

ESTUDO COMPARATIVO DA CONFIABILIDADE DE ESTIMATIVAS DE IRRADIAÇÃO SOLAR PARA O SUDESTE BRASILEIRO OBTIDAS A PARTIR DE DADOS DE SATÉLITE E POR INTERPOLAÇÃO/EXTRAPOLAÇÃO DE DADOS DE SUPERFÍCIE

Fernando R. Martins e Enio B. Pereira

Recebido em 30 junho, 2010 / Aceito em 17 junho, 2011
Received on June 30, 2010 / Accepted on June 17, 2011

ABSTRACT. The exploitation of solar energy is becoming cost-effective, and currently is the renewable source showing the higher growth worldwide. The knowledge of solar energy resources is essential to boost new investments in solar systems for electricity generation. The estimation of site-specific solar irradiation, where ground data are not available, can be accomplished by two approaches: interpolation/extrapolation of surface measurements acquired at neighboring stations or by radiative transfer models based on satellite images. The choice between these two approaches depends on the evaluation of their uncertainties. In this study employed solar radiation data collected by 18 automatic weather stations (AWS) located in the Brazilian southeast region to extrapolate and interpolate solar irradiation at different distances from the AWS. Statistical analysis of the deviations as a function of the distance from the closest measurement site have shown that the root mean square errors (RMSE) increase as the interpolation/extrapolation distances increases. It was found that the greater the distance between AWS's and the reference site, the higher the deviations. Comparing the extrapolation/interpolation RMSE with the RMSE observed for estimates provided by the BRASIL-SR model, it was found that only for distances less than 60 km, the methods of interpolation and extrapolation showed deviations within the range achieved by using the satellite model. Thus, it is possible to conclude that the use of satellite data and radiative transfer models represent the best solution for the assessment of solar energy further from ground radiation measurement sites.

Keywords: solar radiation, interpolation, extrapolation, remote sensing, numeric modeling, radiative transfer.

RESUMO. O aproveitamento da energia solar vem se tornando viável economicamente e, atualmente, é a que vem apresentando maior crescimento mundial. O conhecimento da disponibilidade de energia solar na superfície é um fator essencial para incentivar novos investimentos em sistemas de geração de energia solar. Em locais onde não existem sistemas de medida, estimativas da incidência de radiação solar podem ser realizadas por interpolação/extrapolação de medidas realizadas em estações vizinhas ou através de modelos numéricos de transferência radiativa. Ambas são formas aproximadas de estimativa, e seus empregos dependem da quantificação de suas incertezas. Neste trabalho, dados de radiação solar coletados em 18 plataformas de coleta de dados (PCDs), situadas no sudeste do Brasil, foram empregados na geração de extrapolações e interpolações considerando diferentes distâncias das PCDs. Os desvios apresentados por estas estimativas crescem com a distância, e são comparáveis com os desvios do modelo satelital de transferência radiativa BRASIL-SR apenas para distâncias inferiores a 60 km. Os métodos de interpolação/extrapolação apresentaram desvios dentro do intervalo limitado pelos desvios RMSE (*root mean square errors*) máximo e mínimo observados com o uso do modelo. Dessa forma, pode-se concluir que o uso de modelos físicos de transferência radiativa alimentados por dados de satélites representam a melhor solução para a estimativa da disponibilidade de energia solar em locais distantes das estações radiométricas.

Palavras-chave: radiação solar, interpolação, extrapolação, sensoriamento remoto, modelagem numérica, transferência radiativa.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade de energia solar é aplicável em diversas áreas da atividade humana. A seleção e o cultivo de culturas agrícolas mais adaptadas às condições de insolação de cada localidade em cada estação do ano, a otimização do conforto ambiental e eficiência energética de um edifício ou habitação são exemplos relevantes da aplicação desse conhecimento.

Na atualidade, fatores como o aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente evidenciaram a relevância dessa informação impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico para a utilização de fontes alternativas de energia renováveis e que produzam pouco impacto ao meio ambiente (IPCC, 2007; EUREC, 2004). A energia solar vem se apresentando como uma fonte alternativa de energia viável técnica e economicamente (Pereira et al., 2008). O custo ainda elevado da energia solar, que se apresenta como principal desvantagem na atualidade, vem sendo reduzido rapidamente e estudos indicam que até meados desta década estará competitivo com o custo das formas convencionais de produção de energia (Pitz-Paal et al., 2005; EREC/Greenpeace, 2008; Viebahn et al., 2008). Além disso, o aproveitamento da energia solar traz benefícios relevantes como o aumento da segurança energética do sistema brasileiro (Goldemberg & Villanueva, 2003; Martins et al., 2008; Pereira et al., 2008; Rütther et al., 2008; Viana et al., 2011); e a melhoria das condições sociais da população do país, principalmente, as populações de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é proibitivo (Martins et al., 2008).

No entanto, um fator essencial para o desenvolvimento de projetos para utilização deste potencial é o conhecimento da disponibilidade desse recurso energético. Um grande esforço científico vem sendo desenvolvido na última década por diversos grupos de pesquisa brasileiros para reduzir a barreira por falta de informações cientificamente confiáveis do potencial energético disponível no território nacional. Esse esforço resultou na publicação de mapeamentos do potencial solar com diferentes resoluções espaciais utilizando diferentes metodologias como o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2006), o Atlas Solarimético do Brasil: Banco de dados terrestres (Tiba, 2001), e de diversos estudos publicados (Mota & Beisdorf, 1971, 1977; Villa Nova & Sallati, 1977; Nunes et al., 1978; Funari, 1983; Macagan et al., 1987; Gallegos, 1996; Ceballos et al., 2004; Martins et al., 2008, Souza et al., 2008).

Esses estudos fornecem uma indicação da disponibilidade de energia solar para uma região, mas apresenta incertezas decorrentes da metodologia adotada e da resolução espacial em que

foram realizados. Certamente, a estimativa mais precisa do potencial energético solar para um local específico é determinada com a instalação de piranômetros na área de interesse para o desenvolvimento de um projeto de exploração do recurso solar. No entanto, o custo de instalação e operação de um sensor ou uma rede de sensores pode dificultar ou até inviabilizar o desenvolvimento de projetos. Como alternativa, pode-se adotar duas abordagens para suprir as informações necessárias para locais que não dispõem de medidas de radiação: a interpolação/extrapolação de dados medidos por estações próximas; ou o emprego de modelos numéricos para estimar a irradiação solar incidente na superfície.

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 cresce, aumentam também os erros da estimativa, uma vez que a incidência de radiação depende das propriedades óticas da atmosfera (especialmente a cobertura de nuvens) que podem apresentar uma variabilidade significativa para esses pontos. Considerando a variabilidade da cobertura de nuvens, por exemplo, dois locais podem receber intensidades de radiação muito 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 do relevo, 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 elevadas (poucos minutos ou algumas horas), mas, em geral, acarretam apenas diferenças pequenas 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 ponderada dos dados coletados nas *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, utiliza-se uma amostra mais representativa da variação espacial da incidência de radiação.

A aplicação das técnicas de extrapolação e interpolação depende da disponibilidade de dados históricos de irradiação solar na superfície no Brasil que está restrita principalmente a estações meteorológicas operadas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia – www.inmet.gov.br), CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – www.cptec.inpe.br) e Centro Estaduais de Meteorologia (atualmente em parceria com o Centro Regional de Natal (CRN/INPE), <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD/>), DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo – www.decea.gov.br). Os dados coletados pelo INPE/Centros Estaduais estão acessíveis na internet desde a instalação da rede, em 1998. A rede automática do INMET opera desde 2004 e seus dados podem ser acessados diretamente pela internet para os últimos 90 dias, e por solicitação para datas anteriores. Os dados dessas redes estão disponíveis para o usuário sem custos adicionais. A única rede de estações de coleta de dados em superfície para o monitoramento de dados meteorológicos dedicada para o setor energético é a rede SONDA operada pelo INPE. A rede SONDA possui poucas estações distribuídas pelo território nacional com o intuito de prover dados de superfície de qualidade para desenvolvimento de modelos numéricos e validação das estimativas por eles fornecidas. A rede SONDA utiliza equipamentos de primeira linha para a aquisição de dados de irradiação solar e segue os procedimentos definidos pela *World Meteorological Organization* (WMO) para a *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) no que tange a padrões de qualidade de aquisição/qualificação e disponibilização dos dados (www.sonda.ccst.inpe.br).

Em função da grande extensão territorial do Brasil, a distribuição espacial das estações não apresenta uma boa uniformidade por todo o território. Além disso, os custos de manutenção e operação de grandes redes são elevados e muitas vezes os dados armazenados apresentam desvios elevados em relação aos valores reais em virtude de problemas decorrentes da necessidade de manutenção corretiva não realizada.

Finalmente, os modelos numéricos utilizados para estimar a irradiação solar na superfície podem ser baseados em um método estatístico (modelos estatísticos) que adotam expressões empíricas estabelecidas em função de alguma propriedade do sistema Terra-Atmosfera ou utilizar parametrizações dos processos físicos na atmosfera para a solução numérica da equação de transferência radiativa (modelos físicos). Diversos estudos foram publicados nos últimos anos sobre o desenvolvimento e aplicação de modelos numéricos para o território brasileiro (Ceballos et al., 2004; Martins et al., 2008; Souza et al., 2008; Ceconi et al., 2011). Os modelos estocásticos apresentam validade restrita

à região para a qual as expressões empíricas foram desenvolvidas. Apesar da generalidade espacial dos modelos físicos, estes necessitam de informações confiáveis sobre as condições atmosféricas para fornecer estimativas precisas da irradiação solar incidente. Nem sempre tais informações estão disponíveis ou apresentam a confiabilidade esperada para obtenção de estimativas precisas. Além disso, em algumas situações torna-se necessário adaptações na modelagem de alguns processos físicos a fim de que a influência de fenômenos característicos de determinadas regiões ou períodos sazonais, como por exemplo a queima de biomassa durante a estação seca nas regiões Norte e Centro-Oeste brasileiras, possam ser levadas em consideração na obtenção das estimativas de irradiação solar incidente (Martins, 2001).

Neste trabalho, medidas de irradiação solar na superfície realizadas por uma rede de estações de superfície são empregadas na obtenção de estimativas de total diário de irradiação solar por meio de extrapolações e interpolações. O objetivo foi avaliar os como os desvios variam com o aumento da distância entre o local de interesse e as estações de superfície empregadas para determinação das estimativas e avaliar a distância máxima em que os desvios obtidos são inferiores aos desvios apresentados pelas estimativas fornecidas pelo modelo numérico de transferência radiativa BRASIL-SR. Estudo similar foi desenvolvido por Perez et al. (1997) comparando os desvios das duas metodologias para um pequeno conjunto de estações no Nordeste dos EUA. O estudo indicou que nos casos em que as distâncias entre os piranômetros de uma rede de observação forem superiores a aproximadamente 50 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.

METODOLOGIA

Dados de campo

Dados de Plataformas de Coleta de Dados meteorológicos (PCDs) operadas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) na região Sudeste do Brasil foram empregados para o desenvolvimento deste trabalho. Os satélites de coleta de dados (SCDs) operados pelo INPE são responsáveis pela transferência dos dados coletados nas PCDs para o Centro Regional do Nordeste (CRN/INPE) responsável pela recepção e processamento dos dados das PCDs. Os dados coletados estão disponíveis para acesso público em www.sinda.crn2.inpe.br/PCD/. Considerando os aspectos relativos à dificuldade de manutenção

Tabela 1 – Descrição e coordenadas geográficas das PCDs apresentadas na Figura 1.

ID	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	32334	Araxá	MG	-19,64°	-46,97°	1091
5	32502	Araçuaí	MG	-16,84°	-42,07°	519
6	32503	Montes Claros	MG	-16,75°	-43,89°	701
7	32505	Paracatú	MG	-17,25°	-46,89°	625
8	32506	Andrequicé	MG	-18,28°	-44,99°	808
9	32519	Nanuque	MG	-17,82°	-40,32°	104
10	31973	São Carlos	SP	-22,17°	-47,89°	753
11	31977	Itu	SP	-23,29°	-47,29°	626
12	31979	Garça	SP	-22,23°	-49,64°	682
13	31980	Presidente Prudente	SP	-22,17°	-51,37°	489
14	32464	Barretos	SP	-20,58°	-48,59°	549
15	32520	Cunha	SP	-23,07°	-44,95°	950
16	32521	Caraguatatuba	SP	-23,69°	-45,43°	3
17	32533	Silveiras	SP	-22,804°	-44,84°	1219
18	32766	Cachoeira Paulista	SP	-22,675°	-45,01°	563

da rede de coleta de dados, foi empregado um processo de qualificação dos dados coletados nas PCDs similar ao adotado para estações participantes da BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*) coordenado pela WMO (*World Meteorological Organization*) (McArthur, 2004). A adoção desse procedimento resultou na seleção das 18 estações utilizadas neste estudo. As PCDs selecionadas dispõem de sensores para dados meteorológicos básicos (temperatura, umidade, pressão, entre outros) e um piranômetro LICOR para medida da irradiação solar global incidente. A Tabela 1 apresenta a lista das PCDs utilizadas neste estudo com sua localização e altitude em relação ao nível do mar. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das PCDs selecionadas na região de interesse para este estudo. A Figura 2 apresenta um diagrama em blocos dos testes de qualificação empregados neste controle de qualidade.

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados dados relativos ao mês de março/2005 (31 dias). As integrais diárias da irradiação solar observada nas 18 PCDs foram empregadas na realização de estimativas por extrapolação e interpolação com o intuito de analisar a distância máxima entre o local de interesse e a estação de coleta de dados mais próxima para que esses métodos produzam estimativas mais acuradas que estimativas produzidas pelo modelo BRASIL-SR para o ponto de grade com resolução espacial de 10 km onde a posição de interesse está localizada.

Estimativas do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da irradiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com dados observados por satélites geoestacionários. O modelo assume três hipóteses básicas para determinação das estimativas do fluxo de radiação solar por unidade de área: (a) a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica de modo que valores climatológicos das variáveis atmosféricas (temperatura do ar na superfície, albedo de superfície, visibilidade atmosférica e umidade relativa) são utilizados para estimar as demais propriedades óticas da atmosfera; (b) o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas: céu claro e céu completamente encoberto; e (c) a existência de uma relação linear entre o fluxo de radiação solar na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera. Dessa forma, a irradiância solar global incidente na superfície, Φ_g , pode ser obtida a partir de:

$$\Phi_g = \Phi_0 \left\{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud})(1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \right\} \quad (1)$$

onde Φ_0 é a irradiância solar no topo da atmosfera, τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de



Figura 1 – Localização das 18 PCDs da região Sudeste do Brasil selecionadas para a realização deste estudo.

céu claro e completamente nublado, respectivamente. As transmitâncias τ_{clear} e τ_{cloud} são obtidas por meio da solução da equação de transferência radiativa em 30 camadas atmosféricas. As parametrizações dos processos radiativos na atmosfera adotados pelo modelo estão descritas detalhadamente em Martins (2001). A variável C_{eff} representa a cobertura efetiva de nuvens obtida a partir da expressão (2). O valor de C_{eff} pondera a transmitância radiativa da atmosfera entre as duas situações extremas de nebulosidade: céu claro e céu totalmente encoberto.

$$C_{eff} = \frac{(L - L_{clear})}{(L_{clear} - L_{cloud})} \quad (2)$$

onde L representa a radiância na faixa do visível medida pelo satélite para um pixel específico da imagem. L_{clear} e L_{cloud} representam os valores de radiância observados para o mesmo pixel em situação de céu claro e céu encoberto, respectivamente. Os valores de L_{clear} e L_{cloud} são determinados estatisticamente a partir da análise das imagens do satélite para o período do mês de março/2005. O procedimento detalhado para obtenção dos valores de L_{clear} e L_{cloud} pode ser encontrado em Martins (2001). O valor de C_{eff} não sofre a influência da

calibração ou degradação do imageador instalado no satélite uma vez que a degradação afeta de forma idêntica as observações em qualquer condição de nebulosidade. A Figura 3 apresenta um diagrama em blocos do modelo BRASIL-SR.

Estudo de extrapolação

No estudo da extrapolação, a posição de cada uma das 18 estações foi tomada como *local de referência* para os quais estimou-se a irradiação solar considerando cada uma das demais 17 estações de coleta de dados como o local de observação mais próximo. Em resumo, foram obtidas 17 estimativas do total diário de irradiação solar para cada local de referência. Cada estimativa foi obtida tomando diretamente o valor do total diário observado na estação extrapoladora.

O método é bastante simples, mas pode representar as condições observadas em locais mais remotos em que apenas uma estação de medida apresenta confiabilidade dos dados adequada aos padrões adotados pela BSRN. As estimativas foram comparadas com as observações dos totais diários (M_i) realizadas na PCD presente no local de referência. O desvio $RMSE\%$ ($RMSE$

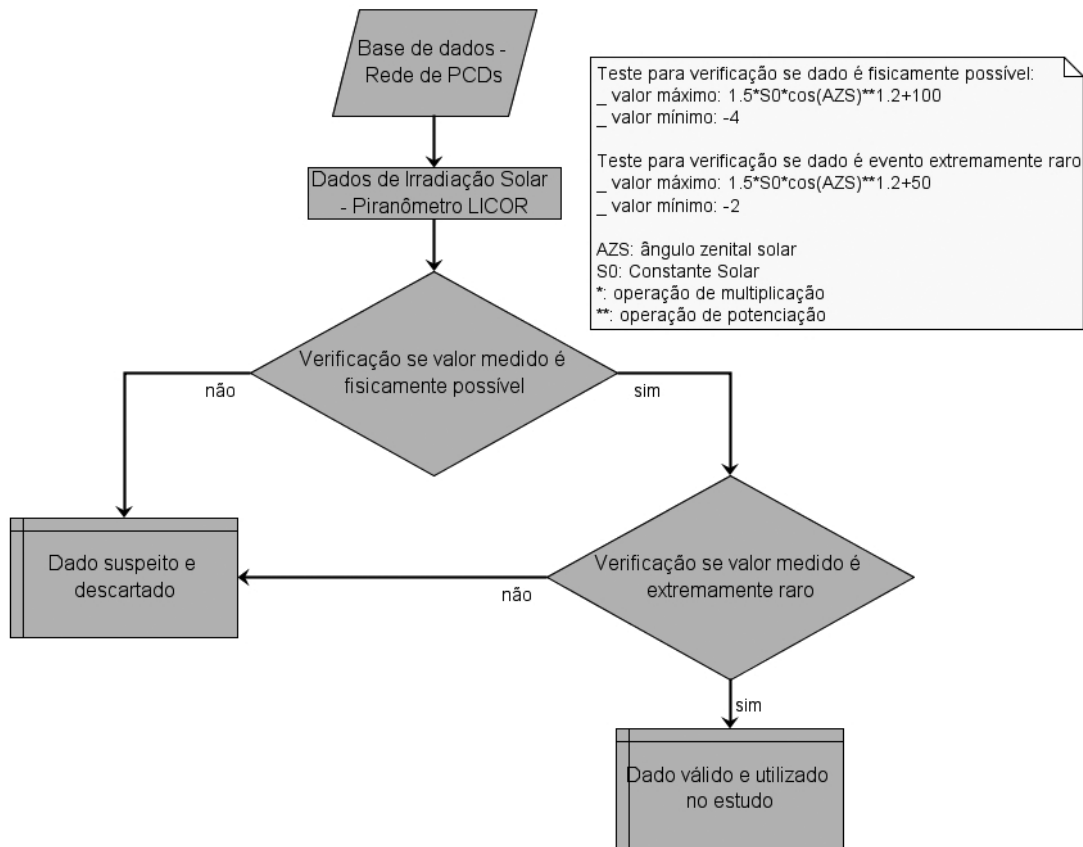


Figura 2 – Fluxograma do procedimento para controle de qualidade dos dados de irradiação solar coletados nas PCDs. Os critérios de avaliação utilizados são os mesmos adotados nos procedimentos de controle de qualidade da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) gerenciada pela *World Meteorological Organization* (WMO).

relativo), descrito pela equação apresentada em (3), foi utilizado para quantificar a confiabilidade das estimativas:

$$RMSE\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (E_j - M_j)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i)} \quad (3)$$

onde N equivale ao número de pares estimativa-medida (31 totais diários neste estudo). Dessa forma, foram calculados os desvios $RMSE\%$ de extrapolação para 18 (locais de referência) \times 17 (estações extrapoladoras) = 306 casos de estudo. Cada valor de $RMSE\%$ foi associado à distância (em km) entre o local de referência e a estação extrapoladora.

Estudo de interpolação

Como expresso anteriormente, o objetivo deste estudo é comparar os desvios encontrados nas estimativas do total de irradiação solar obtidos para um ponto de referência a partir de dados

qualificados obtidos em estações de superfície localizadas em suas proximidades. Como descrito acima, diversos fatores meteorológicos (nebulosidade, umidade relativa, perfil vertical dos constituintes atmosféricos, etc.) e ambientais (relevo, cobertura do solo, concentração de aerossóis e poluentes, etc.) apresentam influência na variabilidade da irradiação solar na superfície. As metodologias de interpolação *kriging* (Chiles & Delfiner, 1999) ou a interpolação Barnes (Barnes, 1964) não foram utilizadas uma vez que o objetivo não foi produzir um mapeamento com linhas de contorno ou geração de grades para a região do entorno do local de referência e sim comparar valores estimados e observados numa localidade específica.

Dessa forma, optou-se por um método de interpolação simples com a condição de uma estação interpoladora situada em cada quadrante em torno do local de referência como demonstrado na Figura 4. Esse procedimento foi adotado para garantir que o valor interpolado apresente uma representatividade espacial de todas as direções no entorno da localidade de referência. As estimativas consistiram na média dos valores observados nas

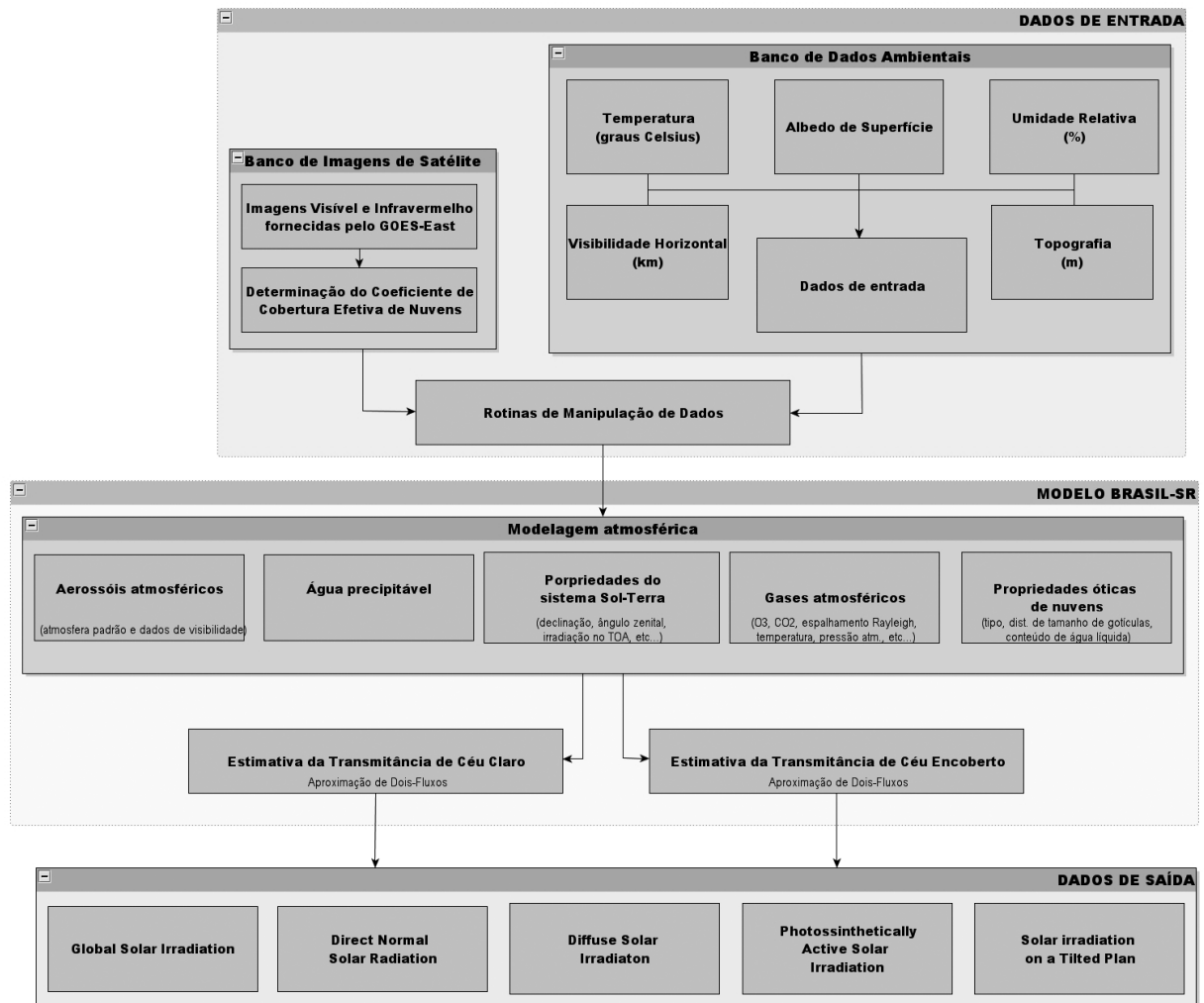


Figura 3 – Diagrama em blocos do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR.

estações interpoladoras ponderada pelo inverso do quadrado das distâncias de 4 estações interpoladoras em relação ao local de referência:

$$I_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{I_j}{d_j^2}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_j^2}} \quad (4)$$

onde I_{ref} é a estimativa interpolada para o local de referência, I_j é o total diário de irradiação solar observado na estação situada no quadrante “j” a uma distância d_j do local de referência.

Em razão desse procedimento, apenas 6 PCDs puderam ser usadas como locais de referência, uma vez que estão localizadas na área interna do polígono definido pelas PCDs para este estudo. As estações mais externas não apresentam estações vizinhas em

um ou mais quadrantes em torno delas. De forma similar ao estudo de extrapolação, foram calculados valores de $RMSE\%$ para as 16 combinações possíveis de “local de referência + conjunto de 4 estações interpoladoras”. Para cada combinação utilizada o valor de $RMSE\%$ foi determinado por meio da comparação entre as estimativas realizadas e os dados observados em campo. O valor de $RMSE\%$ obtido em cada combinação foi associado à distância entre o local de referência e a mais próxima das 4 estações interpoladoras. O uso da distância do local de referência à estação foi adotado em razão de que esta estação apresentará o maior peso no cálculo do valor estimado por interpolação. Esse procedimento não implica em perda de generalidade do estudo uma vez que esta associação não resulta em perda de informação ou em distorção da análise dos resultados obtidos se a distância média ponderada fosse adotada em seu lugar.

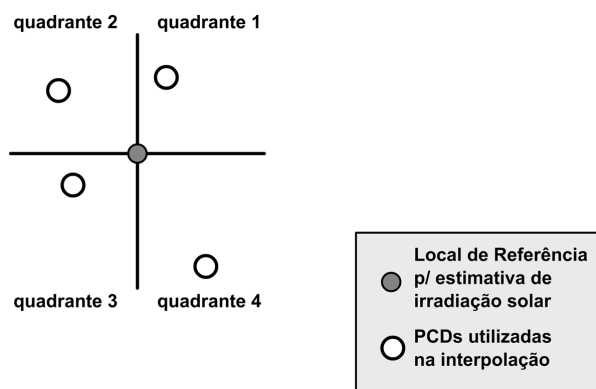


Figura 4 – Diagrama representando a distribuição de PCDs para a realização do procedimento de interpolação para estimativa de irradiação solar. A interpolação é realizada apenas se há uma PCD em todos os quatro quadrantes.

Estudo com modelo BRASIL-SR

O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR foi executado para a área de estudo delimitada na Figura 1 utilizando imagens do satélite GOES na resolução horizontal de 4 km \times 4 km. Os dados climatológicos de temperatura, albedo de superfície, umidade relativa para o mês de março foram utilizados para alimentar o modelo. Os valores de cobertura efetiva de nuvens foram determinados para cada uma das imagens do satélite disponíveis em resolução semi-horária. As integrais diárias foram determinadas pelo somatório do produto entre as estimativas obtidas para cada imagem multiplicada pelo intervalo de tempo entre imagens consecutivas. Nenhum dos dias do período considerado no estudo apresentou menos do que cinco imagens de satélite.

A comparação entre as estimativas e os valores observados foi realizada tomando o valor estimado para o ponto de grade no qual as PCDs estão localizadas. Os valores de RMSE relativo foram obtidos seguindo o mesmo procedimento adotado para as estimativas por interpolação e extrapolação.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 5 apresenta o comportamento dos desvios $RMSE\%$ obtidos nos estudos de extrapolação e interpolação em função da distância entre os locais de referência e a PCD representativa do procedimento utilizado para obtenção da estimativa conforme descrito na metodologia. Como esperado, as estimativas de irradiação solar obtidas por interpolação de quatro PCDs apresentaram desvios $RMSE\%$ menores do que aquelas obtidas por extrapolação para as distâncias similares em relação ao ponto de referência para estimativa.

Os desvios apresentados pelas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR não podem ser apresentadas da mesma forma

uma vez que para o estudo com o modelo não há uma distância que possa ser utilizada como referência. A Tabela 2 resume os desvios $RMSE\%$ apresentados pelas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR em cada uma das 18 PCDs. A Figura 6 apresenta um gráfico de dispersão entre valores estimados e observados nas 18 PCDs e a distribuição de frequências dos desvios das estimativas produzidas pelo modelo numérico.

Tabela 2 – Valores de $RMSE\%$ obtidos para as estimativas das integrais diárias de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para as 32 PCDs utilizadas no estudo.

ID	Estação	Estado	$RMSE\%$
1	Jerônimo Monteiro	ES	15,6
2	Venda Nova do Imigrante	ES	19,4
3	Honorópolis	MG	11,4
4	Araxá	MG	12,7
5	Araçuaí	MG	18,2
6	Montes Claros	MG	16,2
7	Paracatú	MG	17,6
8	Andrequicé	MG	15,0
9	Nanuque	MG	11,7
10	São Carlos	SP	13,4
11	Itu	SP	15,8
12	Garça	SP	9,1
13	Presidente Prudente	SP	12,9
14	Barretos	SP	11,9
15	Cunha	SP	10,4
16	Caragatatuba	SP	16,6
17	Silveiras	SP	19,5
18	Cachoeira Paulista	SP	13,5

A Figura 7 permite a comparação dos desvios $RMSE\%$ de interpolação/extrapolação e o nível médio do desvio apresentado pelas estimativas realizadas com o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. As linhas horizontais representam os valores máximo, mínimo e mediano do desvio $RMSE\%$ apresentado pelas estimativas fornecidas pelo modelo de transferência radiativa. Pode-se notar que os desvios das estimativas obtidas pelas técnicas de interpolação e extrapolação encontram-se no intervalo entre os valores máximos e mínimos dos desvios apresentados pelas estimativas do modelo quando a distância é inferior a 60 km.

É importante ressaltar que a técnica de extrapolação apresentou valores fora do intervalo mesmo para distâncias inferiores a 60 km. Esse fato ocorre em função da diferença de condições entre as estações usadas para o procedimento, tais como relevo e condições de nebulosidade. A metodologia de interpolação empregada neste estudo reduziu a influência desses fatores em

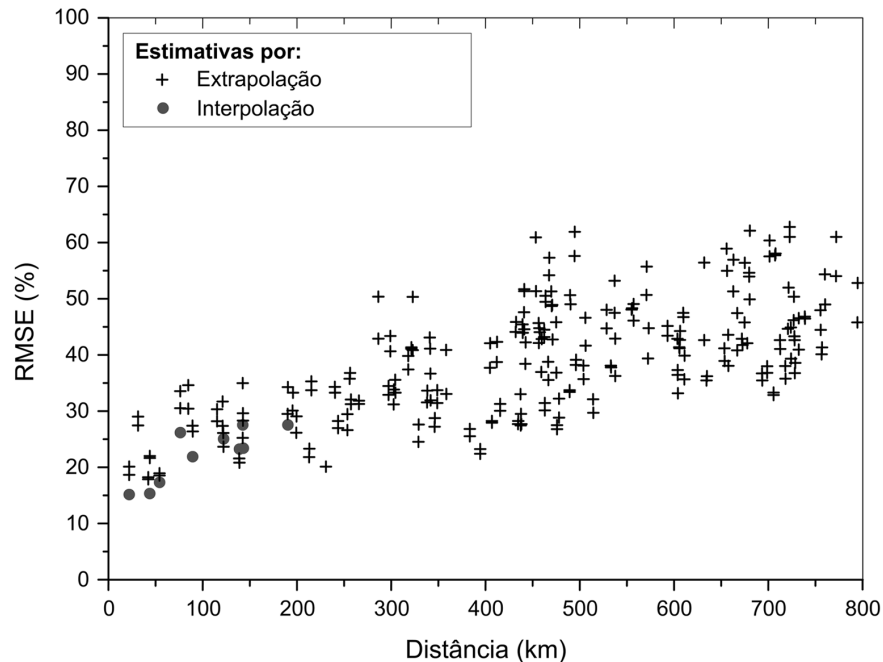


Figura 5 – Desvios $RMSE\%$ obtidos para as estimativas das integrais diárias de irradiação solar global obtidas por extrapolação (indicadas pelo sinal “+”) e interpolação (indicadas pelo sinal “•”). O eixo x representa a distância entre o local de referência e a estação extrapoladora ou estação interpoladora mais próxima.

função do uso de estações em todos os quadrantes ao redor do local de referência.

Observa-se também que em nenhum dos casos estudados neste trabalho, os métodos de interpolação ou extrapolação produziram estimativas de irradiação solar com desvios inferiores à mediana dos desvios $RMSE\%$ observados para as estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR. Analisando a Figura 7 podemos concluir que em cerca de 75% dos casos estudados neste trabalho, as estimativas do modelo BRASIL-SR apresentou desvios RMSE menores que as estimativas produzidas pelas metodologias de extrapolação e interpolação adotadas neste trabalho.

CONCLUSÕES

Com a realização deste estudo, verificou-se a dependência do desvio RMSE de estimativas produzidas por interpolação e extrapolação com relação à distância entre o local de interesse para avaliação da irradiação solar na superfície e as estações de medida empregadas para a determinação das estimativas. Verificou-se que quanto maior a distância entre o ponto de interesse e as estações utilizadas nessas metodologias, maiores são os desvios quadráticos observados. Esse fato é plenamente compreensível uma vez que o principal fator de modulação da irradiação solar na superfície é a nebulosidade que apresenta

elevada variabilidade espacial em razão de fenômenos meteorológicos característicos da região estudada.

Os resultados apresentados neste trabalho estão em acordo com as conclusões apresentadas por Perez et al. (1997). Perez e colaboradores mostraram que as estimativas de irradiação solar horária obtidas com o uso de modelos numéricos alimentados por dados de satélite apresentam menores desvios dos valores observados em superfície se a distância entre as estações de aquisição de dados em superfície for superior a 50 km.

No estudo aqui descrito, o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR apresentou desvios inferiores que os apresentados pelos métodos de interpolação e extrapolação. Verificou-se que desvios similares foram obtidos empregando uma metodologia de interpolação de dados quando a distância da estação mais próxima do local de interesse estava no intervalo de 30 a 60 km. Para o emprego da metodologia de extrapolação verificou-se também que, além da proximidade da estação, outros fatores devem ser considerados como a similaridade do relevo e uso do solo.

Este trabalho demonstra a utilidade de modelos de transferência radiativa para o setor energético, uma vez podem fornecer informações confiáveis sobre a irradiação solar na superfície utilizando dados coletados por satélites geoestacionários. Dessa forma, os modelos podem ser utilizados para o projeto, o pla-

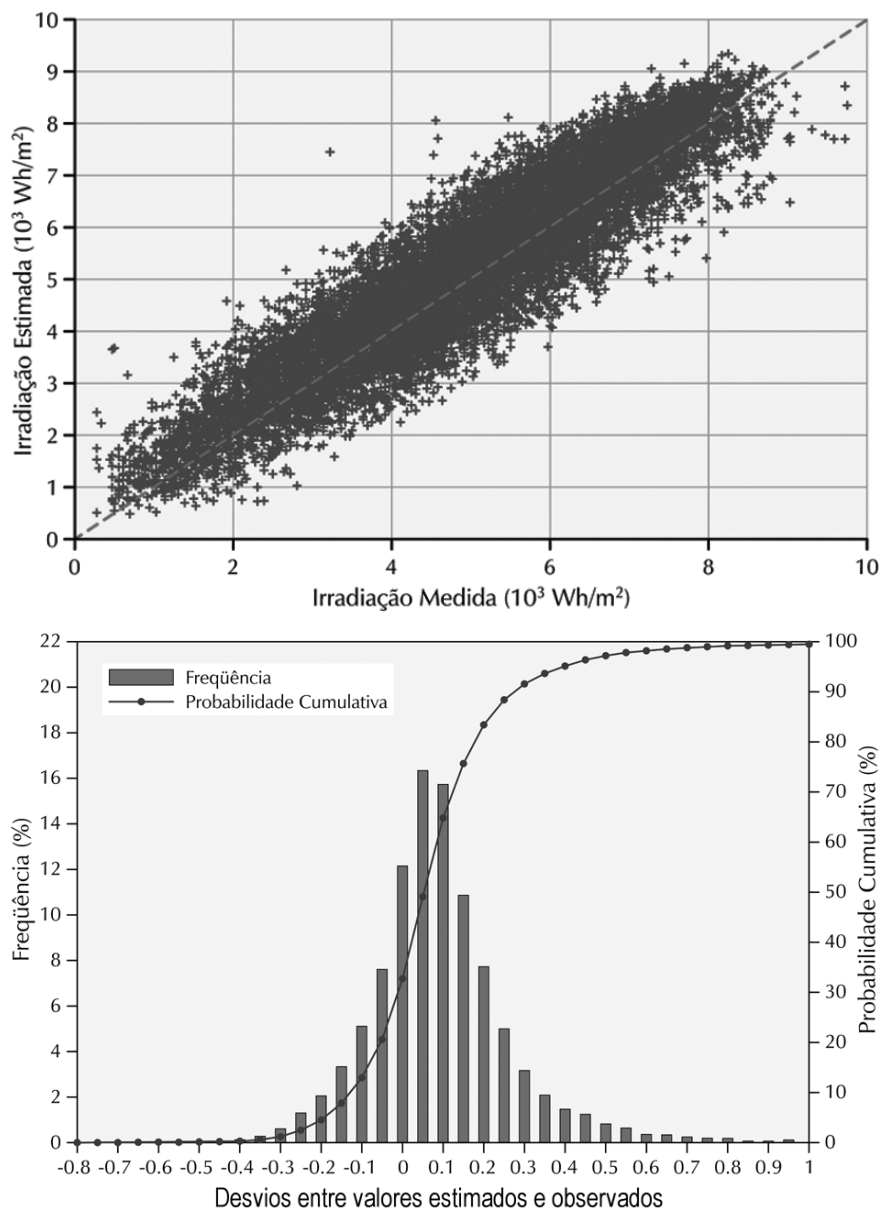


Figura 6 – Comparação entre estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR e observações de irradiação solar global para as 18 PCDs descritas na Tabela 1.

nejamento de geração e de distribuição de energia quando a exploração deste recurso energético se tornar realidade no território brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INPE em razão da disponibilização da infraestrutura necessária para a realização do trabalho, e mais especificamente à equipe do CRN pelo auxílio no acesso aos dados da rede de PCDs. Agradecimentos também devem ser

prestados à FINEP (projeto SONDA – 22.01.0569.00) e ao CNPq (processos 132148/2004-8 e 141844/2006-0) pelo suporte financeiro. Os autores agradecem aos colegas Sheila A.B. Silva e Ricardo A. Guarnieri pela valiosa contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BARNES SL. 1964. A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis. J. Appl. Meteor., 3: 396–409.

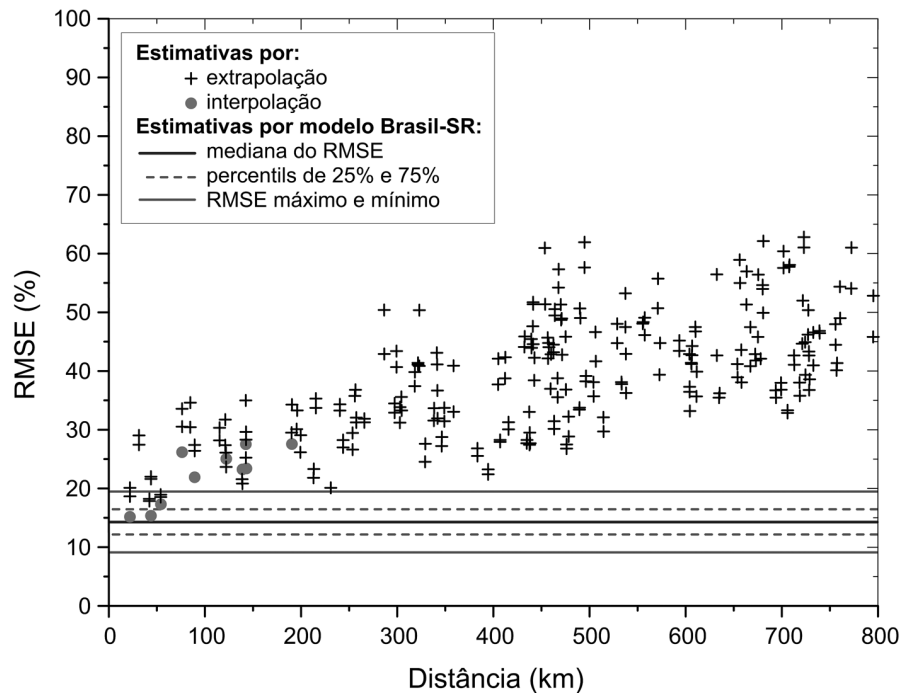


Figura 7 – Comparação entre os erros de estimativa por interpolação e extrapolação com os limites de desvios observados nas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

CEBALLOS JC, BOTTINO MJ & SOUZA JM. 2004. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *Journal of Geophysical Research*, 109(D02211), DOI: 10.1029/2003JD003531.

CECONI M, MARTINS FR, SCHUCH NJ, FAVERA ACD, LUIZ EW & PEREIRA EB. 2011. Modelagem numérica da irradiação solar como método alternativo na avaliação do potencial energético disponível. *Revista Geográfica Acadêmica*, 4(2): 41–52.

CHILES JP & DELFINER P. 1999. *Geostatistics, Modeling Spatial uncertainty*. Wiley Series in Probability and statistics. Wiley & Sons Ed., New York, USA. 720 pp.

EREC/GREENPEACE. 2008. *Energy (R)evolution. A sustainable global energy outlook*. Amsterdam. 260 pp.

EUREC (European Renewable Energy Research Centres Agency). 2004. *FP 7 Priorities of the Renewable Energy Sector*. Draft. Brussels. 60 pp.

FUNARI FL. 1983. *Insolação, radiação solar global, e radiação líquida no Brasil*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia – USP. 69 pp.

GALLEGOS HG. 1996. Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diária en América del Sur. In: *Anais do II Congresso Nacional de Energia*, La Serena, Chile, pp. 51–56.

GOLDEMBERG J & VILLANUEVA LD. 2003. *Energia, Meio Ambiente de*

São Paulo. 2 ed. rev., Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 226 pp.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: SOLOMON SD, QIN M, MANNING Z, CHEN M, MARQUIS KB, AVERYT M TIGNOR & MILLER HL (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

MACAGAN MH, ZILLES R & CORBELLS OD. 1987. *Curvas de irradiação para o Rio Grande do Sul*. *Anais do Congresso Brasileiro de Energia*, pp. 190–199.

MARTINS FR. 2001. *Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR*. Tese de Doutorado, INPE, São José dos Campos, 330 pp.

MARTINS FR, RÜTHER R, PEREIRA EB & ABREU SL. 2008. *Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications*. *Energy Policy*, 36(8): 2865–2877, DOI: 10.1016/j.enpol.2008.04.001.

McARTHUR LJB. 2004. *Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Operations Manual*. WMO/TD-No. 879, WCRP/WMO. 188 pp.

MOTA FS & BEISDORF MIC. 1971. *Novas estimativas da radiação solar sobre o sul do Brasil*. *Ciência e Cultura*, 23(5): 573–576.

- MOTA FS & BEISDORF MIC. 1977. Estimativas preliminares da radiação solar no Brasil. *Ciência e Cultura*, 29(11): 1274–1283.
- NUNES GS, ANDRÉ RGB, VIANELLO RL & MARQUES VS. 1978. Estudo da distribuição da radiação solar incidente sobre o Brasil. INPE – São José dos Campos, 45 pp.
- PEREIRA EB, MARTINS FR, ABREU SL & RÜTHER R. 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. São José dos Campos, 66 pp.
- PEREIRA EB, MARTINS FR, ABREU SL, RÜTHER R, AMARANTE O, CHAN CS & LIMA E. 2008. Solar and Wind Energy Brazilian Report. INPE, São José dos Campos, 104 pp.
- PEREZ R, SEALS R & ZELENKA A. 1997. Comparing Satellite Remote Sensing and Ground Network Measurements for the Production of Site/Time Specific Irradiance Data. *Solar Energy*, 60(2): 89–96.
- PITZ-PAAL R, DERSCH J & MILOW B (Eds.). 2005. European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping (ECOSTAR). Coordinated action sustainable energy systems SES6-CT-2003-502578. Cologne.
- RÜTHER R, KNOB PJ, JARDIM CS & REBECHI SH. 2008. Potential of building integrated photovoltaic solar energy generators in assisting daytime peaking feeders in urban areas in Brazil. *Energy Conversion and Management*, 49: 1074–1079.
- SOUZA JD, SILVA BB & CEBALLOS JC. 2008. Estimativa da radiação solar global à superfície usando um modelo estocástico: caso sem nuvens. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1): 31–44.
- VIANA TS, RÜTHER R, MARTINS FR & PEREIRA EB. 2011. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. *Solar Energy*, 85(3): 486–495, DOI: 10.1016/j.solener.2010.12.015.
- VIEBAHN P, KRONSHAGE S, TRIEB F & LECHON Y. 2008. Final Report on Technical Data, Costs, and Life Cycle Inventories of Solar Thermal Power Plants. DLR. 95 pp.
- VILLA NOVA NA & SALLATI E. 1977. Radiação solar no Brasil. In: Anais do I Simpósio Anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, pp. 27–61.
- TIBA C (Coord.). 2001. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. Editora Universitária da UFPE, Recife, PE, 111 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Fernando Ramos Martins. Bacharel em Física pela Universidade de São Paulo (1986), Mestre em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (1992) e doutorado em Geofísica Espacial pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2001). Desenvolveu atividades de pesquisa no *GKS Institute* (Alemanha) e no Departamento de Meteorologia da Universidade de Maryland (UofMD). Atualmente, atua como pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nos últimos anos vem participando de projetos de pesquisa desenvolvidos em colaboração com instituições de pesquisa nacionais e internacionais, dentre eles o Projeto SWERA (<http://swera.unep.net/swera/>) financiado pelo UNEP (*United Nation Environmental Program*) e o Projeto SONDA (www.ccst.inpe.br/sonda) financiado pela PETROBRAS e FINEP. Tem desenvolvido trabalhos e atividades de pesquisa com foco nas seguintes áreas: sensoriamento remoto, energia renováveis, sistemas de informação geográfica. Possui experiência profissional em pesquisa nas áreas de proteção radiológica individual e ambiental, modelagem atmosférica e em levantamento de recursos energéticos renováveis. É revisor de periódicos nacionais e internacionais como *Energy*, *Solar Energy*, *Energy Policy* entre outros.

Enio Bueno Pereira. É graduado em Física pela Universidade de São Paulo (1973), mestrado em Geofísica pela Universidade de São Paulo (1977) e doutorado em Geociências pela *Rice University*, nos Estados Unidos (1980). Realizou estágios de pós-doutorado nos Estados Unidos e na França. Foi professor no Instituto Astronômico e Geofísico da USP entre 1972 e 1981 e atualmente é pesquisador titular sênior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais tendo ocupado vários cargos de chefia nesta instituição. Atuou em pesquisas sobre traçadores atmosféricos na Antártica desde o início do PROANTAR, participando de diversas missões, inclusive de invernção naquele continente em 1990, além de ter sido membro do CONAPA (Comitê de Pesquisas Antárticas do MCT) e delegado brasileiro em sucessivas reuniões do SCAR (*Scientific Committee on Antarctic Research*). Atualmente concentra suas atividades na área de Ciências do Sistema Terrestre, com ênfase em estudos de levantamentos de recursos de energias renováveis e os impactos das mudanças climáticas. Outras áreas de atuação são: sensoriamento remoto da atmosfera, radiação solar, aerossóis, radioatividade e traçadores atmosféricos e desenvolvimento de instrumentação. Faz parte dos corpos docentes de pós-graduação em Meteorologia e do curso de Ciências do Sistema Terrestre, ambos no INPE. É líder de diversos projetos e convênios de P&D com financiamentos nacionais e internacionais e coordena a linha de pesquisa de Energia e Recursos Renováveis no Centro de Ciência do Sistema Terrestre do INPE.