

## APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NO DESENVOLVIMENTO DE UMA BASE DE DADOS CLIMATOLÓGICOS PARA USO NO MODELO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA BRASIL-SR.

SHEILA DE ARAÚJO BANDEIRA E SILVA  
PATRÍCIA MORENO SIMÕES  
FERNANDO RAMOS MARTINS  
ENIO BUENO PEREIRA

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{sheila, patricia, fernando, enio}@dge.inpe.br

**Abstract.** This paper presents the development of a climatological database for the radiative transfer model BRASIL-SR to map the surface solar irradiation in South America. This work is a component of SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) project, founded by UNEP-GEF. Temperature, relative humidity, surface albedo and visibility are the input data for the BRASIL-SR. Geostatistics techniques were applied on several available environmental ground datasets to prepared maps in the same resolution of that of the satellites images used by the model. The results present good confidence and reliability.

**Keywords:** geostatistics, climatological database, solar radiation, radiative transfer model.

### 1. Introdução

A conexão energia-meio ambiente tem sido objeto de muitas pesquisas e algumas vezes é possível estabelecer a relação causa e efeito entre o uso de energia e os danos ao meio ambiente. Estudos verificaram, que o desenvolvimento humano está fortemente relacionado com o consumo per capita de energia e mostram uma tendência de crescimento da demanda energética de 4% nos países em desenvolvimento o que significa uma duplicação a cada 17 anos. É previsto que, na segunda década deste século, o consumo de energia nos países em desenvolvimento ultrapasse o consumo dos países de primeiro mundo em consequência da melhoria da qualidade de vida nesses países –redução da mortalidade infantil, aumento da expectativa de vida, melhoria no atendimento à saúde, etc. (Goldemberg, 1998).

O aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais causados por crises políticas em regiões produtoras e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente vêm levando o homem a pesquisar, desenvolver e utilizar fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ao meio ambiente. Dentre as fontes de energia alternativas que produzem reduzido impacto ambiental, a energia solar vem se apresentando como um projeto viável técnica e economicamente (Pereira e Colle, 1997). Embora a média dos custos da energia solar a longo prazo possa ser maior do que a média dos custos da energia hidroelétrica, a diversificação dos suprimentos de energia se torna atraente quando se considera os impactos das mudanças climáticas e os riscos sobre a disponibilidade dos nossos recursos hídricos. Sem informações acessíveis de alta qualidade, as oportunidades para desenvolvimento da energia solar com aprimoramento da diversificação e segurança no suprimento de energia serão inúteis.

A disponibilidade de dados confiáveis, de fácil utilização e suficientemente detalhados sobre recursos energéticos é escassa para muitos países em desenvolvimento. Esta lacuna é um obstáculo primário para os setores público e privado investirem em aplicações de energia renovável na maioria do mundo em desenvolvimento. O projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resources Assessment*), desenvolvido com apoio da UNEP-GEF (*United Nations Environment Program - Global Environment Facility*), objetiva remover tal obstáculo.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) coordena a implantação do projeto SWERA no âmbito da América Latina e um dos objetivos, com a colaboração do LABSOLAR de Universidade Federal de Santa Catarina, é produzir o mapa solarimétrico da América do Sul com resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  a partir do uso de modelos computacionais que utilizem informações obtidas de satélite e dados meteorológicos de grande confiabilidade. Para tal, será adotado um modelo físico, denominado BRASIL-SR, para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite (Martins, 2001). Foi desenvolvido por meio de convênio entre a Universidade Federal de Santa Catarina e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais com base no modelo alemão IGMK (Stuhmann et al., 1990) e será utilizado para o cumprimento desta etapa do projeto.

A estimativa da irradiação solar incidente na superfície,  $\Phi_g$ , é obtida a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro,  $\tau_{Clr}$ , e a segunda refere-se à condição de céu encoberto,  $\tau_{Cld}$ . A natureza estocástica do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens,  $C_{eff}$ . A componente  $\tau_{Clr}$  é função do albedo de superfície, ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos. A componente  $\tau_{Cld}$  é função do ângulo zenital solar e de propriedades físicas das nuvens. As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos para a solução numérica da equação de transferência radiativa. A irradiação solar no topo da atmosfera é representado por  $\Phi_0$ .

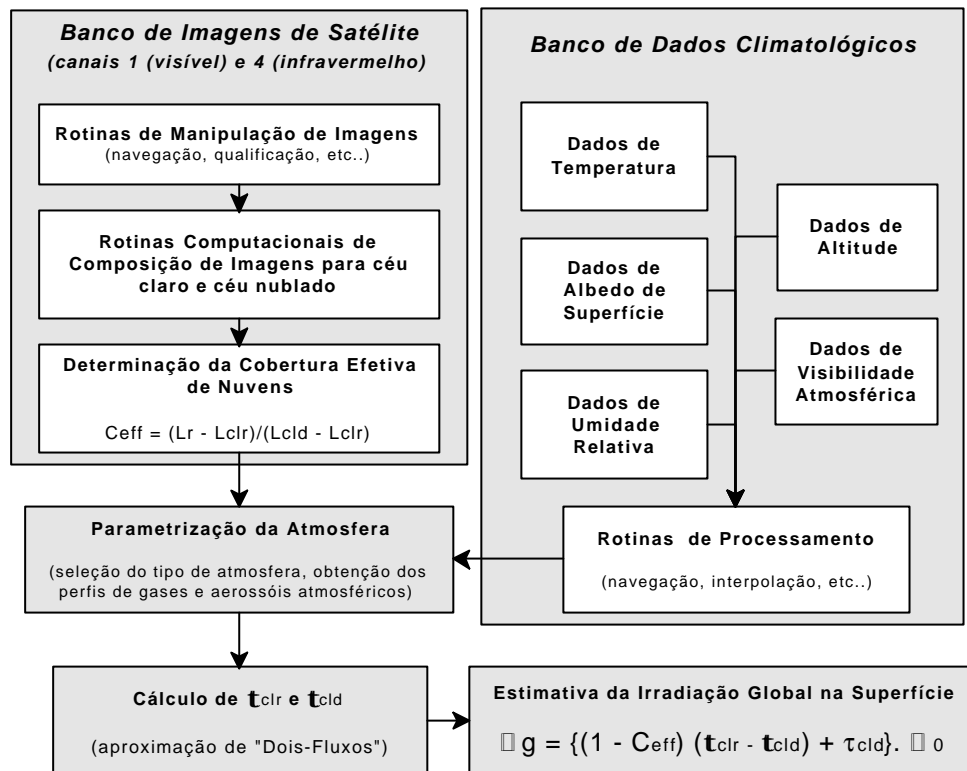
$$\Phi_g = \Phi_0 \left[ (\tau_{clear} - \tau_{cloud}) \cdot (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \right]$$

A **Figura 1** mostra o diagrama em blocos do modelo BRASIL-SR. O gerenciamento do banco de imagens inclui a qualificação das imagens e a determinação estatística do coeficiente de cobertura de nuvens. Para determinação do coeficiente de cobertura de nuvens é necessário a composição de imagens de céu claro e de céu completamente nublado por meio de análise estatística de imagens do período de interesse. Os valores  $C_{eff}$  descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: distribuição espacial e profundidade ótica da cobertura de nuvens.

O modelo necessita também de uma base de dados confiável de valores de temperatura, umidade relativa, albedo de superfície e altitude. Os dados de altitude para toda a área de abrangência do Projeto SWERA na América do Sul foram obtidos a partir da base GTOPO (EROS Data Center). Esta base de dados apresenta na forma de uma grade com resolução bastante fina (arco de 30s) e precisão do detalhamento topográfico da ordem de 100m.

Os dados climatológicos de temperatura, albedo de superfície, visibilidade e umidade relativa são utilizados na parametrização dos perfis de gases e aerossóis atmosféricos. A confiabilidade destes dados desempenha um papel muito importante na modelagem dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera e, conseqüentemente, na estimativa da transmitância da radiação solar. A influência que estas variáveis apresentam na precisão das estimativas de radiação solar incidente na superfície obtidas com o modelo BRASIL-SR são discutidas em Gambi (1999).

Este trabalho apresenta o procedimento adotado para desenvolver a base de dados a ser utilizada pelo modelo BRASIL-SR no âmbito do Projeto SWERA. A base de dados será composta pelos valores médios mensais de cada uma dessas variáveis em forma de grade regular com resolução de  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  e  $0,12^{\circ} \times 0,15^{\circ}$  e estarão disponíveis através da portal do Projeto SWERA que deverá se tornar operacional brevemente.



**Figura 1.** Diagrama em blocos do Modelo BRASIL-SR apresentando o gerenciamento e manipulação do banco de dados climatológicos e de imagens do satélite GOES-8 utilizados para alimentação do modelo.

### 3. Metodologia

A etapa inicial deste trabalho foi realizar um extenso trabalho de levantamento das bases de dados disponíveis nas variáveis de interesse. A principal fonte de informações utilizadas nesta etapa foram encontradas por meio da INTERNET. Os dados e produtos, utilizados no desenvolvimento deste trabalho, são livres para o uso em pesquisa, educação. Segue abaixo uma descrição das informações sobre os dados utilizados para cada uma das variáveis.

#### 3.1. Temperatura e Visibilidade

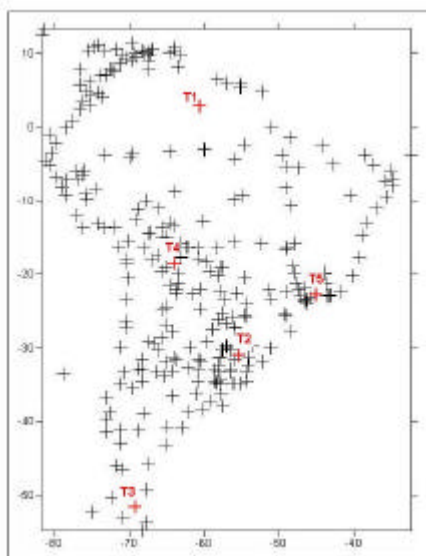
As informações de temperatura e a visibilidade para a América Latina foram obtidas da base de dados "Global Surface Summary of Day Data" desenvolvida e mantida pelo National Climatic Data Center (NCDC), através do protocolo de transferência de arquivos no endereço ftp.ncdc.noaa.gov ou a partir do site http://www.ncdc.noaa.gov. O domínio www inclui uma visualização interativa de dados que permite a seleção dos dados por estação, por período de interesse e localização geográfica. Segundo a mantenedora da base de dados, um rigoroso programa de qualidade dos dados foi aplicado de forma automática, de forma que existe uma probabilidade muito pequena de presença de erros. Ainda assim um procedimento de qualificação dos dados foi realizado antes de seu processamento a fim de identificação possíveis problemas decorrentes de sistema de unidades diferentes e valores causados por ruídos. Além disso, a primeira etapa da análise geoestatística torna visível a presença de valores inconsistentes na base dados. Para processamento inicial dos dados foi desenvolvido um software com a finalidade de separar as informações relativas a cada um dos treze países da América Latina com dados disponíveis e as conversões para o Sistema Internacional de

Unidades (SI). A **Tabela 1** apresenta a lista de países e o número de estações em cada um deles. A **Figura 2** apresenta a localização das 391 estações de medidas na América do Sul.

Os arquivos gerados pelo programa apresentam as seguintes informações coletadas para cada estação: data da medida, a média diária da temperatura e visibilidade. A partir destes arquivos de saída, determinou-se a média mensal do valor diário para cada ano e, posteriormente, calculou-se a média do valor das variáveis em cada mês utilizando a média mensal de cada ano do período entre 1994 e 2002.

**Tabela 1.** Número de estações em cada país da América do Sul disponíveis na base de dados “Global Surface Summary of Day Data”

<i>País</i>	<i>Número de estações</i>	<i>ID do País(2-caracteres)</i>
Colombia	29	CO
Venezuela	45	VN
Guiana	02	GY
Suriname	06	SM
Guiana Francesa	04	FG
Brasil	95	BZ
Equador	13	EQ
Peru	22	PR
Bolívia	35	BO
Chile	25	CH
Paraguai	22	PY
Uruguai	20	UY
Argentina	63	AG



**Figura 2.** Localização das estações da base de dados “Global Surface Summary of Day Data”. Para a aplicação de geoestatística, trata-se de uma grade irregular com amostras espaçadas aleatoriamente por toda a área de estudo.

### 3.2. Albedo de Superfície

O albedo de superfície desempenha um papel muito relevante no fluxo de energia incidente na superfície do planeta e é função da reflectância da camada de cobertura do solo e seu uso.

(tipo de solo e presença e características da vegetação). Essa reflectância pode apresentar grande variabilidade no transcorrer do ano em virtude do estágio de crescimento da vegetação, estações do ano e variações inter-anuais do clima.

A base de dados de albedo utilizada no desenvolvimento deste trabalho foi desenvolvida a partir de um modelo desenvolvido por Sellers et al. (1995) que calcula o albedo de superfície em vários intervalos espectrais. Esse modelo é alimentado por medidas do índice de vegetação por diferença normalizada (IVDN) obtidas por satélite e outros parâmetros biofísicos relacionados ao tipo de vegetação. A integração desses valores espectrais de albedo para todo a faixa do visível é executada por meio do uso de um modelo de circulação geral que utiliza o método de diferenças finitas com resolução horizontal de  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  e 17 camadas atmosféricas (Harshvardhan et al., 1987). Assim, os dados obtidos para o albedo de superfície representam valores médios mensais durante o ciclo diurno. Esta base de dados está disponível em <ftp://daac.gsfc.nasa.gov>, e os dados estavam divididos em dois grupos de arquivos: um com a média dos valores mensais para o ano de 1987 e outro para 1988. Os dados apresentam na forma de uma grade regular com resolução  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ . Para o projeto SWERA utilizou-se, para cada mês, a média dos valores mensais de cada ano.

### 3.3. Umidade Relativa

A umidade relativa (UR) é a relação entre a razão de mistura de vapor d'água observada na atmosfera e aquela que prevaleceria em condições saturadas à mesma temperatura. Os valores de umidade relativa utilizados neste trabalho foram obtidos no site <http://ingrid.ldeo.columbia.edu> mantido pela IRI (International Research Institute for Climate Prediction). Essa base de dados contém médias mensais em uma grade regular com resolução de  $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$  e abrange o período de 1960 até 2002 (Kalnay et al, 1996). Assim como o procedimento descrito para as variáveis de temperatura e visibilidade, primeiramente determinou-se a média mensal para o período. Esse arquivos estão em fase final de processamento, mas todos os resultados estarão disponíveis no portal do Projeto SWERA.

### 3.4. Geoestatística

A Geoestatística está associada a uma classe de técnicas utilizadas para analisar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço ou no tempo. A geoestatística possui três etapas muito importantes: (a) análise exploratória dos dados cujo objetivo principal é averiguar as propriedades estatísticas e matemáticas dos dados; (b) análise estrutural dos dados que tem por objetivo averiguar e identificar padrões na estrutura dos dados como por exemplo determinar a ocorrência de anisotropia; e (c) a realização da interpolação dos dados. 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. Este método foi desenvolvido, por Daniel G. Krige, para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso nos mapeamentos de solos, hidrológico e atmosférico e outros campos. 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.

A krigeagem engloba um vasto conjunto de métodos de estimação e nesse estudo 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. O resultado final é a geração de duas grades: uma superfície com os valores estimados para

toda a região de estudo, e uma superfície com as variâncias estimadas. Esta última é útil pois permite avaliar a qualidade dos valores estimados, e identificar áreas em que a estimação foi pobre (áreas com variâncias elevadas).

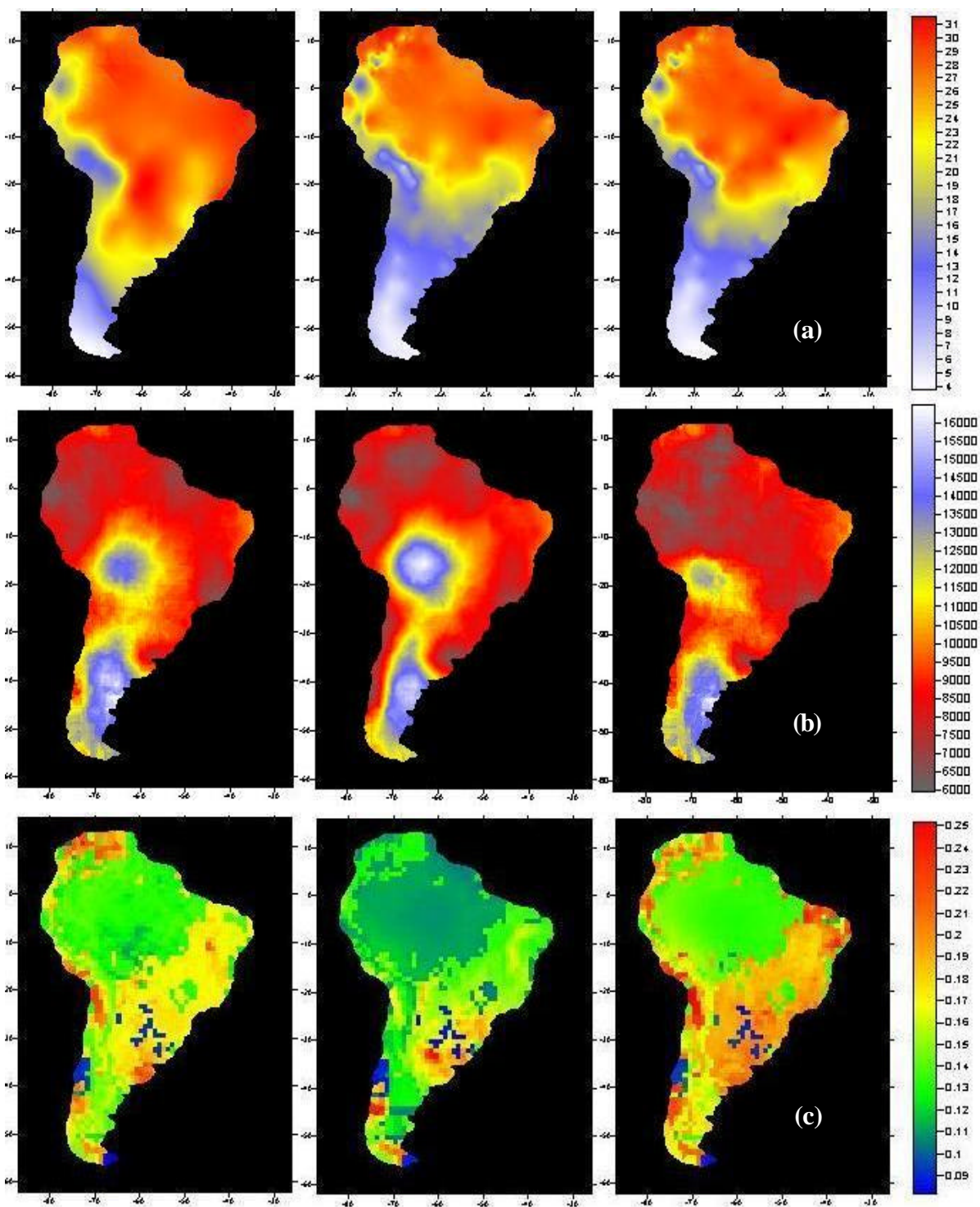
#### 4. Resultados obtidos

Nas duas primeiras etapas da análise geoestatística dos dados de temperatura observou-se que a distribuição espacial do fenômeno estudado poderia ser considerada isotrópica, ou seja, os semivariogramas obtidos em diversas direções apresentaram grande similaridade e um único modelo teórico foi suficiente para descrever a variabilidade espacial do mesmo sem incorrer em aumento da variância estimada. Com relação aos dados de visibilidade, constatou-se que apesar de haver uma anisotropia maior, a aproximação da hipótese de isotropia dos dados não acarretava um aumento significativo das variâncias estimadas. Dessa forma, a fim de reduzir a demanda computacional e simplificar o procedimento estatístico, optou-se por adotar a isotropia em ambas as variáveis. A **Figura 3** apresenta os resultados obtidos para três meses diferentes das variáveis temperatura, visibilidade e albedo de superfície. A resolução adotada para os mapas são idênticas à resolução das imagens do satélite GOES-8 utilizadas no projeto SWERA para o cálculo do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens (Ce<sub>eff</sub>) e, portanto a resolução com que será produzido o atlas solarimétrico da América do Sul. A fim de verificar a confiabilidade dos resultados, realizou-se o mesmo procedimento de interpolação retirando uma estação da base de dados e comparou-se os valores estimados com os valores medidos nas estações. Este teste foi realizado para as estações T1 a T5 cuja localização é apresentada na **Figura 2**. A **Tabela 2** apresenta os resultados encontrados e pode-se observar a pequena discrepância entre os valores interpolados e medidos. A estação localizada em T4 é um caso mais crítico devido a sua proximidade à Cordilheira dos Andes. A grande variação espacial dos valores medidos de temperatura, causada pela diferença de altitude entre as estações mais próximas a sua localização, é a causa da maior discrepância observada. O mesmo fenômeno ocorreu quando esta análise de confiabilidade foi realizada para a visibilidade

**Tabela 2.** Comparação entre os valor estimado para a temperatura (em °C) utilizando a interpolação por krigeagem e o valor medido na estação não utilizada no procedimento de interpolação.

Localização dos Pontos			Valores	
ID	Latitude	Longitude	Medido	Krigeagem
T1	2.83 N	60.7 W	27.1°	26.7°
T2	31.7 S	55.98 W	11.92°	12.04°
T3	51.61 S	69.28 W	0.96°	0.96°
T4	18.5 S	64.09 W	15.58°	18.52°
T5	22.81 S	43.25 W	21.01°	21.9°

Para as variáveis albedo de superfície e umidade relativa, por formarem uma grade regular, possibilitaram que a interpolação dos dados seja realizada de duas maneiras diferentes, uma utilizando a krigeagem e a outra o “vizinho mais próximo”. Como pode ser observado na **Tabela 3**, a diferença entre as técnicas é insignificante e nestes caso a fim de reduzir a demanda computacional optou-se pelo uso da técnica “vizinho mais próximo”.



**Figura 3.** Mapas para os meses de Janeiro (esquerda), Maio (centro) e Setembro (direita) na resolução  $0,155^{\circ} \times 0,125^{\circ}$  para as variáveis (a) temperatura (em  $^{\circ}\text{C}$ ) (b) visibilidade (em metros) e (c) albedo de superfície.

## 5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo a pesquisa e o desenvolvimento de uma base de dados climatológicos para alimentar o modelo físico de transferência radiativa BRASIL-SR para a obtenção de um atlas solarimétrico da América do Sul no âmbito do Projeto SWERA. Foram

utilizadas base de dados disponíveis na INTERNET e técnicas de geoestatística para a preparação de mapas com a mesma resolução das imagens de satélite utilizadas pelo modelo. A técnica de krigagem mostrou resultados consistentes e de grande confiabilidade, conseguindo estimar com boa precisão valores de temperatura e visibilidade para estações não utilizadas na análise estatística. Em virtude da menor demanda computacional e da existência da base de dados em forma de grade regular, optou-se por utilizar a interpolação “vizinho mais próximo” para o estudo das variáveis de albedo e umidade relativa.

**Tabela 3.** Comparação entre os valores estimados para o albedo de superfície utilizando a interpolação por krigagem e por “vizinho mais próximo”.

Pontos de Teste			Valores	
ID	Latitude	Longitude	Vizinho + próximo	Krigagem
T1	2.50 N	60.50 W	0.135	0.135
T2	31.50 S	55.50 W	0.089	0.089
T3	51.50 S	69.50 W	0.131	0.131
T4	18.50 S	64.50 W	0.141	0.141
T5	22.50 S	43.50 W	0.164	0.164

### Agradecimentos

Às agências Global Environment Facility (GEF) e United Nations Environmental Program (UNEP) responsáveis pelo financiamento do Projeto SWERA. À FAPEU (Fundação de Amparo de Pesquisa e Ensino Universitário) e ao CNPQ (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico).

### Referências

- Stuhlmann, R.; Rieland, M.; Raschke, E. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, v. 29, n. 7, p. 586-603, 1990.
- Martins, F. R. *Statistical approaches to the estimation of missing values arising in remotely sensed data*. Ph.D. (Tese) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. 330p.
- Sellers, P.J.; Los, S.O.; Tucker, C.J.; Justice, C.O.; Dazlich, D.A.; Collatz, G.J.; Randall, D.A.. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. Submitted to *Journal of Climate*, 1995.
- Kalnay, E., et al. "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996.
- Goldemberg, J. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. São Paulo: EDUSP, 1998.
- Pereira, E. B.; Colle, S. A energia que vem do Sol. *Revista Ciência Hoje*, v. 22, n. 130, p. 25-35, 1997.
- Gambi, W. *Avaliação de um modelo físico estimador de irradiância solar baseado em satélites geostacionários*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.
- EROS Data Center. *User manual*. Disponível em [http://www.npagroup.com/shop/gtopo30/gtopo30\\_readme.htm](http://www.npagroup.com/shop/gtopo30/gtopo30_readme.htm) 2002.
- Harshvardhan; Davies, R.; Randall, D.A.; Corsetti, T.G. A fast radiation parameterization for general circulation models. *Journal of Geophysics Research*, v. 92, p. 1009-1016, 1987.