



DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR NA AMÉRICA DO SUL

Maurício Roriz (1); Joaquim C. P. dos Santos (2)

(1) Universidade Federal de São Carlos. Rodovia Washington Luís, Km 235. São Carlos, SP. Brasil.
CEP 13565-905. E-mail: m.roriz@terra.com.br

(2) Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Camobi. Santa Maria, RS. Brasil.
CEP 97119-900. E-mail: joaquim@smail.ufsm.br

RESUMO

Apresenta-se um mapeamento de médias mensais de irradiância solar global sobre plano horizontal para toda a América do Sul, elaborado a partir de dados registrados em 1037 estações terrestres e da aplicação de técnicas de interpolação geográfica. Foram obtidas aproximações bastante satisfatórias entre valores interpolados e dados medidos. Os resultados permitem estimar a irradiância global, direta ou difusa sobre um plano qualquer, para qualquer intervalo de tempo e para qualquer ponto do território sulamericano.

ABSTRACT

This paper presents maps of monthly averages global solar irradiances on horizontal plan for South America, elaborated from data registered in 1037 terrestrial stations and the application of geographical interpolation techniques. Were found quite satisfactory agreement between interpolated values and measured data. The results allow to estimate the global, direct or diffuse irradiance on any plan, for any interval of time and for any point of the studied territory.

1 INTRODUÇÃO

Diversas áreas de estudo, como energia, agricultura e outras, necessitam dados sobre os níveis de Irradiância Solar na superfície da terra. No projeto arquitetônico, dados de radiação são fundamentais para a previsão de ganhos de calor e da disponibilidade de luz natural nos ambientes internos e para o entendimento dos processos climáticos em espaços urbanos. Valores de irradiância solar global sobre superfície horizontal é a informação utilizada para estimar-se as irradiancias direta e difusa para diferentes inclinações e orientações, adotando-se médias horárias, diárias ou mensais de acordo com o grau de detalhamento desejado. Os valores de irradiancias, em alguns casos, são estimadas a partir de outras variáveis, como a nebulosidade ou, se possível, o número de horas diárias de insolação (Duffie e Beckman, 1974; Muneer, 1997).

Vastas regiões da América do Sul não dispõem de sistemas regulares de registro de irradiância solar. Além desse fato, os raros dados medidos não são facilmente disponíveis para o público. Preocupada com essa grave lacuna, a OLADE Organização Latino-americana de Energia (1987) publicou algumas tabelas compiladas de diversas fontes. Pelos mesmos motivos, muitos pesquisadores têm procurado desenvolver ou adaptar métodos para interpolação geográfica dessa variável. No Brasil, podem-se mencionar os trabalhos de Vila Nova e Salatti (1977), Nunes et al (1978), Pereira et al (1996).. Na Argentina, destacam-se os estudos coordenados por Grossi Gallegos (1998a, 1998b, 1999). Righini e Gallegos utilizaram dados medidos por satélite (2001), ou horas de insolação (2003), para obter mapas solarimétricos das regiões estudadas. Metodologia semelhante tem sido utilizada para a elaboração de atlas de alguns países sul-americanos, como a Colômbia (Sánchez, 1993) e o Peru (SENAMHI, 2003).

Para a utilização de dados de satélite é fundamental o conhecimento do comportamento espectral dos objetos da superfície terrestre e dos fatores que interferem neste comportamento, tanto para extração de informações como para definição de sensores, do tipo de pré-processamento ou da forma de aquisição dos dados. Além disso, para uma maior correção nos dados de satélite são necessários dados de terra para ajuste dos resultados. Dessa maneira, na confecção desse tipo de mapa a utilização de dados de estações de superfície, quando disponíveis, apresenta vantagens em relação aos dados obtidos por satélite (CROCE, 2004).

Este artigo descreve os procedimentos adotados para gerar um mapa solarimétrico de médias mensais de irradiância global sobre plano horizontal, para qualquer ponto da América do Sul, a partir de dados de 1037 estações climatológicas (Tabela 1 e Figura 1), por meio de duas etapas complementares de interpolação. Na seqüência do estudo, serão elaborados métodos de cálculo dos valores horários de radiação solar, direta e difusa, para quaisquer inclinações e orientações. As principais fontes de obtenção desses dados foram o World Radiation Data Centre (WRDC, 2003), o Departamento de Engenharia Solar da Universidade de Massachusetts (UML, 2003) e o Centro de Estudos da Energia Solar, em Sevilla, Espanha (Censolar, 1993).

Tabela 1: Estações com dados medidos de Irradiância Global sobre Plano Horizontal (Glb), Horas de Insolação (Ins), ou outros parâmetros (Div)

País	Glb	Ins	Div	Soma
Argentina	51	65	21	137
Bolívia	6	14	8	28
Brasil	364	39	-	403
Chile	86	-	-	86
Colombia	3	88	-	91
Ecuador	6	58	5	69
Guiana Francesa	1	-	-	1
Guiana	3	13	1	17
Paraguai	2	15	-	17
Peru	22	53	-	75
Suriname	-	19	-	19
Uruguai	6	-	-	6
Venezuela	45	43	-	88
Totais:	595	407	35	1037



Figura 1: Localização das 1037 estações com dados medidos

2 OS PROCESSOS DE INTERPOLAÇÃO

Em uma primeira análise da base de dados, observaram-se diferenças significativas e pouco justificáveis entre irradiâncias de estações muito próximas e com altitudes semelhantes. Entre as causas dessas diferenças podem estar a imprecisão dos equipamentos, desvios inerentes ao processo de leitura, tratamento dos dados, etc. No entanto, todo o processo de interpolação de variáveis climáticas supõe certo grau de homogeneidade ao longo do território, sem que haja mudanças bruscas entre pontos próximos. Para atenuar essa distorção, adotou-se um primeiro procedimento de interpolação, envolvendo apenas valores dentro de uma área limitada, no entorno do ponto a ser determinado. Os valores obtidos foram novamente interpolados, sem limitação de distância, de maneira a cobrir todos os pontos do mapa. Inicialmente, procurou-se incluir no método de interpolação algumas variáveis de mais fácil obtenção, como altitude, latitude e amplitudes térmicas. Não foram identificadas, no entanto, correlações consistentes entre essas variáveis e as irradiâncias medidas.

2.1 Método IQD de Interpolação Espacial

O Inverso do Quadrado da Distância (IQD) é uma técnica para interpolar atributos climáticos de um lugar, a partir de valores conhecidos dos mesmos atributos em lugares próximos (Roriz 2002). Como exemplo de aplicação, suponha-se que sejam conhecidas as irradiâncias dos pontos 1 a 5 (Figura 2) e que se pretenda interpolar a irradiância do ponto "A". A tabela 2 mostra as irradiâncias dos 5 pontos e suas respectivas distâncias ao ponto "A".

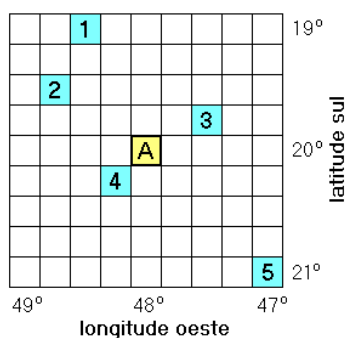


Fig. 2: Posição dos pontos do exemplo

Tabela 2: Dados do exemplo de interpolação por IQD

Ponto	Latit. (graus)	Longit (graus)	Distância (graus)	Irrad. (kWh/m ²)
1	19.00°	48.50°	1.118	182
2	19.50°	48.75°	0.901	156
3	19.75°	47.50°	0.559	183
4	20.25°	48.25°	0.354	176
5	21.00°	47.00°	1.414	177
A	20.00°	48.00°	-	?

A irradiância em A é calculada pela equação 1.

$$I_A = \frac{\sum_{i=1}^{np} (I_i \cdot 1/d_i^2)}{\sum_{i=1}^{np} (1/d_i^2)} \quad \text{[Equação 1]}$$

I_A = valor interpolado da irradiância em A

I_i = irradiância em i (i variando entre 1 e np)

np = total de pontos com dados medidos

d_i = distância entre os pontos A e i.

Tabela 3: Exemplo do cálculo de interpolação por IQD

Ponto	Irrad.	Distância	$I_i \cdot 1/d_i^2$	$1/d_i^2$
1	182	1.118	145.6	0.8
2	156	0.901	192.0	1.2
3	183	0.559	585.6	3.2
4	176	0.354	1408.0	8.0
5	177	1.414	88.5	0.5
somas:			2419.7	13.7

Pela Equação 1, calcula-se o valor interpolado da irradiância em A: $I_A = 2419.7 / 13.7 = 176.6$

2.2 Primeira Etapa da Interpolação

A primeira interpolação teve três finalidades:

a) Fazer com que as micro-regiões que abrangiam mais de uma estação passassem a apresentar um único valor, calculado a partir da média dos valores medidos.

b) Gerar uma rede regular, com maior número de pontos, a partir da amostra irregularmente distribuída de medições.

c) Suavizar no mapa a variabilidade provocada por desvios que podem ocorrer nas medições ou no tratamento dos dados. Priorizam-se, assim, as características mais abrangentes de cada micro-região, evitando-se confundir o mapa com particularidades muito locais e que provocam o chamado efeito “olho de pássaro” (Figura 3).

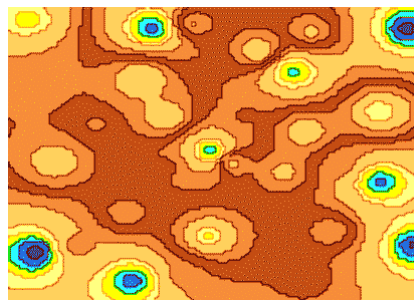


Figura 3: O efeito “Olho de Pássaro”

Nesse sentido, o mapa da América do Sul foi dividido em uma malha regular, com células quadradas de lados iguais a 0.25 graus de latitude e longitude, sendo as irradiâncias medidas vinculadas à malha em função das coordenadas geográficas de cada estação. Em seguida, foram interpoladas as irradiâncias de células espaçadas a 0.75° de latitude e longitude (Figura 4). Para cada uma dessas células, aplicou-se a equação 1 em relação aos pontos com dados medidos cujas distâncias da célula não fossem maiores que 1 grau (Fig. 5). O mapa resultante é mostrado na figura 6.

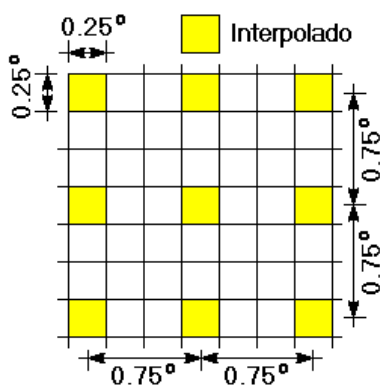


Figura 4: Células espaçadas em 0.75°

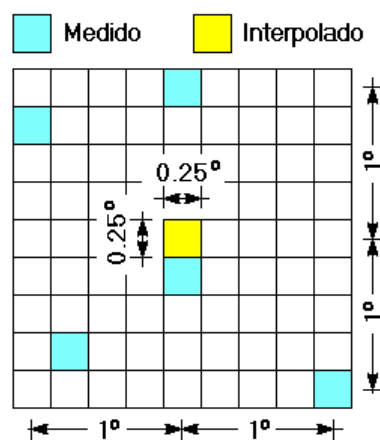


Figura 5: Exemplo de micro-região adotada nos cálculos da primeira etapa de interpolação

2.3 Segunda Etapa de Interpolação

A figura 6 mostra os pontos cujos valores foram calculados, pelo processo acima descrito, como irradiâncias médias de cada micro-região. O mapa dessa figura apresenta alguns vazios nas regiões sem dados medidos, mas boa parte dessas ocorrências corresponde a zonas com relevo e vegetação relativamente homogêneas, fato que favorece a precisão dos cálculos. O objetivo da 2ª interpolação foi preencher esses vazios, deixados pela primeira, estimando-se as irradiâncias para todos os pontos restantes da malha original, espaçados em 0.25°. Dessa vez, região em torno de cada célula foi dividida em octantes (Fig. 7). O cálculo da irradiância dessa célula central foi feito pela mesma equação 1 (IQD), mas considerando-se apenas a célula mais próxima em cada octante, dentre todas as com valores já calculado. Pressupõe-se, portanto, que pontos mais próximos sejam mais homogêneos.

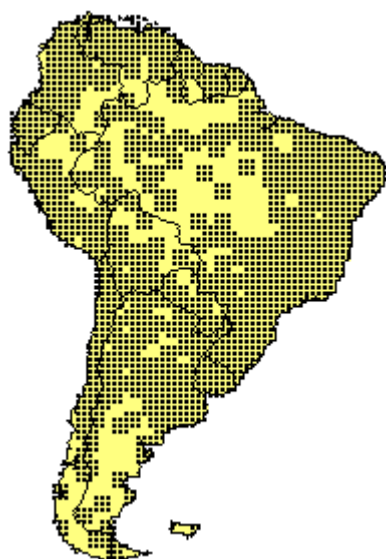


Figura 6: Primeira grade regular, com nós a cada 0.75° de latitude e longitude.

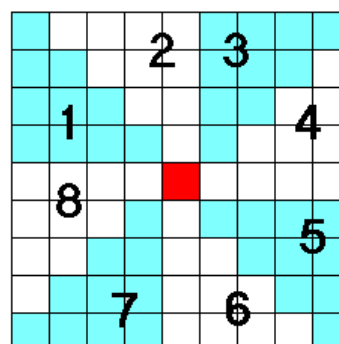


Figura 7: Divisão das micro-regiões em octantes.

3 RESULTADOS

As figuras 8 a 11 mostram exemplos dos mapas das médias mensais da irradiância global sobre plano horizontal, para março, junho, setembro e dezembro. De acordo com o tipo de aplicação pretendido, a partir do mesmo método é possível obter-se mapas mais detalhados.

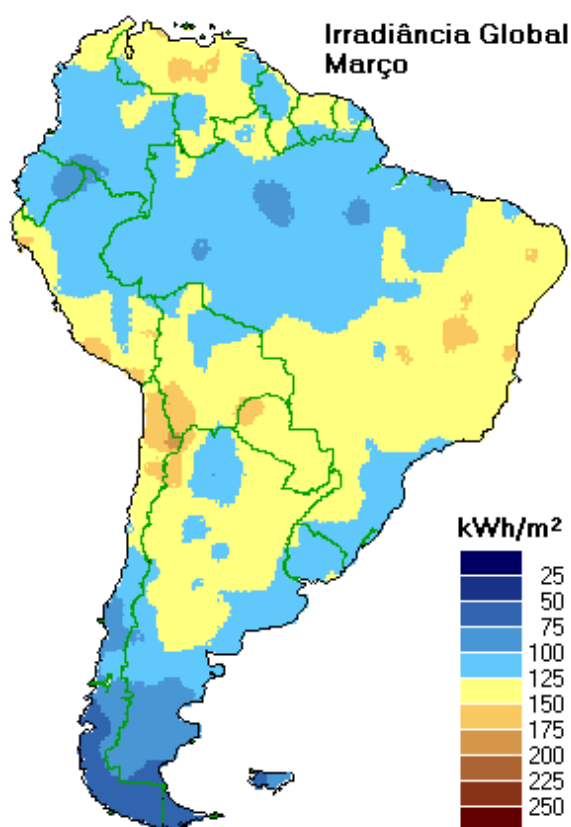


Figura 8: Irradiâncias globais em Março

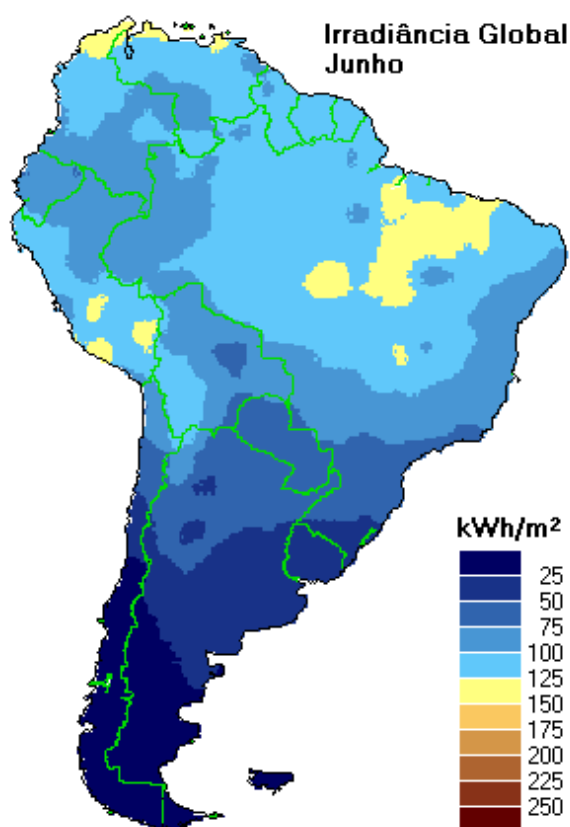


Figura 9: Irradiâncias globais em Junho

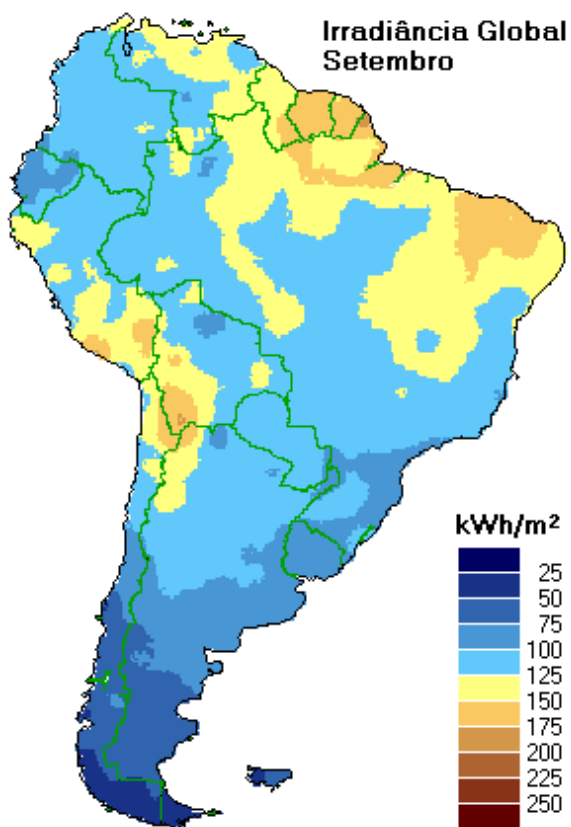


Fig. 10: Irradiâncias globais em Setembro

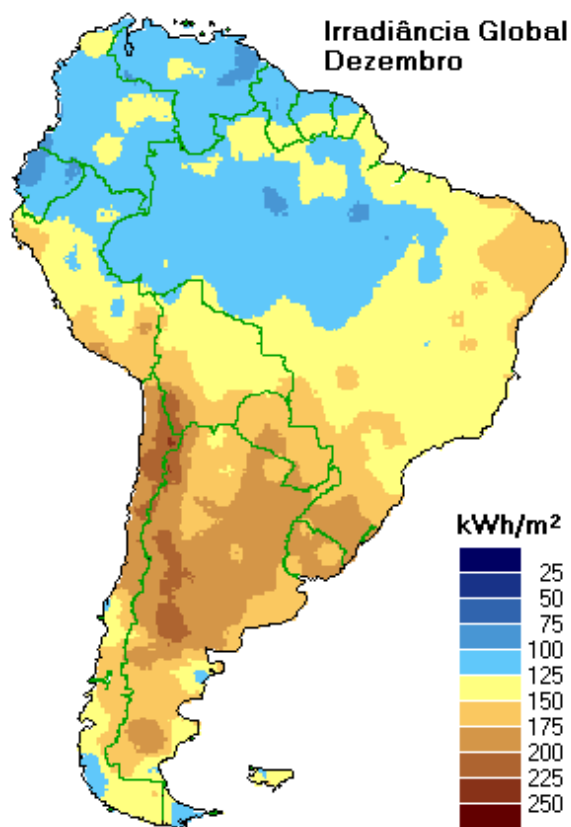


Fig. 11: Irradiâncias globais em Dezembro

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 4 e as figuras 12 e 13 apresentam os coeficientes de correlação (R) e desvios-padrão (dp) entre valores calculados e dados medidos, com aproximações bastante satisfatórias entre ambos.

Tabela 4: Correlações entre valores calculados e dados medidos.

mês	coef. correlação	desvio-padrão
mar	0.87	8.8
set	0.94	8.4

mês	coef. correlação	desvio-padrão
jun	0.97	6.9
dez	0.95	8.4

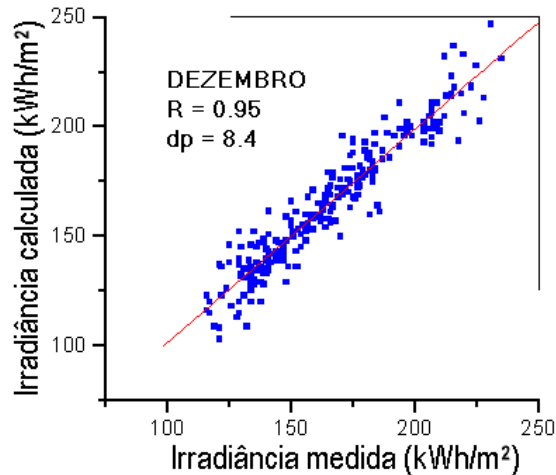
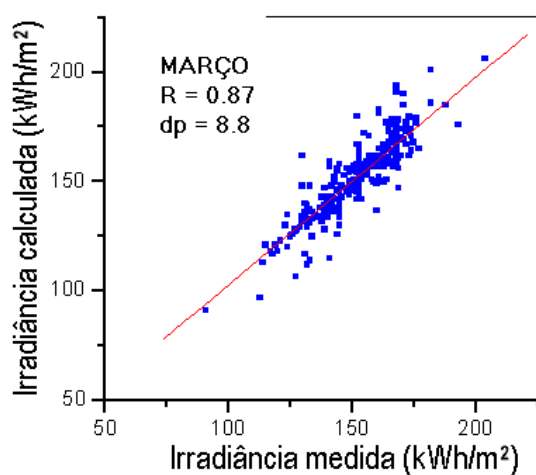


Figura 12: Valores medidos e calculados para março e junho.

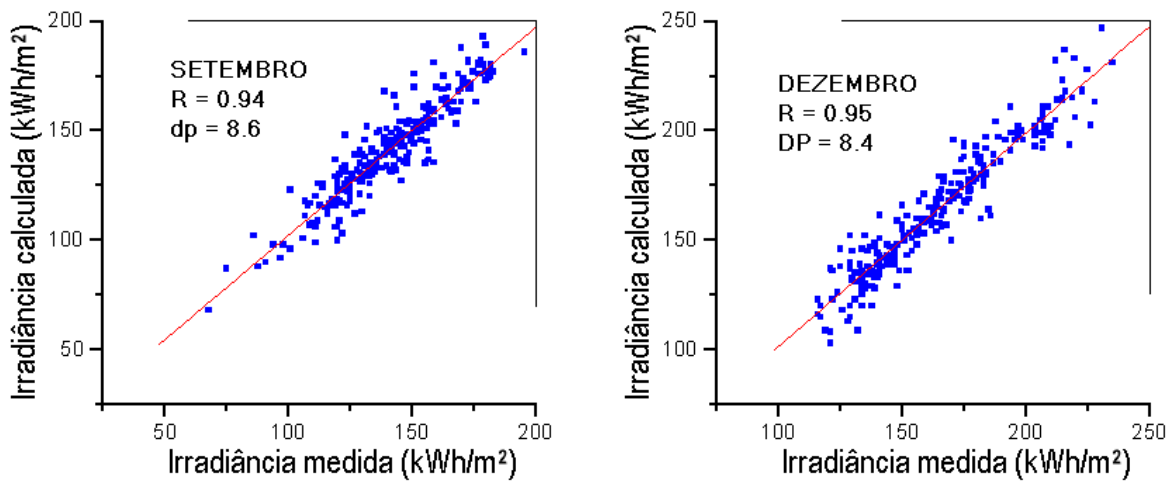


Figura 13: Valores medidos e calculados para setembro e dezembro.

Na comparação entre irradiâncias calculadas e medidas, no caso do mês de junho observou-se um coeficiente de correlação de 0.97 e desvio padrão de 6.9. Somente 13% das células com dados medidos tiveram desvios absolutos acima de 10% e apenas 5% das mesmas apresentaram desvios superiores a 15% (Figura 14a).

Para dezembro, a correlação foi de 0.95 e o desvio padrão de 8.4. Do total de células com dados medidos, em menos de 8% os desvios absolutos ultrapassaram 10% e em apenas 2% delas os desvios foram maiores que 15% (Figura 14b).

A Figura 14c corresponde a irradiâncias médias de março de 2004 (valores adaptados de CEBALLOS e BOTTINO, 2004), estimadas por técnicos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, para 80 localidades brasileiras, a partir de dados de satélite. Os desvios absolutos ultrapassaram 10% em 31% dessas localidades, desempenho bastante inferior ao obtido pelas interpolações dos dados de superfície, indicando os níveis de imprecisão que ainda existem nas técnicas baseadas em satélite.

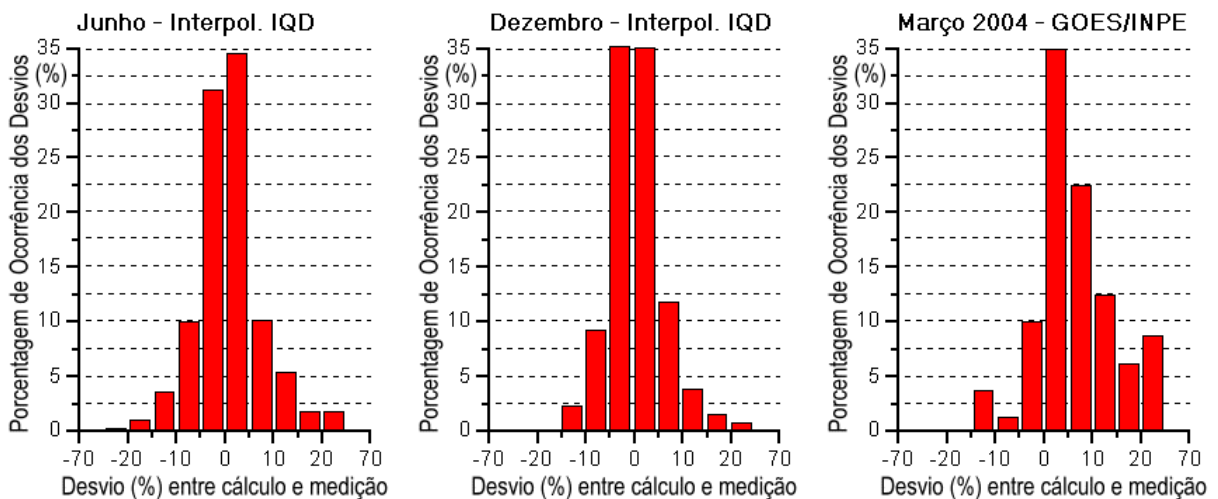


Figura 14: Distribuição dos desvios entre valores estimados e medidos.

Cabe observar que as diferenças entre os valores medidos e os calculados pela interpolação IQD não caracterizam necessariamente erros, pois resultam da intenção, explícita no método, de priorizar as características micro-regionais em detrimento de particularidades locais.

Com base nas irradiâncias obtidas, estão sendo elaboradas outras fases do estudo, uma das quais objetiva a geração de mapas das médias mensais do índice de limpidez do céu (k_t), definido pela equação 2:

$$k_t = I_{hg} / ET_{hg} \quad [\text{Equação 2}]$$

Sendo:

k_t = índice de limpidez do céu (adimensional)

I_{hg} = Irradiância horizontal global (kWh/m^2)

ET_{hg} = Irradiância horizontal global extra-terrestre (fora da atmosfera)

Este índice de limpidez do céu, por sua vez, é aplicado ao cálculo das parcelas direta e difusa da radiação solar, assim como a distribuição horária dessas parcelas sobre superfícies com quaisquer orientação e inclinação, informações necessárias a inúmeras aplicações.

5 CONCLUSÕES

Apresentou-se um método de interpolação espacial de variáveis climáticas, bem como uma aplicação do mesmo na elaboração de mapas solarimétricos da América do Sul. O algoritmo adotado, sendo relativamente simples, permitiu alcançar os objetivos pretendidos.

A utilização de um número expressivo de estações climatológicas com dados de irradiância global, ou outras variáveis climáticas que permitiram calcular esses valores, possibilitou uma interpolação de dados de superfície com desvios menores do que os observados em grande parte dos trabalhos publicados sobre o tema.

A análise dos dados originais medidos indicou diferenças sensíveis entre irradiâncias de locais situados a curta distância um do outro, fato que sugere a ocorrência de distorções em alguns sistemas de aquisição ou tratamento de dados. Optou-se, então, por usar valores médios de cada micro-região, supostos como mais representativos do que os registros particulares obtidos em uma única estação. Tais médias foram ponderadas por meio da técnica do inverso do quadrado da distância (IQD).

Tendo em vista a qualidade e a quantidade dos dados solarimétricos disponíveis na América do Sul, os resultados do modelo de interpolação apresentado parecem ser bastante satisfatórios, podendo contribuir para reduzir a lacuna de informações nessa área de conhecimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEBALLOS, J.C.; BOTTINO, M.J. (2004). Shortwave radiative flux monitoring over South American area using GOES VIS imagery. Annals (CD ROM). The 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography,,Norfolk.

CENSOLAR (1993). Valores Medios de Irradiacion Solar Sobre Suelo Horizontal - Centro de Estudios de la Energia Solar. Sevilla.

CROCE, Ricardo (2004). Sensoriamento Remoto. [www.croce.ggf.br/SR/SR2/Man_port.htm]

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. (1974) "Solar Energy Thermal Processes", pp. 34-37. John Wiley and Sons, New York.

GALLEGOS, H. G. (1998a). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. Energías Renovables y Medio Ambiente, vol. 4, pp.119-123.

GALLEGOS, H. G. (1998b). Distribución espacial del promedio anual de la radiación solar global diaria en América del Sur. Revista Internacional Información Tecnológica (ISSN: 0716-8756), vol. 9 No. 2, pp. 259-264 (1998).

- GALLEGOS, H. G. (1999). Comparación de los valores satelitales del 'Surface Solar Energy (SSE) Data Set Version 1.0' con datos de tierra de la Red Solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 6, pp. 1-6.
- MUNEER, T. (1997). *Solar Radiation and Daylight Models for the Energy Efficient Design of Buildings*. Architectural Press. Oxford.
- NUNES, G.S.; ANDRÉ, R.G.B.; VIANELLO, R. L.; MARQUES, V. S. (1978). *Estudo da Distribuição da Radiação Solar sobre o Brasil*. INPE, São José dos Campos, SP, Brasil, 45 pp.
- OLADE (1987). *Atlas de Climatología Solar*. Organización Latinoamericana de Energía. Quito. Ecuador.
- PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; STUHLMANN, R.; RIELAND, M. ; COLLE, S. (1996). Survey of the incident solar radiation in Brazil using the Meteosat satellite data. *Solar Energy* 57, 2, 125-132
- RIGHINI, R.; GALLEGOS, H. G. (2001). Utilización Preliminar de Información GOES y Métodos Geostatísticos para la Evaluación del Recurso Solar en Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 5, 2001. Argentina. ISSN 0329-5184
- RIGHINI, R.; GALLEGOS, H. G. (2003). Aproximación a un Trazado de Nuevas Cartas de Irradiación Solar para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 7, Nº 2, 2003. Argentina. ISSN 0329-5184
- RORIZ, M. (2002). Un Método y un Ejemplo de Interpolación Geográfica de Temperaturas y Humedades. Páginas 205 a 214. in *Estudios de Arquitectura Bioclimática*. Anuario 2002. Vol. 4., 240 páginas. Compilador: Manuel R. Viqueira. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. Limusa Noriega Editores. México, D.F. ISBN 968-18-6414-X
- SÁNCHEZ, C. E. (1993). *Atlas de Radiación Solar de Colombia*. INEA-HIMAT. Bogotá.
- SENAMHI (2003). *Atlas de Energía Solar del Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima. Junio 2003.
- TIBA, C.; GALLEGOS, H. G.; LYRA, F.; FRAIDENRAICH, N. (1999). On the development of spatial/temporal solar radiation maps: a Brazilian case study. *Renewable Energy* 18, pp. 393-408.
- UML (2003). *Solar Irradiation Database*. Solar Engineering Department. University of Massachusetts Lowell Photovoltaic Program. [<http://energy.caeds.eng.uml.edu/>]
- VILA NOVA, N.A. e SALATTI, E. (1977) *Radiação Solar no Brasil*. Anais do I Simpósio Anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, pp. 27-61.
- WRDC (2003). World Radiation Data Centre, Main Geophysical Observatory in St. Petersburg, Russia [<http://wrdc-mgo.nrel.gov>]