferência radiativa. Ambas são abordagens aproximativas, mas que, dependendo da quantificação dos erros das estimativas, podem ser empregadas para suprir a ausência de um equipamento medidor.

Na extrapolação, costuma-se simplesmente tomar como estimativa para um local, a medida realizada pela estação de medida mais próxima. Presume-se assim, que a estação e o local de interesse estão recebendo a mesma intensidade de radiação. Para distâncias pequenas, isso muitas vezes é verdade. Mas à medida que a distância entre os dois pontos aumenta, aumentam também os erros da estimativa, uma vez que a incidência de radiação depende das propriedades óticas da atmosfera (especialmente a cobertura de nuvens) particulares desses pontos. Como estas propriedades óticas não são espacialmente uniformes, dois locais podem receber intensidades de radiação diferentes mesmo que a distância entre eles não seja tão elevada. Para grandes distâncias, as diferenças também podem ocorrer por outros fatores que não as condições atmosféricas distintas, como por exemplo, as trajetórias aparentes do Sol no céu e o comprimento do caminho ótico percorrido pela radiação solar na atmosfera, que dependem da latitude e longitude do local.

O tempo de integração das medidas de irradiação solar também influencia na confiabilidade das estimativas. A presença de nuvens isoladas pode acarretar diferenças significativas quando se estuda a incidência de radiação com resoluções temporais de 1 minuto ou 1 hora, mas, em geral, acarretam apenas pequenas diferenças entre as integrais diárias de energia solar de pontos próximos.

Na estimativa por interpolação, dados de duas ou mais estações são empregados para calcular a estimativa no local de interesse utilizando-se métodos específicos, como a simples média das *estações interpoladoras*. Em geral, quando se toma o cuidado de utilizar estações interpoladoras que circundem adequadamente o local desejado, estimativas por interpolação apresentam resultados melhores que a extrapolação. Isso ocorre porque, desta forma, leva-se em conta as tendências de variação espacial da incidência de radiação.

Modelos de transferência radiativa permitem estimativas de radiação para toda a área abrangida pela imagem de satélite e com a resolução espacial desta. Informações das propriedades óticas da atmosfera extraídas da imagem de satélite permitem a modelagem dos processos radiativos. Pode-se assim compor um mapa do fluxo de radiação em uma região ou obter estimativas pontuais para um local de interesse, para cada instante em que se possua uma imagem de satélite. As estimativas para integral diária de irradiação solar fornecidas por modelos assumem que as propriedades óticas variam de forma linear entre as condições atmosféricas apresentadas em imagens consecutivas. Dessa forma, a confiabilidade das estimativas de integral diária está diretamente relacionada ao número de imagens de satélite disponíveis por dia.

Neste trabalho, medidas de radiação solar realizadas por uma rede de estações são empregadas na obtenção de estimativas de total diário de irradiação solar por meio de extrapolações

e interpolações. O objetivo foi avaliar os erros dessas estimativas e a variação do RMSE (*Root Mean Square Error*) com o aumento da distância das estações. A avaliação destes erros permite conhecer a confiabilidade dos métodos em função do espaçamento entre as estações, bem como a comparação com os erros das estimativas fornecidas por modelos baseados em imagens de satélite.

Perez *et al.* [1] fizeram estudo semelhante e compararam os erros das duas abordagens para um pequeno conjunto de estações no nordeste dos EUA. Foi observado que quando as distâncias entre os radiômetros de uma rede de observação forem superiores a aproximadamente 45 km, os dados interpolados apresentam níveis de confiabilidade inferiores às estimativas de totais diários de irradiação obtidos com modelos computacionais que utilizam imagens de satélite.

DADOS E METODOLOGIA

Neste trabalho, dados de Plataformas de Coleta de Dados meteorológicos (PCDs) do CPTEC, instaladas na região sudeste do Brasil, foram empregados. As PCDs são plataformas automatizadas que dispõem de sensores para dados meteorológicos básicos (temperatura, umidade, pressão, etc.) e, muitas delas, um piranômetro para medida da radiação solar incidente. As medidas das PCDs são coletadas pelos Satélites de Coletas de Dados (SCDs) do INPE e transmitidas à Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do CPTEC. As integrais diárias de radiação solar incidente, em Mega-Joules por metro quadrado (MJ/m^2), medidas pelas 32 PCDs mostradas na Figura 1 e Tabela 1, no mês de março de 2005 (31 dias) foram empregadas na realização de estimativas por extrapolação e interpolação. Foram utilizados os dados brutos coletados nas estações, sem aplicação de um procedimento rigoroso para garantir a qualidade das medidas.

No estudo da extrapolação, a cada etapa, cada uma das 32 estações foi tomada como *local de referência*, e as demais 31 PCDs como *estações extrapoladoras*. As medidas de cada estação extrapoladora foram diretamente tomadas como estimativas para o local de referência, para cada um dos 31 dias. Assim, as 31 estimativas diárias (E_i) obtidas para um local de referência, a partir de uma determinada estação extrapoladora, foram comparadas com as 31 medidas (M_i) existentes para o local de referência, e o RMSE% (RMSE relativo) foi calculado de acordo com a equação:

$$RMSE\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - M_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i)} \%$$

em que N equivale ao número de pares estimativa-medida, e é igual a 31 neste estudo. Dessa forma, foram calculados os erros (RMSE) de extrapolação para $32 \times 31 = 992$ combinações de local de referência e estação extrapoladora. Cada valor de RMSE foi associado à distância (em km) entre o local de referência e a estação extrapoladora.

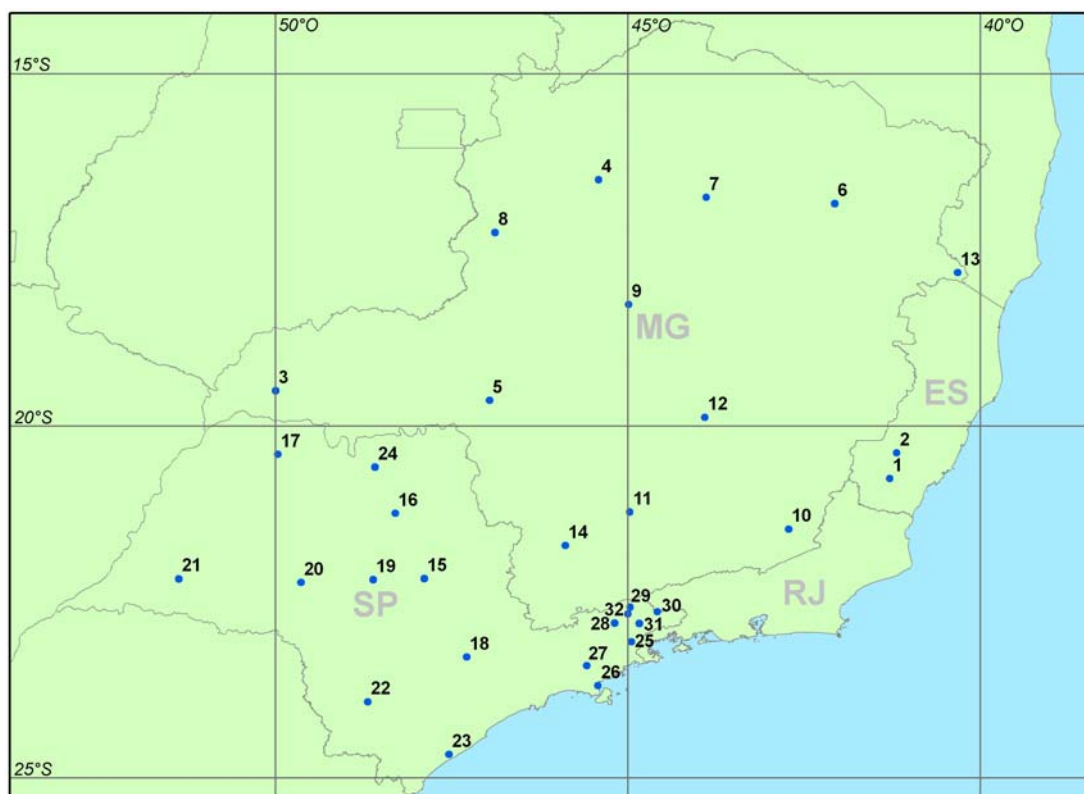


Figura 1: Localização das 32 PCDs da região sudeste do Brasil empregadas neste estudo.

Tabela 1: Nome, identificador e coordenadas geográficas das estações PCD apresentadas na Figura 1.

Estação	PCD-ID	Estação	Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	31958	Jerônimo Monteiro	ES	-20.75°	-41.29°	146
2	31959	Venda Nova do Imigrante	ES	-20.38°	-41.19°	727
3	31929	Honorópolis	MG	-19.50°	-50.00°	492
4	31930	Santa Fé de Minas	MG	-16.50°	-45.42°	596
5	32334	Araxá	MG	-19.64°	-46.97°	1091
6	32502	Araçuaí	MG	-16.84°	-42.07°	519
7	32503	Montes Claros	MG	-16.75°	-43.89°	701
8	32505	Paracatu	MG	-17.25°	-46.89°	625
9	32506	Andrequicé	MG	-18.28°	-44.99°	808
10	32510	Leopoldina	MG	-21.47°	-42.72°	305
11	32511	Lavras	MG	-21.22°	-44.97°	960
12	32513	Belo Horizonte	MG	-19.88°	-43.91°	991
13	32519	Nanuque	MG	-17.82°	-40.32°	104
14	32526	Machado	MG	-21.70°	-45.89°	899
15	31973	São Carlos	SP	-22.17°	-47.89°	753
16	31974	Jaboticabal	SP	-21.24°	-48.30°	600
17	31976	Votuporanga	SP	-20.41°	-49.97°	510
18	31977	Itu	SP	-23.29°	-47.29°	626
19	31978	Jaú	SP	-22.19°	-48.62°	495
20	31979	Garça	SP	-22.23°	-49.64°	682
21	31980	Presidente Prudente	SP	-22.17°	-51.37°	489
22	31981	Taquarivaí	SP	-23.92°	-48.69°	682
23	31982	Iguape	SP	-24.67°	-47.54°	10
24	32464	Barretos	SP	-20.58°	-48.59°	549
25	32520	Cunha	SP	-23.07°	-44.95°	950
26	32521	Caraguatatuba	SP	-23.69°	-45.43°	3
27	32522	Paraibuna	SP	-23.41°	-45.59°	762
28	32524	Guaratinguetá	SP	-22.80°	-45.19°	539
29	32525	Cruzeiro	SP	-22.575°	-44.97°	518
30	32530	São José do Barreiro	SP	-22.64°	-44.58°	1372
31	32533	Silveiras	SP	-22.804°	-44.84°	1219
32	32766	Cachoeira Paulista	SP	-22.675°	-45.01°	563

No estudo da interpolação, foi adotado um método para garantir que cada local de referência fosse adequadamente circundado pelas *estações interpoladoras*. As interpolações consistiram na média das medidas (ponderadas pelo inverso do quadrado das distâncias) de 4 estações interpoladoras, com a condição de que cada estação interpoladora estivesse situada num quadrante distinto em torno do local de referência. Assim, apenas algumas das 32 PCDs puderam ser usadas como locais de referência, uma vez que as PCDs situadas mais externas à área de estudo, não apresentam estações vizinhas em um ou mais quadrantes em torno delas. Para 94 combinações de “*local de referência + conjunto de 4 estações interpoladoras*”, foram calculados valores de RMSE% (cada um com base em 31 pares estimativa-medida). Cada RMSE foi associado à distância entre o local de referência e a mais próxima das 4 estações interpoladoras.

RESULTADOS

Na Figura 2 é apresentado o comportamento dos erros de extrapolação e interpolação em função da distância das estações empregadas na estimativa. São apresentados os 992 valores de RMSE% de estimativas por extrapolação e os 94 valores referentes a estimativas por interpolação.

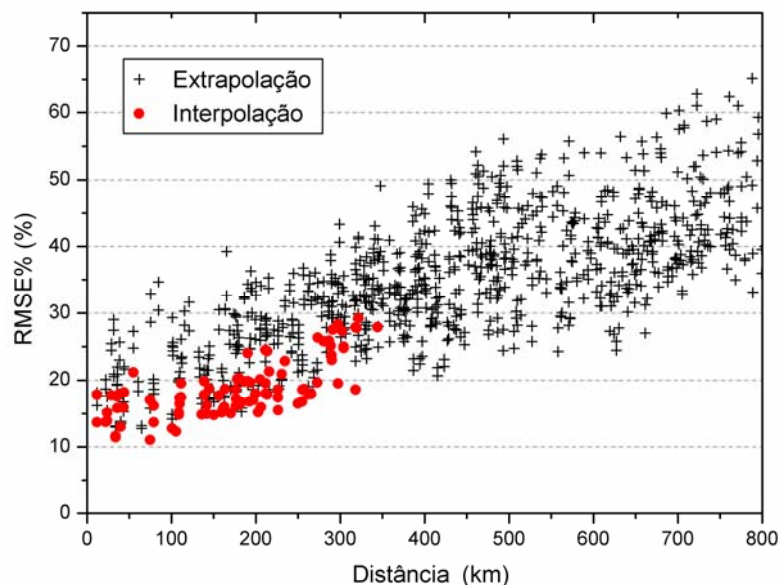


Figura 2: Erros (RMSE%) de estimativa de integral diária de radiação solar por extrapolação e interpolação, em função da distância da estação extrapoladora ou estação interpoladora mais próxima.

Na Figura 3, são comparados os erros de interpolação/extrapolação e o nível médio de erro de estimativas diárias realizadas com o modelo de transferência radiativa baseado em imagens de satélite BRASIL-SR [2,3], tendo sido empregadas 17 estações PCD do sudeste brasileiro, previamente utilizadas na validação do modelo BRASIL-SR [4]. As 17 estações foram selecionadas por meio de um processo que visava garantir a qualidade dos dados utilizados no processo de validação do modelo.

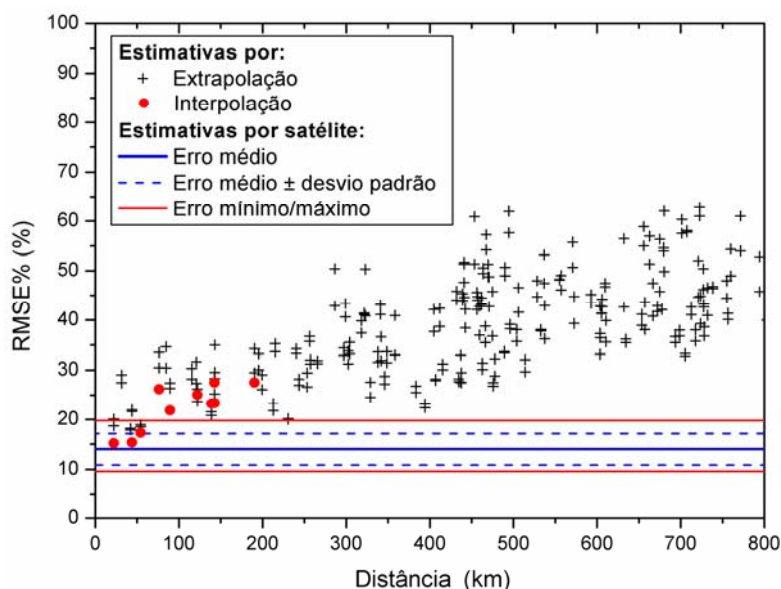


Figura 3: Comparação entre os erros de estimativa por interpolação e extrapolação com os níveis de erro das estimativas por satélite.

CONCLUSÕES

Com a realização deste estudo, pode-se verificar a dependência dos erros (RMSE relativo) de interpolação e extrapolação com a distância das estações de medida empregadas nas estimativas. Como já esperado, verificou-se que à medida que a distância das estações extrapoladoras ou interpoladoras ao local de referência aumenta, maiores são os erros das estimativas. Todos os valores de erro destas estimativas mostraram-se superiores ao erro médio das estimativas realizadas com o modelo BRASIL-SR. Tomando o erro máximo do modelo BRASIL-SR como referência, verifica-se que apenas interpolações e extrapolações realizadas com estações situadas a distâncias inferiores a 50 km apresentam erros similares ao erro das estimativas do modelo BRASIL-SR.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP (projeto SONDA – 22.01.0569.00) e ao CNPq (processos 132148/2004-8 e 141844/2006-0) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Perez, R.; Seals, R.; Zelenka, A. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. **Solar Energy**, 60 (2), 89-96, 1997.
2. Pereira, E. B.; Abreu, S. L.; Stuhlmann, R.; Rieland, M.; Colle, S. Survey of the incident solar radiation in Brazil by the use of the METEOSAT satellite data. **Solar Energy**, 57 (2), 125-132, 1996.
3. Martins, F. R. **Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 330p. 2001.
4. PNUMA, 2006. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. (a ser publicado em novembro/2006). São José dos Campos, 2006