

Comparação de estimativas de radiação solar fornecidas por interpolação Kriging de dados de superfície e por modelo físico alimentado com dados de satélite

Sheila de Araujo Bandeira e Silva ¹
Ricardo André Guarnieri ¹
Fernando Ramos Martins ¹
Enio Bueno Pereira ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Divisão de Clima e Meio Ambiente – CPTEC
Cx. Postal 515 – 12227-010, São José dos Campos
{sheila, fernando}@dge.inpe.br; {ricardog, eniobp}@cptec.inpe.br

Abstract. This work aims at presenting the performance comparison between two techniques used to obtain estimates of surface solar flux in the Southeastern region of Brazil: Kriging interpolation and radiative transfer model. The ground data was acquired in 39 Automatic Weather Stations (AWS). The model BRASIL-SR provided solar estimates using satellite data and “Two-Stream” approach to solve radiative transfer equation in atmosphere. The BIAS and RMSE values were calculated for 5 AWS sites in order to evaluate the reliability of both techniques. The Kriging interpolation presented better results for only one site: Votuporanga (SP). Estimates provided by radiative transfer model showed lower deviations in the other four AWS sites: Cachoeira Paulista(SP), Andrequicé (MG), Itajubá (MG), and Montes Claros (MG).

Palavras-chave: global radiation, radiative transfer model, Kriging interpolation, radiação global, modelo de transferência radiativa, interpolação Kriging.

1. Introdução

Nos últimos anos a relação energia e meio ambiente é tema de muitas discussões, o que vem levando o homem a desenvolver, pesquisar e utilizar fontes de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ao meio ambiente. A energia solar, cujo aproveitamento tanto como fonte de calor quanto como geradora de eletricidade, é uma fonte de energia renovável que se apresenta bastante viável apesar de seu custo ainda elevado.

O principal obstáculo para alavancar o crescimento da adoção da energia solar encontra-se na falta de informações e dados científicos que permitam uma avaliação da viabilidade econômica dos projetos de uso de fontes renováveis no Brasil.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por meio da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, coordena projetos que visam atender essa demanda por informações no setor energético. Os projetos SWERA (Solar and Wind Energy Resources) e SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia). Informações detalhadas sobre esses projetos e acesso a base de dados geradas em cada um pode ser obtida em <http://swera.unep.net/swera/> e www.cptec.inpe.br/sonda/.

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os primeiros resultados obtidos da comparação dos desvios apresentados pelas estimativas da irradiação global fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, alimentado por dados de satélite, e pela interpolação de dados coletados em superfície. Para esse estudo comparativo foram utilizados dados coletados em plataformas de coleta de dados meteorológicos localizadas em: Cachoeira Paulista (SP), Andrequicé (MG), Itajubá (MG), Montes Claros (MG) e Votuporanga (SP).

2. Metodologia

A etapa inicial deste trabalho foi adquirir, na base de dados históricos da rede de estações PDC's, os valores de irradiação global medidos em superfície para toda a região sudeste do Brasil, disponíveis em <http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/radiacao/fluxos/radsat.htm>. Analisando os dados acessíveis, optou-se pela utilização das informações do mês de março de 2005, pois para este mês há informações diárias em todas as 39 estações da região em estudo.

Um segundo passo foi o mapeamento da radiação solar para a mesma região e mês, a partir das estimativas do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e por fim, a análise geostatística e interpolação dos dados da rede PCD.

2.1. O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR é um modelo físico que fornece estimativas de irradiação solar na superfície utilizando o método de “Dois Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa na atmosfera para diversos intervalos espectrais da radiação solar.

O modelo assume que a cobertura de nuvens, C_{eff} , é o principal fator de modulação do fluxo de radiação solar na superfície e que a transmitância atmosférica em qualquer condição de nebulosidade pode ser determinada pela relação linear entre a transmitância em condições de céu claro e em condições de céu totalmente encoberto Martins (2001).

A parametrização da atmosfera é realizada com o uso de dados de cobertura efetiva de nuvens obtidos a partir da análise de imagens do satélite GOES em conjunto com dados climatológicos de temperatura, albedo de superfície, visibilidade atmosférica e umidade relativa. A **Figura 1** apresenta o diagrama em blocos simplificado do modelo BRASIL-SR.

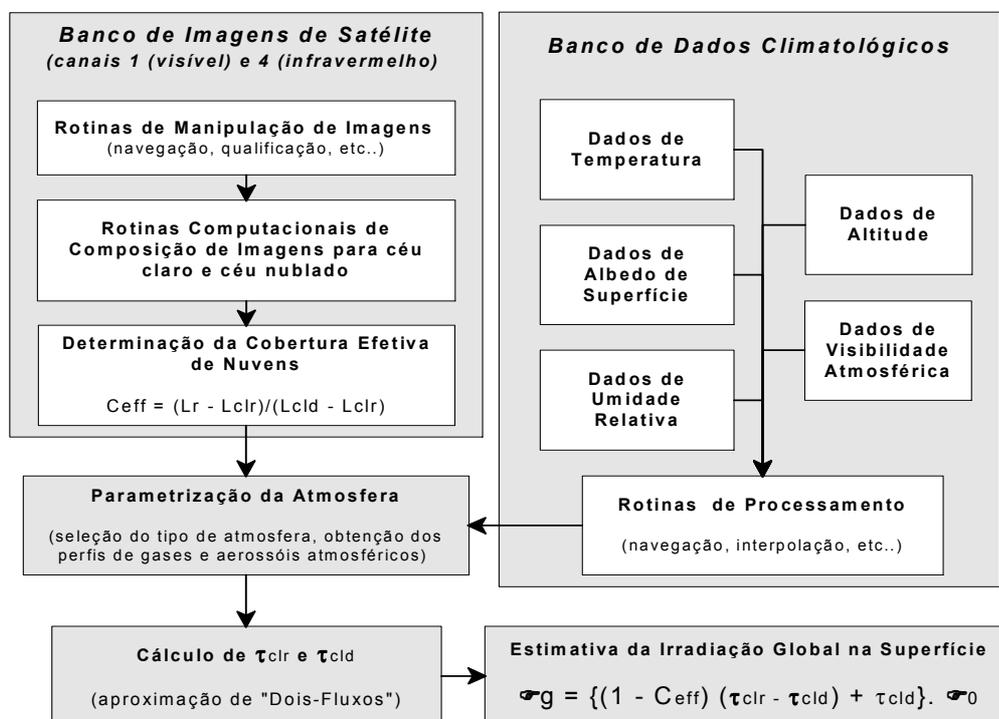


Figura 1. Diagrama em blocos do Modelo BRASIL-SR

A **Figura 2** ilustra o mapeamento da radiação global fornecido pelo modelo BRASIL-SR para toda a região sudeste do Brasil. Como pode ser observado, os maiores níveis de radiação

global para o mês de março de 2005 ocorrem no norte do estado de Minas Gerais e os mais baixos, por volta de 4,75kWh/m², no sul do estado de São Paulo.

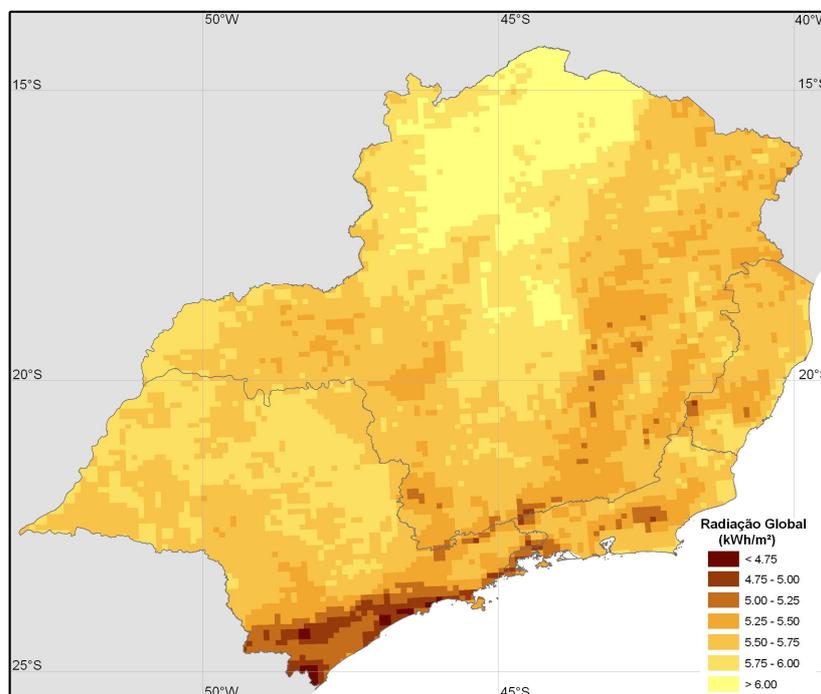


Figura 2. Mapeamento da radiação global para o mês de março de 2005 elaborado a partir das estimativas fornecidas pelo Modelo BRASIL-SR.

2.2. Interpolação Geoestatística

Segundo Geoestatística (1997) a variabilidade de um grupo de amostras é espacialmente dependente, ou seja, dentro de um certo domínio, as diferenças entre elas podem ser expressas em função da distância de separação entre as observações medidas.

A Geoestatística está associada a uma classe de técnicas utilizadas para analisar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço ou no tempo, e possui três etapas importantes: a análise exploratória das amostras, análise estrutural e por fim, a realização da interpolação dos dados.

A análise exploratória é o estágio inicial da Geoestatística e tem como objetivo principal averiguar as propriedades matemáticas e estatísticas dos dados, através de histogramas, permitindo identificar possíveis erros com relação à localização dos dados, facilitando a identificação de valores possivelmente errôneos ou associados à algum fenômeno localizado que necessita ser investigado.

A análise estrutural tem por objetivo averiguar e identificar padrões na estrutura dos dados, como determinar a ocorrência de anisotropia (variações graduais numa direção ou irregulares na outra) através de um semivariograma. O semivariograma consiste no ajuste da função matemática a partir de amostras experimentais, utilizando um dos modelos transitivos existentes. Quanto mais próxima os dados das amostras experimentais estiverem de um dos modelos transitivos, mais precisa será a análise estrutural.

2.2.1. Método de Interpolação - Krigagem

O termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o primeiro a introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Este método foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso

expandiu-se com sucesso nos mapeamentos de solos, hidrológico e atmosférico e outros campos correlatos DPI (2004).

A interpolação consiste na estimativa e aproximação de valores desconhecidos, tendo como base uma função inicial definida pela distância entre pontos (BARROSO et al., 1987). Neste trabalho utilizou-se o método da Krigeagem, pois os pontos amostrais estavam distribuídos irregularmente por toda a área de estudo.

A diferença entre a krigeagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. Na krigeagem, o procedimento é semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, exceto que aqui os pesos são determinados a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Em média, a krigeagem fornece estimativas nas quais a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto deve ser nula e estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos SILVA et al. (2003).

A krigeagem engloba um vasto conjunto de métodos de estimação e nesse projeto optou-se pela utilização do método da Krigeagem Ordinária. Este é um método interpolador exato no sentido de que, quando as equações de combinação linear e de estimador não tendencioso forem utilizadas, os valores interpolados irão coincidir com os valores dos pontos amostrais.

2.3. Dados de Superfície

A rede de PCD's (Plataformas de Coleta de Dados) operada pelo CPTEC/INPE, com estações distribuídas por todo o território brasileiro, foi utilizada neste trabalho para comparação com as estimativas fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR e pela técnica de interpolação geoestatística utilizada. Dessa forma, torna possível uma avaliação da confiabilidade tanto do modelo BRASIL-SR quanto da técnica de interpolação utilizada. Apesar de não contar com sensores de primeira linha, estudos anteriores Ceballos et al., (2004) mostraram a boa performance dos instrumentos Licor quando comparados a sensores de primeira linha Kipp&Zonen e Eppley, quando procedimentos de operação e manutenção das estações são realizados adequadamente. A **Figura 3** mostra a localização das estações na região em estudo e suas descrições estão apresentadas na **Tabela 1**.

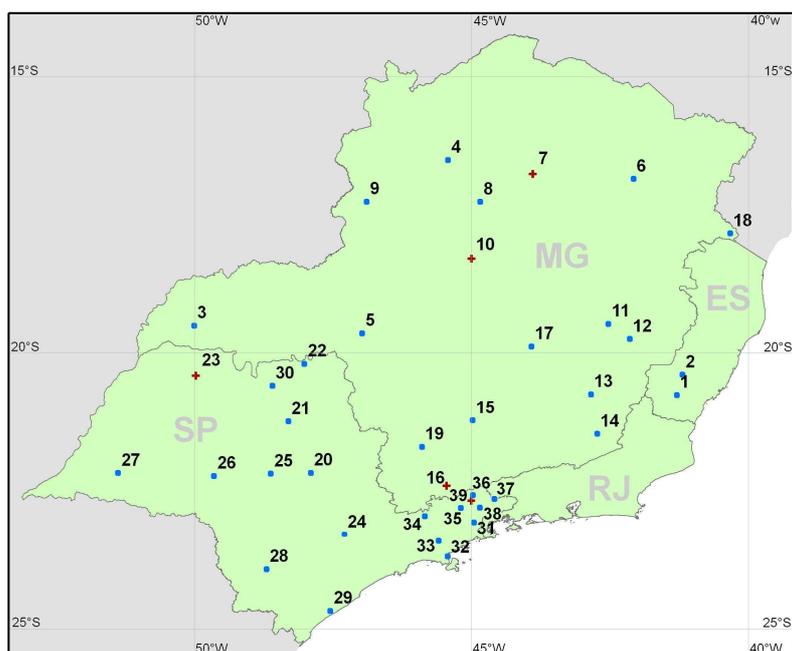


Figura 3. Localização das estações de coleta de dados da rede PCD's utilizadas neste trabalho.

Tabela 1. Identificação das estações da rede de coleta de dados PCD's. Destaque para as estações utilizadas na comparação da confiabilidade das estimativas fornecidas pela interpolação geoestatística e pelo modelo BRASIL-SR.

ID	NOME	UF	LONGITUDE	LATITUDE
1	Jerônimo Monteiro	ES	-41.28000	-20.75000
2	Venda Nova Imigrante	ES	-41.18000	-20.38000
3	Honorópolis	MG	-50.00000	-19.50000
4	Santa Fé de Minas	MG	-45.41000	-16.50000
5	Araxá	MG	-46.96000	-19.63000
6	Araçuaí	MG	-42.06000	-16.84000
7	Montes Claros	MG	-43.88000	-16.75000
8	Piraporã	MG	-44.83000	-17.25000
9	Paracatu	MG	-46.88000	-17.25000
10	Andrequicé	MG	-44.99000	-18.27000
11	Ipatinga	MG	-42.52000	-19.47000
12	Caratinga	MG	-42.13000	-19.74000
13	Viçosa	MG	-42.83000	-20.74000
14	Leopoldina	MG	-42.72000	-21.46000
15	Lavras	MG	-44.97000	-21.22000
16	Itajubá	MG	-45.44000	-22.40000
17	Belo Horizonte	MG	-43.90000	-19.87000
18	Nanuque	MG	-40.32000	-17.82000
19	Machado	MG	-45.88000	-21.70000
20	São Carlos	SP	-47.89000	-22.16000
21	Jaboticabal	SP	-48.30000	-21.24000
22	Miguelópolis	SP	-48.01000	-20.18000
23	Votuporanga	SP	-49.96000	-20.40000
24	Itú	SP	-47.28000	-23.28000
25	Jaú	SP	-48.61000	-22.18000
26	Garça	SP	-49.64000	-22.22000
27	Presidente Prudente	SP	-51.37000	-22.17000
28	Taquarivaí	SP	-48.69000	-23.92000
29	Iguape	SP	-47.54000	-24.67000
30	Barretos	SP	-48.59000	-20.58000
31	Cunha	SP	-44.95000	-23.06000
32	Caragatatuba	SP	-45.42000	-23.69000
33	Paraibuna	SP	-45.58000	-23.40000
34	Monteiro Lobato	SP	-45.83000	-22.95000
35	Guaratinguetá	SP	-45.18000	-22.80000
36	Cruzeiro	SP	-44.96000	-22.57000
37	São José do Barreiro	SP	-44.58000	-22.64000
38	Silveiras	SP	-44.83000	-22.80000
39	Cachoeira Paulista	SP	-45.00000	-22.67000

3. Resultados obtidos

Entre as 39 estações PCD's da região sudeste, selecionou-se cinco estações com características climáticas diferentes para a comparação das estimativas de irradiação solar global obtidas por interpolação com as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR e os dados coletados em superfície: Cachoeira Paulista (SP), Andrequicé (MG), Itajubá (MG), Montes Claros (MG) e Votuporanga (SP).

A primeira estação analisada foi Cachoeira Paulista. Excluiu-se essa estação do conjunto de amostras e aplicou-se a análise geostatística. O resultado da interpolação foi comparado inicialmente com o valor medido excluído do conjunto (dado medido) e em seguida com o valor estimado pelo modelo BRASIL-SR. Finalizando os testes para Cachoeira Paulista, comparou-se a estimativa do modelo com o valor medido em superfície. O mesmo procedimento foi adotado para todas as outras quatro estações.

Com o intuito de comparar a confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR e pela interpolação por kriging calculou-se, para as cinco estações selecionadas, o desvio médio (MBE) e o desvio quadrático médio (RMSE) das estimativas em relação aos dados coletados em superfície., utilizando as seguintes expressões:

$$BIAS = \left[\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rad_i^{est} - Rad_i^{med})}{\overline{Rad}_{med}} \right] \cdot 100 \quad RMSE = \left[\frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rad_i^{est} - Rad_i^{med})^2}}{\overline{Rad}_{med}} \right] \cdot 100$$

onde: N é o número de dados utilizados no processo de validação; i refere-se a cada par de valores medidos e estimados; Rad^{med} é a radiação solar medida pela estação coletora de dados; Rad^{est} representa a radiação estimada pelo modelo. O traço horizontal sobre a variável é usado para representar o valor médio da variável.

A **Figura 4** apresenta os gráficos de dispersão para as diferentes estimativas nos 5 locais de coleta de dados selecionados. A **Tabela 2** apresenta os valores de BIAS e RMSE obtidos para as estimativas diárias de radiação global.

Tabela 2. Valores de BIAS e RMSE para as cinco estações em estudo

Estação	Brasil-SR x Kriging		PCD x BRASIL-SR		PCD x KRIGING	
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
Montes Claros	-0.0242	0.1498	-0.1002	0.1626	-0.1220	0.2044
Cachoeira Paulista	-0.1684	0.1831	0.0535	0.1349	-0.1239	0.1599
Andrequicé	-0.1568	0.2018	0.0806	0.1501	-0.0889	0.1908
Itajubá	-0.2178	0.2502	0.0503	0.0957	-0.1785	0.2218
Votuporanga	-0.0584	0.1316	0.1072	0.1483	0.0426	0.1157

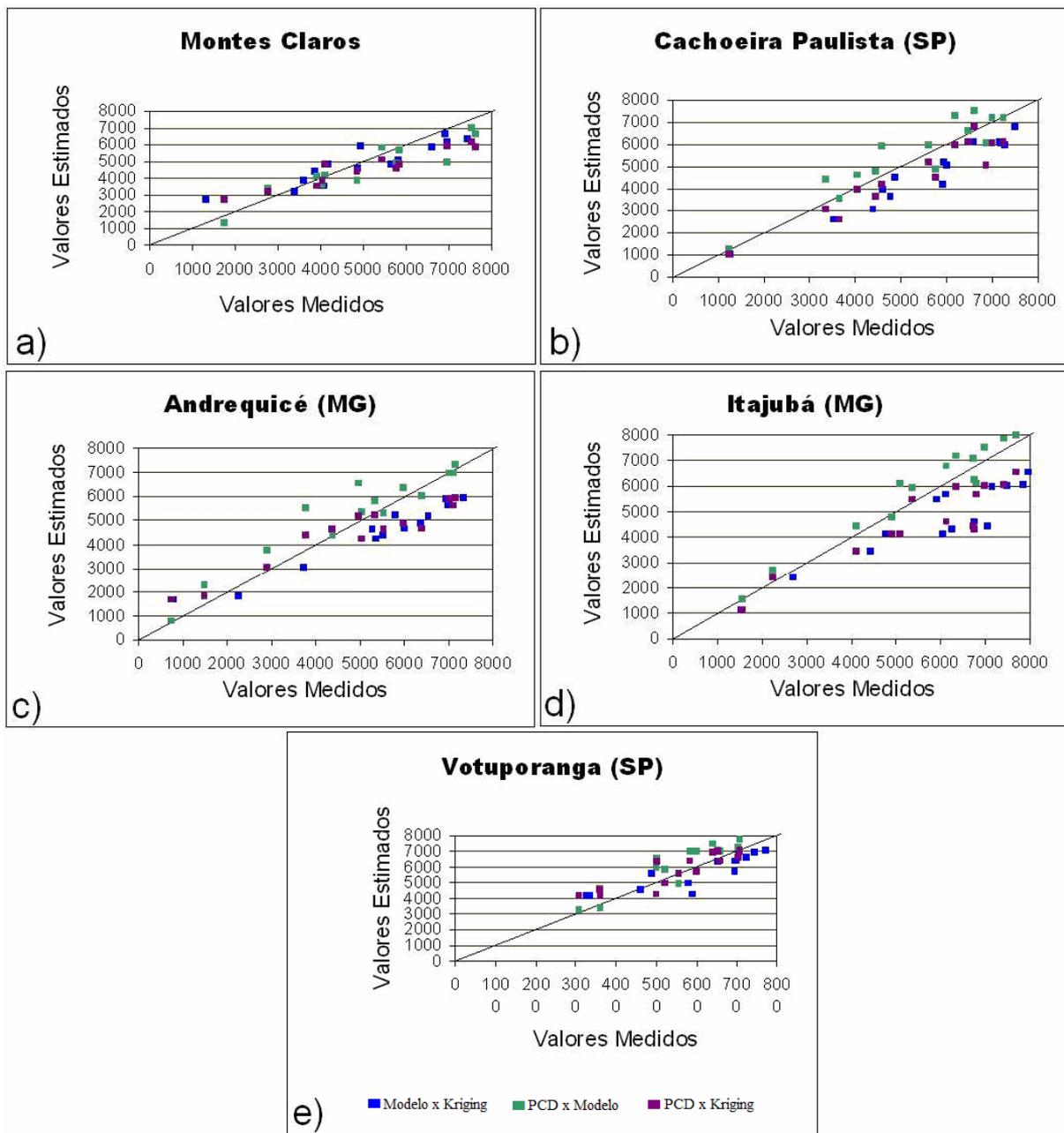


Figura 4. Gráfico de dispersão dos desvios para as estações (a) Montes Claros, (b) Cachoeira Paulista, (c) Andrequicé, (d) Itajubá e (e) Votuporanga.

4. Conclusões

Este trabalho apresenta os primeiros resultados obtidos e descreve a metodologia empregada para a comparação dos níveis de confiabilidade das estimativas de irradiação solar para a região sudeste do Brasil no mês de março de 2005 fornecidas pelo modelo BRASIL-SR, e pela interpolação de dados coletados em superfície utilizando a técnica do Kriging. De maneira geral, observa-se que os desvios médios são menores quando se compara os dados medidos nas estações com os valores estimados pelo modelo BRASIL-SR. O modelo BRASIL-SR apresentou desvios no intervalo de valores apresentados por modelos de transferência radiativa amplamente aceitos e em uso pela comunidade científica. A técnica de interpolação Kriging apresentou valores menores de desvios apenas em Votuporanga (interior de São

Paulo). Estudos mais detalhados são necessários para avaliar as causas dos desvios apresentados pelas estimativas obtidas por interpolação Kriging.

Referências

1. **MARTINS, F. R.** Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. **PhD. Thesis. INPE (Brazilian Institute of Space Research). São José dos Campos, Brasil, 2001.**
2. **GEOESTATÍSTICA. Artigos. Desenvolvido pela GPS Global. Barretos, 1997.** Apresenta textos informativos e trabalhos desenvolvidos com o uso do GPS. Disponível em: <http://www.gpsglobal.com.br/Artigos/Geoestat.html>. Acesso em: 11 nov 2006.
3. **BARROSO, L. C., BARROSO, M. M., CARVALHO, M. L. B., MAIA, M. L., Cálculo Numérico (com aplicações) – 2º edição, Editora Harbra Ltda. – São Paulo. 1987. página 151-204**
4. **DPI.** Desenvolvido pela DPI (Divisão de Processamento de Imagens) – INPE. São José dos Campos, 2004. Apresenta ajuda ao usuário na maneira como utilizar as ferramentas de Geoestatística do *Software* SPRING. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario/geoestati.htm>. Acesso em: 11 nov 2005.
5. **SILVA, S. A. B., SIMÕES, P. M., MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B.** Aplicação da geoestatística no desenvolvimento de uma base de dados climatológicos para uso no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, **Belo Horizonte, Abril 2003.**
6. **CEBALLOS, J. C.; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M.** A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research*, 109, D2, D02211 10.1029/2003JD003531, 2004.