

Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera

(Solar energy resources assesment using geostationary satellites in brazil – Swera Project)

Fernando Ramos Martins¹, Enio Bueno Pereira e Mariza Pereira de Souza Echer

¹Divisão de Clima e Meio Ambiente, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Recebido em 21/11/03; Aceito em 12/03/04

O conhecimento da radiação solar incidente na Terra desempenha papel fundamental em muitas atividades humanas como, por exemplo, a agricultura, a arquitetura e o planejamento energético. A radiação solar constitui uma opção limpa e renovável de produção de energia. Para melhor conhecimento da disponibilidade desta fonte de energia e seu aproveitamento, pode-se utilizar modelos computacionais que utilizam técnicas aproximadas na resolução numérica da equação de transferência radiativa para estimar o fluxo de energia solar na superfície. Este trabalho apresenta uma revisão sobre os princípios que estão por trás desses modelos tendo como exemplo aplicado o método do modelo BRASIL-SR. Esse modelo está sendo empregado no mapeamento do potencial energético solar da América Latina através do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), financiado pela Divisão de Ambiente Global (GEF) através do Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP).

Palavras-chave: radiação solar, energia solar, projeto SWERA, transferência radiativa, atmosfera, aerossóis.

Solar radiation plays a chief role in many human activities like agriculture, architecture, energy planning and policies, etc. It constitutes a clean and renewable source of energy. For better knowledge of the availability of this source of energy, computational models can be used to obtain numeric solution of radiative transfer equations and to estimate the energy fluxes in the Earth's atmosphere. This work reveals what is behind the satellite models and their use to derive the surface solar radiation, having the BRASIL-SR model as a case example. The BRASIL-SR model is currently being applied to map the solar energy potential for Latin America within the SWERA project (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*). The Global Environment Facility (GEF) through a United Nations Environment Program grant supports this project.

Keywords: solar energy, radiative transfer, aerosols, atmosphere, SWERA project.

1. Introdução

O Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região inter-tropical, possui grande potencial de energia solar durante todo ano [1],[2]. A utilização da energia solar poderia trazer benefícios em longo prazo para o país viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento, regulando a oferta de energia em situações de estiagem, diminuindo a dependência do mercado de petróleo e reduzindo as emissões de gases poluentes à atmosfera como estabeleceu a Conferência de Kyoto [3].

Na matriz energética brasileira, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para geração de eletricidade. Apesar de não ocorrer emissão de poluentes para a atmosfera, as usinas hidroelétricas produzem um impacto ambiental ainda não adequadamente avaliado, devido ao alagamento de grandes áreas cultiváveis e, além disso, as reservas brasileiras para geração hidroelétrica tendem a se esgotar nas próximas décadas. A ener-

gia nuclear não tem se mostrado uma alternativa adequada devido ao questionamento sobre os riscos associados a sua utilização na produção de eletricidade e ao problema do armazenamento dos rejeitos radioativos gerados na operação das usinas nucleares. Estima-se que 40% da energia utilizada no setor agropecuário brasileiro seja produto da queima de combustíveis fósseis e 20% seja derivada da queima de lenha (biomassa) [3].

Além da importância no plano energético atual, a radiação solar desempenha papel importante em diversas áreas da atividade humana como, por exemplo, na meteorologia e na climatologia que são atividades essenciais para o desenvolvimento da atividade econômica de um país com extensão continental como o Brasil. Outras atividades econômicas, como agropecuária e arquitetura, também necessitam do conhecimento da radiação solar incidente na superfície do planeta para o planejamento e obtenção da maior eficiência energética. A energia solar pode ser utilizada em sistemas de irrigação de culturas; de refrigeração de alimentos, vacinas e remédios; aquecimento e iluminação artificial; conforto térmico e iluminação natural em projetos de construção civil, etc.

¹Enviar correspondência para Fernando Ramos Martins. E-mail: Fernando@dge.inpe.br.

Inicialmente, este artigo discutirá a importância e a motivação para a pesquisa científica do potencial de energia solar disponível. Em seguida, serão abordados os conceitos básicos da atenuação da radiação solar na atmosfera e métodos para estimar os recursos disponíveis em energia solar. As atividades desenvolvidas para o levantamento de recursos dessa fonte de energia no Brasil, e em particular, ao desenvolvimento do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR que vem sendo realizado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em conjunto com a Universidade Federal de Santa Catarina, serão descritas posteriormente.

2. Importância sócio-econômica e ambiental das fontes renováveis de energia

O meio ambiente no qual vivemos muda continuamente devido a causas naturais (erupções vulcânicas, terremotos, queimadas iniciadas naturalmente e atividade solar) sobre as quais se tem pouco ou nenhum controle e devido a causas decorrentes da atividade humana que até o século passado desempenhavam um papel de menor importância nas mudanças climáticas e ambientais no planeta. Nosso planeta e meio ambiente estão sofrendo as mudanças mais drásticas na recente história da humanidade e as atividades humanas são os maiores agentes dessas mudanças – redução da camada de ozônio, aquecimento global, desflorestamento, extinção de espécies e chuva ácida e são os exemplos mais evidentes [4],[5]. 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, desenvolvimento sócio-econômico e danos ao meio ambiente.

O avanço no desenvolvimento humano (caracterizado por parâmetros sócio-econômicos) está fortemente relacionado com o consumo de energia. Em países onde o consumo anual per capita de energia é inferior a 1 (um) TEP (tonelada equivalente de petróleo), as taxas de mortalidade infantil e analfabetismo são elevadas e a expectativa de vida é baixa. O crescimento do consumo de energia mais que triplicou após a Revolução Industrial. Estudos recentes mostram uma tendência de crescimento da demanda energética de 4% em consequência da melhoria de qualidade de vida nos países em desenvolvimento. Com essa taxa de crescimento que significa uma duplicação a cada 17 anos, é provável que, na segunda década deste século, o consumo de energia nos países em desenvolvimento ultrapasse o consumo dos países desenvolvidos em virtude da melhoria dos parâmetros sócio-econômicos nos países do Terceiro Mundo [6]. O aumento da demanda energética, a possibilidade de redução da oferta de combustíveis convencionais causada 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 ambiente.

A UNEP - Programa das Nações Unidas para o Ambiente - disponibiliza uma base de dados global sobre os recursos ambientais chamada GRID (*Global Resource Information Database*), no entanto, essa base de dados não dispõe de informações sobre

os recursos de radiação solar. Em virtude da importância atual que as fontes alternativas e renováveis apresentam mundialmente, a UNEP está desenvolvendo o projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) com recursos financeiros do GEF (*Global Environment Facility*) e representantes de vários países. O objetivo principal do SWERA é compilar e tornar disponível para acesso público informações confiáveis sobre o recurso solar e eólico em diversas partes do mundo em desenvolvimento, não somente para auxiliar no planejamento e desenvolvimento a nível governamental do setor de energia, mas também para atrair o capital privado para a área de energias renováveis. Os produtos do projeto SWERA incluem uma série de informações que serão de grande utilidade dentro do contexto apresentado e incluem desde mapas das diversas componentes da radiação solar até dados detalhados de infra-estrutura e parâmetros sócio-econômicos para algumas regiões do planeta. Alguns dos produtos do projeto de interesse para o Brasil são:

- (i) mapas de irradiação solar de alta resolução para o Brasil;
- (ii) mapas de irradiação solar de baixa resolução para a América do Sul;
- (iii) geração de séries temporais horárias;
- (iv) construção de diferentes cenários da utilização de energia solar;
- (v) disponibilização dos resultados em diversos tipos de mídia.

Os mapas de irradiação solar para o Brasil e América do Sul serão produzidos com o uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em colaboração com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC). No momento está em andamento a etapa de validação e intercomparação entre modelos de transferência radiativa adotados no Projeto SWERA para mapeamento dos recursos de energia solar em várias regiões do planeta utilizando dados de superfície obtidos em três estações solarimétricas em operação no Brasil: Caicó(PE), Florianópolis(SC) e Balbina(AM). As duas últimas fazem parte da "BASELINE SOLAR RADIATION NETWORK" e são operadas pelo LABSOLAR/UFSC. A estação de superfície localizada em Caicó foi instalada em Novembro de 2002, no âmbito do Projeto SWERA, para prover dados especificamente para a etapa de validação e intercomparação de modelos. Maiores informações sobre o Projeto SWERA e os resultados da etapa de intercomparação de modelos podem ser obtidos em http://www.dge.inpe.br/swera/swera_home.html.

3. Conceitos básicos aplicados a transferência radiativa na atmosfera

A radiação solar constitui a principal força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos em nosso planeta. A energia proveniente do Sol chega até a superfície propagando-se como energia radiante ou, simplesmente radiação. A principal característica de um campo de radiação é a radiância (ou intensidade de radiação). Essa grandeza se refere à quantidade de energia radiante num intervalo unitário de comprimento de onda que atravessa

uma unidade de área tomada perpendicularmente à direção considerada, na unidade de tempo. Conhecendo-se a radiância pode-se determinar outra grandeza muito importante no estudo da radiação atmosférica: a densidade de fluxo de radiação. Esta grandeza integrada, em todo espectro, representa a quantidade de energia radiante que passa através de um plano na unidade de tempo e de área. Para melhor compreensão dos termos empregados chama-se irradiância, a densidade de fluxo de radiação incidente sobre uma superfície, e emitância radiante, a densidade de fluxo de radiação emitido por uma superfície.

A densidade de fluxo de energia solar (ou *irradiância solar*), E , que chega ao topo da atmosfera terrestre é expressa nas unidades de Wm^{-2} (razão da potência pela área). Um parâmetro usado para caracterizar a entrada de radiação solar é a *constante solar*, definida como a irradiância solar no topo da atmosfera (E_{∞}). Seu valor, aproximadamente 1367 Wm^{-2} , pode ser estimado dividindo-se a emitância total do Sol pela área de uma esfera cujo raio seja igual à distância média entre a Terra e o Sol [7]. A irradiância solar que atinge o topo da atmosfera terrestre é variável ao longo do ano, em virtude dos efeitos astronômicos, principalmente aqueles ligados à órbita da Terra ao redor do Sol. Ademais, a intensidade de radiação emitida pelo Sol é função do comprimento de onda e de fenômenos que ocorrem na própria fonte de energia (manchas solares, erupções solares, variações de temperatura na atmosfera solar). Esses fenômenos estão agora sendo estudados sob um novo enfoque da ciência: a *climatologia espacial*.

A irradiância solar que incide na superfície da Terra dependerá de todos esses fatores, além de outros associados à interação da radiação eletromagnética com os constituintes da atmosfera da

Terra. A transmissão da radiação solar na atmosfera é um processo complexo e de difícil descrição devido ao grande número de propriedades físicas da atmosfera que a influenciam. A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera é definida como *transmitância atmosférica*. Ao atravessar a atmosfera, a radiação eletromagnética é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas (denominados aerossóis) e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação e das espécies de gases e aerossóis presentes na atmosfera. A Figura 1 apresenta um diagrama com os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica na atmosfera. Trata-se de um esquema bastante simplificado dos processos envolvidos no balanço radiativo do planeta, onde apenas o efeito médio global de todos os processos está representado. O valor de cada componente pode variar significativamente de uma região para outra do planeta e de um período do ano para outro [8].

As nuvens, a superfície do planeta, os gases e partículas atmosféricas refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A absorção da radiação solar é seletiva, sendo o vapor d'água, o ozônio (O_3) e o dióxido de carbono (CO_2) os principais agentes absorvedores. A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro de radiação eletromagnética sendo que 6% são provenientes da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos.

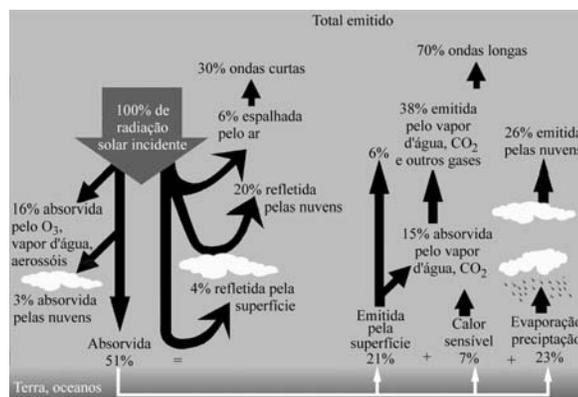


Figura 1 - Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

A Figura 2 compara a diferença nos comprimentos de onda da radiação emitida pelo Sol e pelo sistema Terra-Atmosfera. A Figura 2(a) mostra o espectro de radiação eletromagnética da radiação solar que atinge o topo da atmosfera e a superfície do planeta após a atenuação da intensidade em vários comprimentos de

onda característicos dos processos de interação. A aproximação do espectro de radiação solar com a de um corpo negro é largamente utilizada em estudos radiativos, porém o espectro de radiação observado pelos satélites difere consideravelmente do espectro de um corpo negro devido aos processos radiativos que ocorrem na

atmosfera. Mais de 99% da radiação solar apresenta comprimento de onda inferior a $4 \mu\text{m}$ [43] com pico de intensidade em $0,5 \mu\text{m}$, ou seja, praticamente toda a radiação proveniente do Sol encontra-se na região de ondas curtas correspondendo a região do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético [9]. Em vista disso, a radiação proveniente do Sol é muitas vezes denominada “radiação de ondas curtas”. A Figura 2(b) apresenta o espectro de radiação eletromagnética da radiação térmica emitida pelo planeta quando observado do espaço a diferentes altitudes – radiação de ondas longas (de $4 \mu\text{m}$ a $12 \mu\text{m}$).

Pela análise da Figura 2 observa-se que a atmosfera é praticamente transparente à radiação solar com comprimentos de onda no intervalo de $0,3$ a $0,8 \mu\text{m}$ correspondente a faixa de radiação visível. Na faixa espectral infravermelho, entre 8 e $12 \mu\text{m}$, a atenuação atmosférica é também mínima, exceto nas proximidades de $9,6 \mu\text{m}$ onde o ozônio (O_3) absorve intensamente. Essas regiões do espectro são conhecidas como *janelas atmosféricas*.

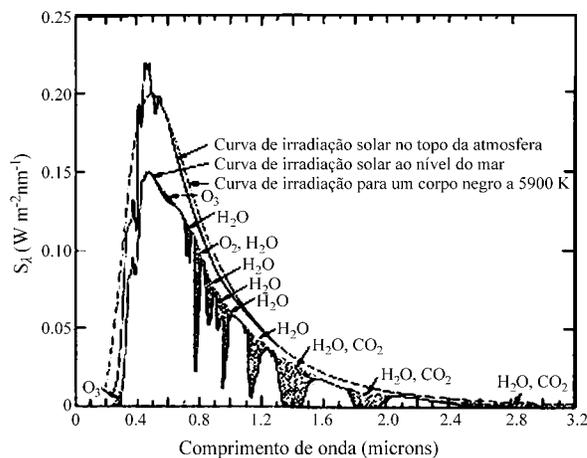


Figura 2a - Espectro de radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície da Terra e da emissão de um corpo negro a 5900 K .

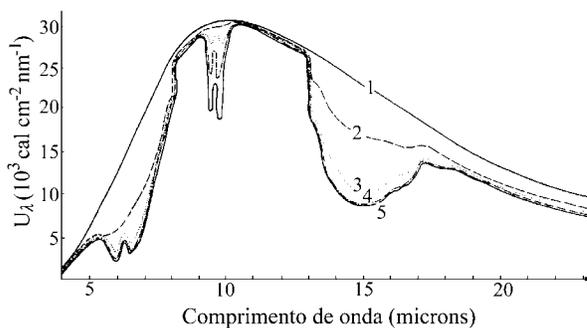


Figura 2b - Espectro de radiação térmica em 5 diferentes altitudes: 1 - 100 m , 2 - $4,6 \text{ km}$, 3 - 10 km , 4 - 18 km e 5 - 28 km . Fonte: Kondratyev [41].

4. Levantamento dos recursos de energia solar

A forma mais simples para conhecer a disponibilidade da energia radiante do sol que incide na superfície da Terra é a sua medida direta através de radiômetros colocados na superfície. A base de dados do Atlas Solarimétrico do Brasil publicado por [1] apresenta uma compilação de grande valor científico e que disponibiliza valores históricos de medidas de horas de insolação e irradiância solar global, direta e difusa em localidades espalhadas por todo o território brasileiro. A publicação apresenta também mapas de isolinhas de horas de insolação e radiação solar global preparados por técnicas de extrapolação dos valores contidos nessa base de dados.

Os radiômetros fornecem medidas pontuais com grande acurácia, mas, além de apresentarem custo elevado para grandes extensões territoriais, como é o caso do Brasil, produzem resultados com elevado grau de incerteza devido aos processos de interpolação e extrapolação entre estações de superfície distribuídas de forma esparsa e muito heterogênea. A alternativa é a aplicação de modelos computacionais que estimam a radiação solar incidente na superfície através da parametrização dos processos radiativos no sistema Terra-Atmosfera. Esta é uma solução que fornece resultados bastante confiáveis a custo relativamente baixo em comparação à implantação e operação de redes de radiômetros. De acordo com resultados publicados por [11] e apresentados na Figura 3, verificou-se que as estimativas horárias e diárias de irradiância solar na superfície fornecidas por modelos computacionais simples que utilizam dados atmosféricos obtidos por satélite apresentam maior confiabilidade do que as estimativas obtidas pela interpolação de medidas de uma rede de radiômetros distribuídos na superfície do planeta com distâncias superiores a $35\text{-}50 \text{ km}$ entre os mesmos. [10], empregando uma metodologia indireta inédita com emprego da técnica de análise de componentes principais, também fornecem indicativos sobre a confiabilidade de estimativas da radiação solar incidente por interpolação de dados de estações de superfície. Neste trabalho é mostrado que as informações de irradiância incidente diária interpoladas/extrapoladas entre estações distanciadas acima de $100\text{-}150 \text{ km}$ não possuem o grau de confiabilidade requerido de uma rede integrada (coeficientes de correlação $> 0,7$).

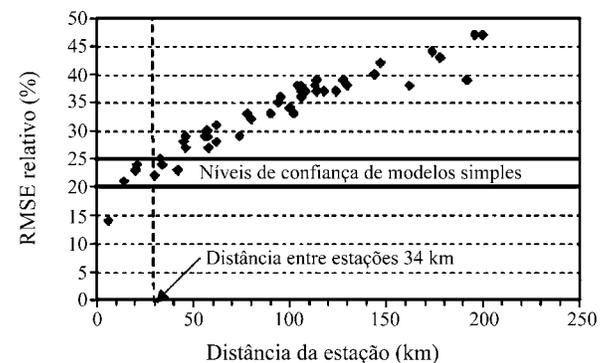


Figura 3 - Elemento de volume da atmosfera utilizado para estabelecer a equação de transferência radiativa.

5. Equação de transferência radiativa

A equação de transferência radiativa descreve a propagação da energia radiante através da atmosfera. Essa equação baseia-se no princípio de conservação de energia e pode ser facilmente compreendida se considerarmos um elemento de volume da atmosfera descrito por $dA \cdot ds$ em torno do ponto M onde dA representa a área do elemento perpendicular à direção de propagação da radiação s ; e ds é o comprimento do elemento de volume na direção de propagação conforme apresentado na Figura 4.

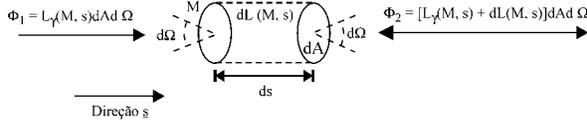


Figura 4 - Comparação dos desvios das estimativas de radiação solar incidente na superfície obtidas por interpolação de medidas de superfície e por modelos computacionais simples que utilizam imagens de satélite. Fonte: Perez [38].

Considerando a atmosfera um meio não homogêneo, as propriedades físicas, como albedo de espalhamento simples, $\omega(M)$; coeficiente de extinção, $\sigma_{e\lambda}(M)$; função de fase de espalhamento, $p(M, s, s')$; dependem da posição M do elemento de volume. A variação da radiação $L_\lambda(M, s)$ (unidade no S.I. é $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$) nesse elemento de volume na direção de propagação s é descrita por:

$$\left(\frac{dL_\lambda(M, s)}{ds} \right) ds \quad (1)$$

O fluxo de energia (em Wm^{-2}) entrando no elemento de volume é:

$$\Phi_1 = L_\lambda(M, s) dAd\Omega \quad (2)$$

e o fluxo de energia deixando o elemento de volume é:

$$\Phi_2 = \left[L_\lambda(M, s) + \frac{dL_\lambda(M, s)}{ds} ds \right] dAd\Omega \quad (3)$$

onde $d\Omega$ representa o ângulo sólido conforme apresentado na Figura 4.

A parte do fluxo de energia que é perdida por absorção e espalhamento ao longo do percurso ds é descrito por:

$$\Phi_3 = \sigma_{e\lambda}(M) L_\lambda(M, s) dAd\Omega ds \quad (4)$$

Finalmente, deve-se considerar o ganho de fluxo de energia devido ao espalhamento ocorrido de outras direções para a direção s e à emissão de radiação do próprio elemento de volume. Ambas as contribuições são proporcionais ao volume $dA \cdot ds$ e ao ângulo sólido $d\Omega$. De forma simplificada, pode-se escrever estas parcela do fluxo de energia como:

$$\Phi_4 = \sigma_{e\lambda}(M) J_\lambda(M, s) dAd\Omega ds \quad (5)$$

onde $J_\lambda(M, s)$ é denominado como *termo fonte* e é a soma das duas contribuições: termo fonte de espalhamento, $J_\lambda^{sc}(M, s)$, e o termo fonte de emissão, $J_\lambda^{em}(M, s)$.

A conservação de energia leva a seguinte expressão:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = \Phi_4 - \Phi_3$$

ou

$$\frac{dL_\lambda(M, s)}{ds} = \sigma_{e\lambda}(M) [L_\lambda(M, s) - J_\lambda(M, s)]$$

que é a equação de transferência radiativa. Esta equação e as condições de contorno definem completamente a radiação $L_\lambda(M, s)$ em qualquer ponto da atmosfera.

As contribuições devidas ao espalhamento e à emissão térmica para o termo fonte são descritas, respectivamente, por:

$$J_\lambda^{SC}(M, s) = \frac{\omega_\lambda(M)}{4\pi} \iint_{\text{espaço}} p_\lambda(M, s, s') L_\lambda(M, s) d\Omega$$

$$J_\lambda^{em}(M, s) = [1 - \omega_\lambda(M)] L_\lambda^B(T(M))$$

onde $\omega_\lambda(M)$ é o albedo de espalhamento simples; $p_\lambda(M, s, s')$ é a função de fase para o espalhamento da direção s' para a direção s ; e $L_\lambda^B(T(M))$ é a radiação de corpo negro a temperatura $T(M)$. O índice λ refere-se à dependência com o comprimento de onda da radiação. Um aspecto importante a ser observado é que o termo fonte devido à emissão térmica é independente da direção s .

6. Modelos computacionais para estimativa da radiação solar

Diversos modelos computacionais foram desenvolvidos para a obtenção de estimativas de radiação solar incidente na superfície [12-19]. Esses modelos podem ser classificados em modelos estatísticos e modelos físicos. Os modelos estatísticos utilizam formulações empíricas entre medidas de radiação incidente e condições locais e, portanto, apresentam validade restrita à região estudada. Já os modelos físicos são válidos para qualquer região do planeta uma vez que determinam a solução numérica da equação de transferência radiativa por meio da modelagem dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera. A modelagem das interações entre radiação solar e constituintes atmosféricos depende do conhecimento de parâmetros atmosféricos como a quantidade de nuvens presentes e a concentração dos constituintes atmosféricos como aerossóis, vapor d'água, ozônio e outros gases atmosféricos.

A maior dificuldade para aplicação dos modelos físicos é a obtenção dos parâmetros atmosféricos com a precisão e confiabilidade desejada [20]. O desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto por meio de satélites artificiais permitiu grande avanço no desenvolvimento de modelos computacionais. As imagens de satélite são ferramentas de grande utilidade na determinação da cobertura de nuvens e demais parâmetros atmosféricos necessários para a parametrização dos processos radiativos. Os primeiros estudos que utilizaram dados obtidos por satélite para estimar a irradiação solar na superfície foram desenvolvidos na década de 1970 por [21-23]. Estes estudos utilizaram dados obtidos com satélites orbitais e, conseqüentemente, a baixa resolução

temporal (uma imagem por dia) impossibilitava a inclusão de uma modelagem confiável da influência das nuvens na irradiação solar na superfície. Ao fim da década de 1970 e início dos anos 1980, dados obtidos com alta resolução temporal (30 minutos) e espacial (da ordem de 1 km no nadir do satélite) por satélites estacionários passaram a ser utilizados permitindo uma melhor avaliação da variabilidade associada à cobertura de nuvens [21-23].

Dois modelos físicos vem sendo desenvolvidos no Brasil desde a segunda metade dos anos 90: Modelo GL e o Modelo BRASIL-SR. O modelo GL desenvolvido no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) encontra-se agora na versão 1.2 e é um modelo com estrutura simples que divide a radiação solar em 3 faixas espectrais, utiliza valores de radiação medidos pelo satélite geostacionário e adota um conjunto de parâmetros atmosféricos: água precipitável, ozônio, dióxido de carbono, reflectância da superfície e das nuvens. O modelo assume que a variabilidade desses parâmetros atmosféricos sobre o território brasileiro não é significativa. Assume também que não ocorre absorção da radiação solar na troposfera e que os aerossóis não apresentam contribuição importante para atenuação da radiação solar. Apesar destas aproximações, o modelo apresenta boa concordância com valores medidos em superfície em diferentes regiões do território brasileiro [24],[25].

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico 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. Foi desenvolvido no Brasil por meio de convênio estabelecido entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) com base no modelo alemão GKSS [12]. A cobertura de nuvens é considerada como principal fator de modulação da transmitância atmosférica e as demais propriedades óticas da atmosfera são parametrizadas a partir de seus valores climatológicos.

7. Método de Dois Fluxos (“two-stream method”)

Vários métodos foram desenvolvidos para solucionar numericamente a equação de transferência radiativa de forma precisa. Dentre eles pode-se citar os métodos que utilizam harmônicos esféricos [26], ordenadas discretas [27], ordens sucessivas de espalhamento [19], Monte Carlo e diferenças finitas [28]. Estas técnicas necessitam um tempo computacional elevado para obtenção de estimativas da irradiação solar, principalmente em condições de céu com nuvens de elevada espessura ótica [17].

Como alternativa a esses métodos, foram desenvolvidos métodos aproximados que demandam um tempo computacional muito menor para a obtenção de estimativas de irradiação confiáveis por meio da resolução numérica da equação de transferência radiativa. Entre eles, destacam-se o *Método de Dois-Fluxos* e a *Aproximação de Eddington* bastante utilizados nos modelos em uso atualmente [28].

O método de Dois-Fluxos se baseia na decomposição do fluxo de radiação em dois sentidos de propagação opostos e na direção

perpendicular à superfície – um fluxo de radiação no sentido do topo da atmosfera e outro incidente na superfície. Uma análise comparativa dos resultados desta metodologia com a solução exata da equação de transferência radiativa determinou discrepâncias da ordem de 3%.

Para descrever matematicamente o método, assume-se a geometria mais simples para o meio absorvedor/espalhador (geometria plano-paralela) onde as propriedades do meio são constantes num plano paralelo aos seus contornos e a radiação incidente é constante nesses contornos. Esta é uma boa aproximação para a atmosfera planetária onde as variações verticais de todas as propriedades são muito mais rápidas do que as suas variações horizontais. Nesta geometria, a posição do ponto M é descrita apenas por três variáveis: a altitude z , o ângulo zenital θ e o ângulo azimutal ϕ . Dessa forma, a equação de transferência radiativa descrita na Eq. 6 pode ser reescrita como:

$$\mu \frac{dL_\lambda(z; \mu, \phi)}{dz} = -\sigma_{e\lambda}(z) [L_\lambda(z; \mu, \phi) - J_\lambda(z; \mu, \phi)] \quad (6)$$

e os termos fontes das Eqs. 7 e 8 como:

$$J_\lambda^{sc}(z; \mu, \phi) =$$

$$\frac{\omega_\lambda(z)}{4\pi} \iint_{\text{espaço}} p_\lambda(z; \mu, \phi; \mu', \phi') L_\lambda(z; \mu', \phi') d\mu' d\phi' \quad (7)$$

$$J_\lambda^{em}(z; \mu, \phi) = [1 - \omega_\lambda(z)] L_\lambda^B(T(z)) \quad (8)$$

onde $\mu = \cos(\theta)$. As condições de contorno são dadas para a radiação incidente no topo da atmosfera e para a radiação na superfície que “retorna” para o espaço. É conveniente reescrever a Eq. 6 utilizando a espessura ótica vertical definida como $d\tau = \sigma_{e\lambda} \cdot dz$

$$\mu \frac{dL_\lambda(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = - [L_\lambda(\tau; \mu, \phi) - J_\lambda(\tau; \mu, \phi)] \quad (9)$$

A simplificação que torna a solução da equação de transferência radiativa mais simples do ponto de vista matemático é assumir que o fluxo de radiação vertical é independente do ângulo de azimute. Essa hipótese é válida quando a espessura ótica do meio é alta de modo que o feixe de radiação direta perde sua identidade devido ao espalhamento intenso. Este é o caso da atmosfera com nuvens espessas.

$$F(\tau) = 2\pi \int_0^1 L(\tau, \mu) \mu d\mu \quad (10)$$

A fim de minimizar os erros causados por esta simplificação, algumas alterações precisam ser feitas como a introdução da razão de retro-espalhamento, β , para parametrizar a função de fase do espalhamento. Dessa forma, a equação de transferência radiativa escrita para os fluxos verticais é descrita por:

$$\begin{aligned}\frac{dF^+(\tau)}{d\tau} &= \alpha_1 F^+(\tau) - \alpha_2 F^-(\tau) - \alpha_3 \omega \pi F e^{-\tau/\mu} \\ \frac{dF^-(\tau)}{d\tau} &= \alpha_4 F^+(\tau) - \alpha_5 F^-(\tau) - \alpha_6 \omega \pi F e^{-\tau/\mu}\end{aligned}\quad (11)$$

onde

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{(1-\omega(1-\beta))}{\mu^+} & \alpha_4 &= \frac{\omega\beta}{\mu^+} \\ \alpha_2 &= \frac{\omega\beta}{\mu^-} & \alpha_5 &= \frac{(1-\omega(1-\beta))}{\mu^-} \\ \alpha_3 &= \beta_0 S_0 & \alpha_6 &= (1-\beta_0) S_0\end{aligned}\quad (12)$$

sendo que β_0 é o coeficiente de retro-espalhamento para o sentido contrário ao da incidência da radiação.

Um dos primeiros modelos para estimativa da irradiância solar na superfície a utilizar o método Dois-Fluxos na solução da equação de transferência radiativa foi desenvolvido por [17].

8. Aplicação do método de dois-fluxos – o caso do modelo Brasil-Sr

A obtenção de uma estimativa da radiação solar incidente na superfície utilizando o modelo BRASIL-SR está dividida em três etapas: a) tratamento dos dados climatológicos e imagens de satélite; b) aplicação do “Método de Dois-Fluxos”; e c) cálculo da radiação global.

A Figura 5(a) mostra o diagrama em blocos dos processos executados na primeira etapa. O banco de dados de temperatura foi desenvolvido a partir da compilação e análise geoestatística dos dados de todas as estações de superfície na América do Sul disponíveis na base de dados “Global Surface Summary of Day Data” mantida pelo National Climatic Data Center (NCDC). Essa base de dados está disponível em <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov>.

A umidade relativa 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. O banco de valores de umidade relativa para a América do Sul utilizados pelo modelo BRASIL-SR foram obtidos junto à “International Research Institute for Climate Prediction” (IRI) via transferência de arquivos do portal <http://ingrid.ldeo.columbia.edu>.

O banco de dados de albedo de superfície foi desenvolvido a partir das grades mensais de albedo na resolução $1^\circ \times 1^\circ$ disponibilizados por “Distributed Active Archive Center – Goddard Space Flight Center” (DAAC-GSFC) em <ftp://daac.gsfc.nasa.gov>. Os valores de albedo presentes nas grades mensais foram obtidos por integração de valores espectrais de albedo fornecidos por um modelo computacional alimentado por valores do “índice de vegetação por diferença normalizada” (IVDN) obtidos por satélite e outros parâmetros biofísicos relacionados ao tipo de vegetação [29].

Os dados de altitude para todo o território da América do Sul foram obtidos pela manipulação da base de dados GTOPO produzida pelo Earth Resources Observation System Data Center (EROS) mantido pelo U.S Geological Survey (USGS).

A determinação estatística do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} é também realizada nesta primeira etapa:

$$C_{eff} = \frac{(L - L_{clr})}{(L_{cld} - L_{clr})}\quad (13)$$

onde L representa a radiância medida pelo satélite para um determinado pixel da imagem e os índices “clr” e “cld” indicam o valor medido em condição de céu claro e céu totalmente encoberto, respectivamente.

Os valores C_{eff} descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: a cobertura de nuvens e as variações espaciais da profundidade ótica das nuvens. A composição de imagens de céu claro e de céu completamente nublado por meio de análise estatística de imagens do satélite GOES no período de interesse é uma etapa necessária para determinação do coeficiente de cobertura de nuvens. As imagens do satélite GOES fornecidas pelo CPTEC/INPE passam por um processamento para qualificação e gerenciamento de um banco de imagens antes de serem utilizadas na obtenção do coeficiente de cobertura de nuvens.

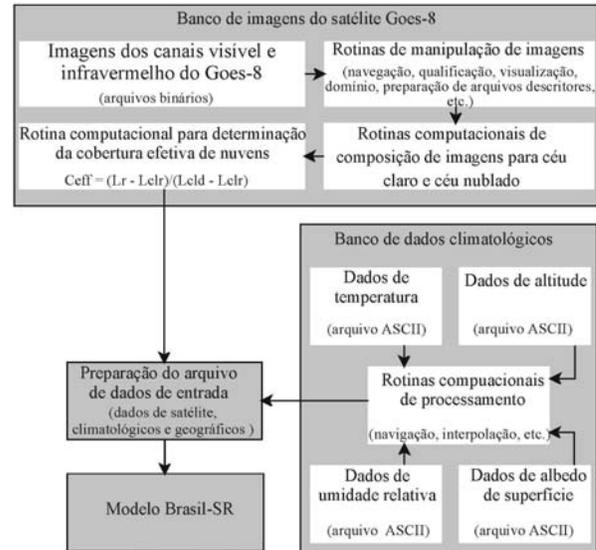


Figura 5a - Fluxograma dos procedimentos para manipulação dos dados de entrada para uso no BRASIL-SR.

A Figura 5(b) apresenta um fluxograma descritivo dos procedimentos principais do modelo BRASIL-SR para a modelagem atmosférica e aplicação do método de “Dois-Fluxos”. O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas céu claro e céu encoberto [12],[30],[31]. Dessa forma, o fluxo de radiação solar no topo da atmosfera é descrito por:

$$\Phi_r = (1 - C_{eff}) \cdot \Phi_{rclr} + C_{eff} \cdot \Phi_{rcld}\quad (14)$$

onde Φ_r é a o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera; Φ_{rcld} e Φ_{rclr} são, respectivamente, os valores de Φ_r em

condições de céu totalmente claro e totalmente encoberto. O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre a irradiância global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, de modo que se pode escrever:

$$\Phi_g = \Phi_0 \{(\tau_{clear} - \tau_{cloud}) \cdot (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud}\} \quad (15)$$

onde Φ_g é fluxo de radiação solar incidente na superfície, Φ_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera, τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas. Em resumo, a radiação solar incidente na superfície é estimada a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro, τ_{clear} , e a segunda refere-se à condição de céu encoberto, τ_{cloud} . A componente τ_{clear} é função do albedo de superfície, ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos. A componente τ_{cloud} é função do ângulo zenital solar, da espessura ótica e altitude do topo das nuvens. As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos. Dessa forma, o método de Dois-Fluxos é aplicado duas vezes: a primeira aplicação é utilizada para estimar a transmitância de céu claro e a aplicação seguinte para estimar a transmitância de céu totalmente encoberto. A natureza aleatória do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura de nuvens.

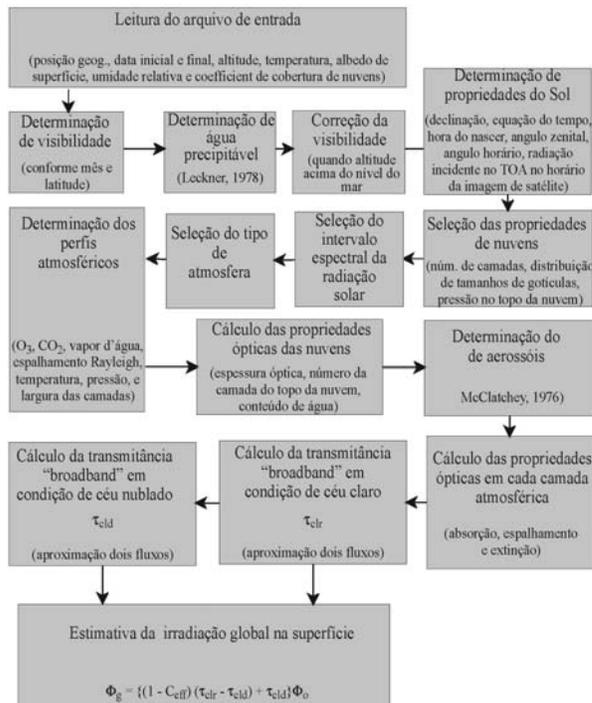


Figura 5b - Fluxograma do código computacional BRASIL-SR.

O modelo BRASIL-SR divide o espectro de radiação solar em 135 intervalos e a atmosfera em 30 camadas. Os processos radiativos considerados são: interação com nuvens, espalhamento Rayleigh devido aos gases atmosféricos, absorção por gases atmosféricos (O_3 , CO_2 e vapor d'água), e espalhamento Mie devido aos aerossóis. A concentração de cada constituinte, bem como a temperatura e a espessura de cada camada atmosférica, são estabelecidos com base no tipo de atmosfera selecionado com base no valor climatológico da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). A parametrização de água precipitável descrita por Leckner (1978) é adotada para avaliar a concentração de vapor d'água presente na atmosfera. A concentração de aerossóis em cada camada atmosférica é determinada por interpolação do perfil de aerossóis descrito por McClatchey [17] para altitudes entre zero e 50 km. É aplicada uma correção à concentração de aerossóis nos primeiros 5 km de altitude com base em valores climatológicos mensais de visibilidade. A concentração dos constituintes atmosféricos é utilizada para determinação da espessura ótica de cada processo de interação em cada camada atmosférica.

As propriedades físicas utilizadas para parametrização das nuvens são: número de camadas atmosféricas com nuvens, distribuição de tamanhos de gotículas, tipo de nuvens, pressão atmosférica no topo da nuvem e conteúdo total de água líquida na nuvem. Para determinação da transmitância τ_{cloud} , o modelo BRASIL-SR assume que: (a) a microfísica de nuvens é representada pela distribuição de tamanhos de gotículas do tipo de nuvem presente; (b) as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol e (c) as nuvens são vertical e horizontalmente homogêneas. O modelo utiliza a parametrização de Stephens [34] para determinar o coeficiente de extinção total e o conteúdo total de água líquida na nuvem. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotermicamente distribuído. A parcela da radiação difusa é estimada considerando o efeito das múltiplas reflexões entre as diversas camadas atmosféricas e que o albedo de superfície é idêntico a uma radiação difusa e radiação direta.

Após estimar os valores das duas transmitâncias a expressão (15) é utilizada para cálculo da radiação incidente em todas as situações de cobertura de nuvens.

9. Primeiros resultados produzidos pelo modelo Brasil-Sr

As estimativas de irradiação solar global fornecidas pelo modelo foram publicadas por Colle e Pereira em "Atlas de irradiação solar do Brasil" [2]. Para a preparação deste documento a validação do modelo foi realizada comparando as estimativas produzidas pelo modelo com valores medidos nas estações de superfície mantidas pelo LABSOLAR/UFSC em Santa Catarina e nas estações localizadas na região Amazônica durante o experimento ABRA-COS (Anglo Brazilian Amazonian Climate Observation Studies, CPTEC, [35]). O processo de validação foi dividido em duas etapas: a) validação em condições de céu claro (dias sem ocorrência de nuvens) e b) validação em qualquer condição de nebulosidade [2].

A validação do modelo em qualquer condição de nebulosidade apresentou desvio quadrático médio relativo [44] (representado por RMSE a partir deste ponto) da ordem de 8% e desvio médio relativo [45] (representado por MBE a partir deste ponto) da ordem de 6% na base diária [2]. A metodologia para a determinação dos

valores C_{EF} , as hipóteses adotadas na parametrização de nuvens, a variabilidade diária das propriedades físicas e a pequena resolução temporal das imagens de satélite podem explicar os desvios das estimativas obtidas com o modelo BRASIL-SR nestas circunstâncias.

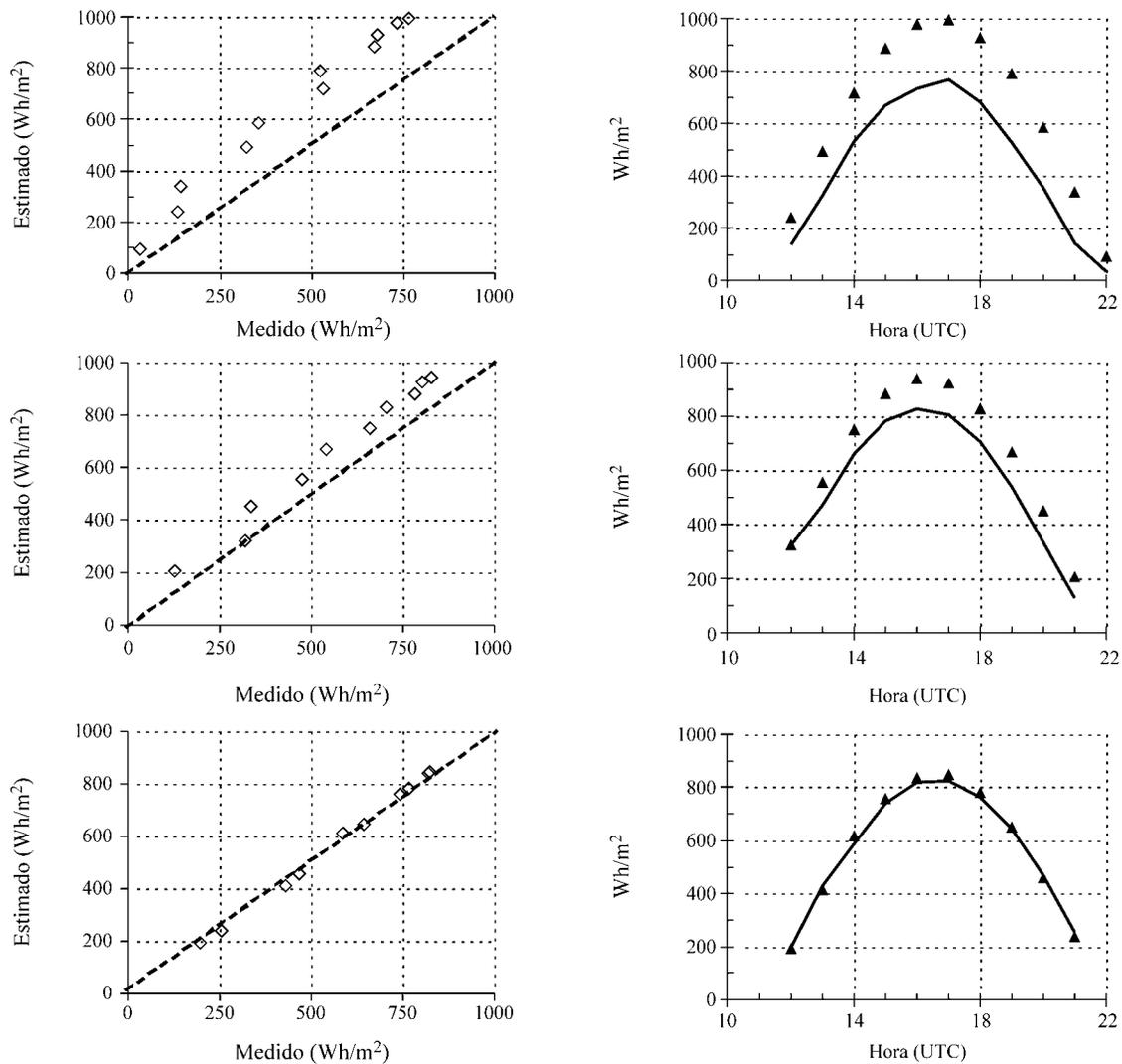


Figura 6 - Variação da irradiação global estimada e medida no transcorrer do dia de céu claro nas estações solarimétricas localizadas em Mina Potosi (a), Cuiabá (b) e Reserva Jarú (c). O dia em estudo nas duas primeiras estações encontra-se no período de máxima ocorrência de queimadas (fim de agosto e início de setembro) e o dia em estudo na Reserva Jarú ocorreu fora da estação seca (não havia queimadas nas proximidades). Nos gráficos à direita, os valores medidos estão representados por losangos e os valores estimados estão representados por quadrados.

A validação em condições de céu claro teve como objetivo avaliar o comportamento do modelo com relação as parametrizações dos processos radiativos envolvendo os gases atmosféricos e aerossóis. Dessa forma, a identificação de erros sis-

temáticos é facilitada pela ausência de nuvens cuja parametrização é mais imprecisa devido a sua grande variabilidade natural. Nestas condições, as estimativas de irradiação global diária fornecidas pelo modelo apresentaram desvios RMSE da ordem de 6%

para as estações localizadas no sul do Brasil e 9% para as estações do projeto ABRACOS. O valor do MBE, pertinente a ocorrência de erros sistemáticos, apresentou valores da ordem de 2% para as estações da região sul e 6% para as estações da região amazônica. Estes resultados mostram que o modelo executa uma parametrização adequada dos processos radiativos que ocorrem na atmosfera em condições de céu claro. No entanto, as estações localizadas na região amazônica apresentaram maior discrepância em relação aos valores medidos e isso pode ser explicado pela ocorrência de queimadas durante a estação seca (período do ano sem ocorrência de chuvas que se inicia em meados de maio e termina no mês de outubro). Os eventos de queimada característicos da região centro-oeste brasileira lançam para a atmosfera uma concentração de aerossóis que são responsáveis por uma atenuação extra da radiação solar que não foi parametrizada pelo modelo [30],[34],[36]. A superestimação da irradiação solar pode ser observada na Figura 6 que mostra a variação da irradiação global medida e estimada no transcorrer do dia de céu claro para as estações localizadas na região de ocorrência de queimadas. Pode-se verificar que as estações de Mina Potosi (MS) e Cuiabá (MS) estão sob a influência de queimadas e apresentaram diferenças de até 250 Wh/m² entre os valores estimados e medidos da radiação incidente. Por outro lado não houve queimadas nas vizinhanças da estação em Reserva Jaru (RO), e dessa forma ocorre uma excelente concordância entre valores medidos e estimados pelo modelo BRASIL-SR.

A Figura 7 apresenta uma comparação dos valores dos desvios MBE e desvios RMSE de estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para estações solarimétricas com e sem ocorrência de queimadas nas proximidades. Pode-se observar que os desvios aumentam quando existe a ocorrência de queimadas nas proximidades da estação em ambas as condições - céu claro e céu nublado.

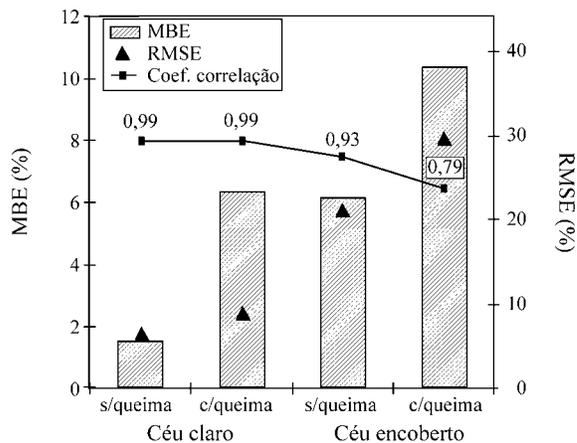


Figura 7 - Comparação dos desvios entre valores do total diário de irradiação solar global medidos e estimados pelo modelo BRASIL-SR, em condições de céu claro e em quaisquer condições de nebulosidade, determinados para estações localizadas nas proximidades e distantes de focos de queimadas.

Observou-se que, em condição de céu claro, o MBE de estimativas de irradiação global na superfície cresce cerca de três vezes

e o valor de RMSE duplica para as “estações próximas a focos de queimadas”. Deve-se destacar que a proximidade de focos de queima produz um incremento do MBE da mesma ordem daquele produzido pela presença de nuvens, o que permitiu confirmar a influência significativa dos aerossóis de queimadas na transferência radiativa da atmosfera. Em resumo, concluiu-se que a proximidade de focos de queimadas produz um erro sistemático nas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR devido a superestimação da irradiação solar por não considerar a atenuação devida aos aerossóis emitidos durante a queima. Já a ocorrência de nebulosidade induz erros não sistemáticos, superestimação em alguns casos e subestimarão em outros, devido a uma deficiência na determinação do coeficiente de cobertura de nuvens e na modelagem dos processos radiativos em nuvens, reduzindo a correlação entre valores estimados e medidos de irradiação global na superfície.

A Figura 8 mostra o mapa de irradiação global média anual e sua variabilidade mensal contido no “Atlas de Irradiação Solar do Brasil”.

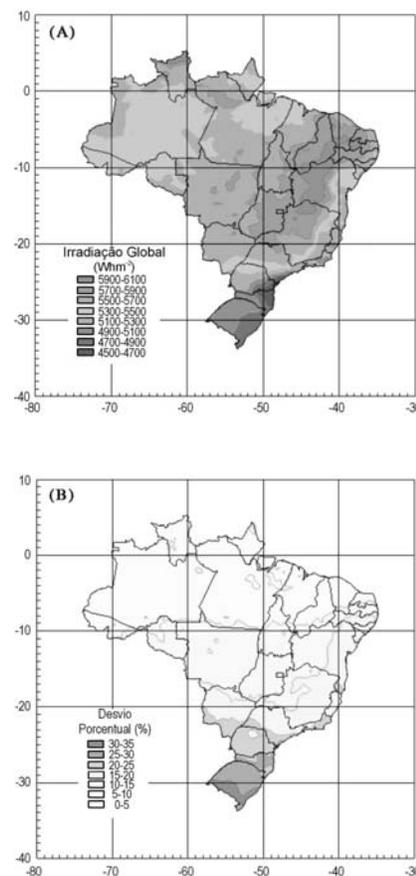


Figura 8 - Média Anual da irradiação solar global (A) no território brasileiro e sua variabilidade mensal (B) apresentado no “Atlas de Irradiação Solar do Brasil” publicado em 1998 [2].

Pode-se observar que a área do território brasileiro que apresenta os maiores valores de irradiação solar coincide com a

região de ocorrência de queimadas durante a estação seca [31]. Para a determinação de estimativas mais confiáveis da irradiação na superfície durante a estação de queimadas é necessário o aperfeiçoamento do modelo a fim de parametrizar a atenuação decorrente do espalhamento e absorção da radiação solar pelos aerossóis. Estudos estão sendo desenvolvidos para incluir uma parametrização confiável dos processos radiativos envolvendo aerossóis de queimada na solução da equação de transferência radiativa pelo método de “Dois-fluxos” e resultados preliminares mostraram que a principal dificuldade para implantação desta parametrização reside na pequena quantidade de conhecimento adquirido sobre a variabilidade da composição química e a distribuição espacial dos aerossóis causada pela diferentes condições da queima e da vegetação queimada e condições climáticas (ventos, umidade, precipitação) que influenciam o transporte de aerossóis na atmosfera [30]. Outras atividades de pesquisa para o aperfeiçoamento do desempenho do modelo BRASIL-SR e melhora da confiabilidade de suas estimativas tiveram continuidade após a publicação do “Atlas de Irradiação Solar”. Dentre as

modificações já implementadas e em fase final de validação podemos mencionar a obtenção de estimativas das componentes difusa, direta e PAR (radiação fotossinteticamente ativa - no intervalo de comprimentos de onda entre $0,3 \mu\text{m}$ e $0,7 \mu\text{m}$) da irradiação solar e a implementação de novas metodologias para determinação do coeficiente de cobertura de nuvens a partir das imagens de satélite.

O desenvolvimento de novas metodologias para determinação do coeficiente de cobertura de nuvens é de suma importância para aumentar a confiabilidade das estimativas produzidas. A diversidade de microclimas no Brasil devido a sua grande extensão torna necessário que a metodologia empregada seja capaz de identificar situações extremas como:

- a) condição de nebulosidade permanente, isto é a presença de nuvens durante todo o período de um mês de imagens de satélite de um horário específico;
- b) condição de claridade permanente, isto é a não ocorrência de nuvens em todo o período de um mês de imagens de satélite;
- c) discriminação de nuvens cirros de difícil identificação nas imagens de satélite produzidas na faixa espectral da radiação visível.

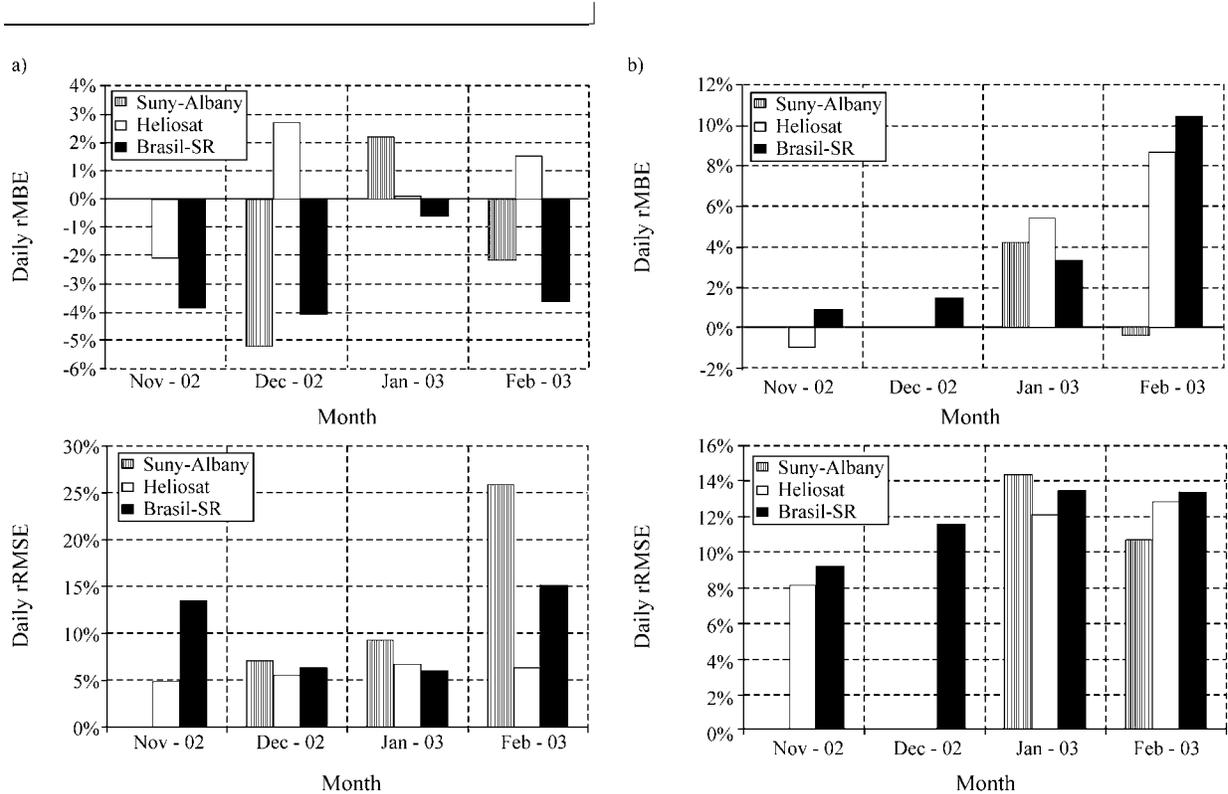


Figura 9 - Valores dos desvios MBE e RMSE apresentados pelos modelos BRASIL-SR, SUNY-ALBANY e HELIOSAT para as estações de superfície localizadas em (A) Caicó(Pe) e (B) Florianópolis(SC). Os resultados apresentados foram obtidos durante a etapa de intercomparação de modelos de transferência radiativa no Projeto SWERA.

A primeira condição é freqüente no verão da região Amazônica, enquanto a segunda condição ocorre com freqüência no clima semi-árido do sertão nordestino. Erros na identificação do valor de radiância medida pelo satélite nas condições de céu claro e totalmente encoberto acarreta uma imprecisão elevada nas estimativas em decorrência da definição do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens apresentada na Eq. 13 e de sua importância na expressão utilizada para cálculo da irradiação global apresentada na Eq. 15. Novas metodologias estão em fase final de desenvolvimento e já estão sendo testadas na etapa de intercomparação de modelos de transferência radiativa adotados no Projeto SWERA. A validação dessas metodologias é de difícil execução uma vez que dados de cobertura de nuvens medidos em superfície são obtidos por observação visual do céu e análise subjetiva do observador humano. Estudos estão em andamento para o desenvolvimento de instrumentação e metodologia de determinação au-

tomática da fração do céu com cobertura de nuvens a partir da superfície [37]. Esta instrumentação desempenhará papel relevante no aperfeiçoamento dos algoritmos de obtenção da cobertura de nuvens a partir de imagens de satélite uma vez que permitirá a realização de validações dos algoritmos de forma mais quantitativa e menos subjetiva.

10. Validação do modelo BRASIL-SR no âmbito do projeto SWERA

O modelo BRASIL-SR vem apresentando bom desempenho e suas estimativas apresentam precisão e confiabilidade similares a dos demais modelos de transferência radiativa adotados no Projeto SWERA: modelo SUNNY-ALBANY (State University of New York, USA), modelo DLR (Alemanha) e modelo NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) [38],[39].

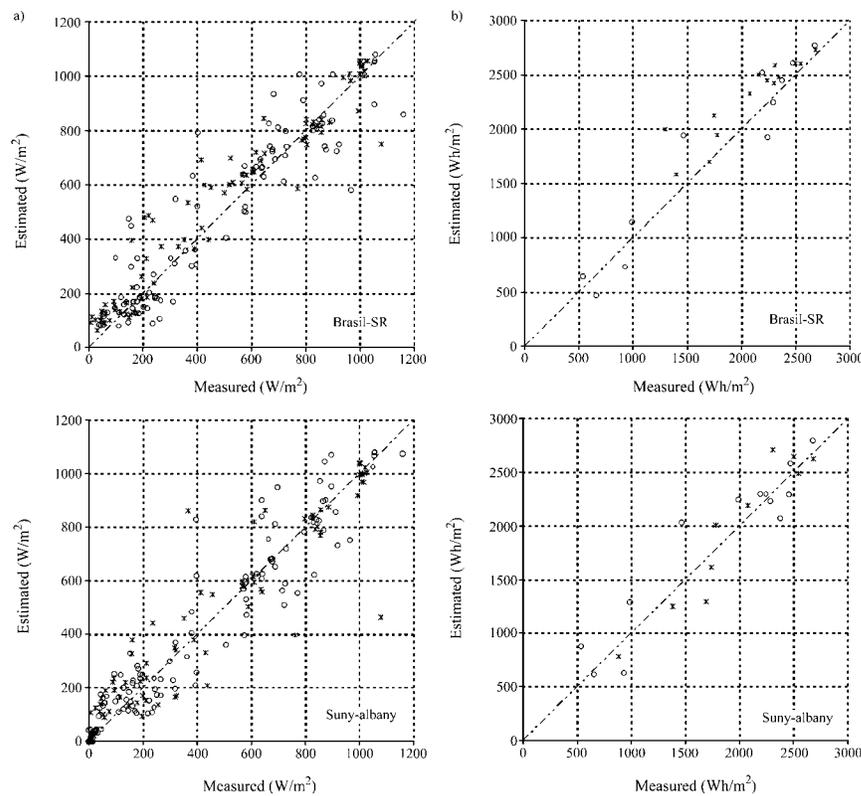


Figura 10 - Comparação entre valores estimados pelos modelos adotados no projeto SWERA e valores medidos em superfície na estação de Florianópolis: (A) valores horários e (B) valores diários.

Além destes, o modelo HELIOSAT, utilizado no mapeamento dos recursos de energia solar na Europa, também participa da etapa de intercomparação como um modelo de referência em

função de sua aceitação pela comunidade científica e de seu emprego no desenvolvimento do atlas europeu de irradiação solar [40]. O modelo BRASIL-SR utilizado nesta etapa de validação e

intercomparação de modelos no projeto SWERA já adota as novas metodologias mencionadas no tópico anterior. A Figura 9 apresenta uma comparação dos desvios apresentados pelos modelos para a estação de superfície em Caicó e Florianópolis [42]. A figura apresenta os valores relativos dos desvios $rMBE$ e $rRMSE$ definidos como a razão entre os desvios MBE e $RMSE$ e a irradiação solar média medida na estação de superfície. Os modelos DLR e NREL não estão representados por estarem enfrentando dificuldades na obtenção das estimativas de radiação para Caicó em virtude da condição de pouca nebulosidade apresentada no sertão nordestino. Pode-se observar que o modelo BRASIL-SR mostrou confiabili-

dade similar aos outros dois modelos representados. As Figuras 10 e 11 permitem a comparação dos valores estimados pelos modelos adotados no Projeto SWERA e os valores medidos em Caicó e Florianópolis tanto na base horária quanto diária. Quanto menor a dispersão ao longo da diagonal que passa pela origem dos eixos coordenados melhor o desempenho do modelo de transferência radiativa uma vez que consegue estimar valores de irradiação mais próximos dos valores medidos em superfície. Verifica-se em ambas as figuras uma discreta menor dispersão nos gráficos relativos ao modelo BRASIL-SR.

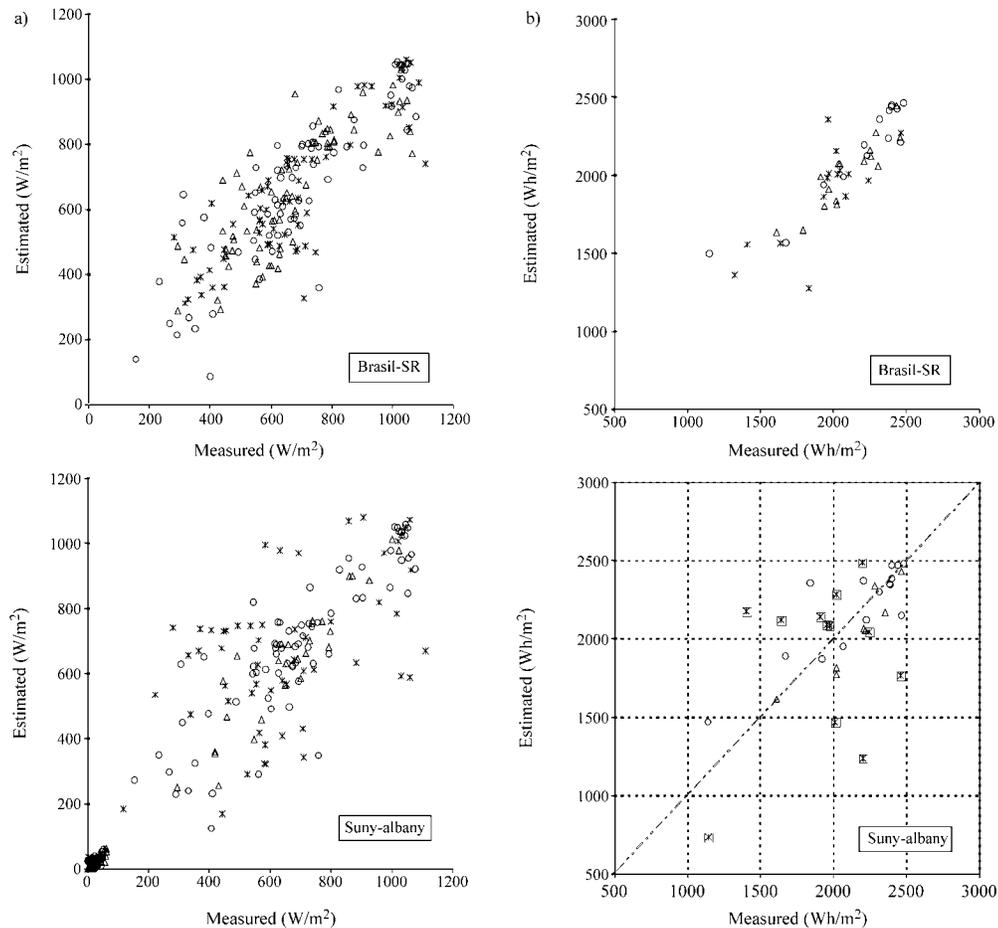


Figura 11 - Comparação entre valores estimados pelos modelos adotados no projeto SWERA e valores medidos em superfície na estação de Caicó: (A) valores horários e (B) valores diários.

A validação das estimativas das demais componentes da irradiação solar – difusa, direta e PAR – encontra-se em andamento, e os resultados preliminares mostram que o modelo BRASIL-SR apresenta resultados comparáveis em precisão e confiabilidade dos demais modelos. Todas as informações sobre o

andamento e resultados da etapa de intercomparação de modelos de transferência radiativa são mantidas atualizadas em http://www.dge.inpe.br/swera/EN/bdd/bdd_pub.html, incluindo a disponibilização de relatórios parciais, imagens de satélite e dados de superfície para download.

11. Conclusões

A utilização de modelos de satélite para estimar o potencial de utilização da energia solar é uma excelente alternativa para exploração dessa fonte limpa e renovável de energia, principalmente em países de grande extensão territorial. O emprego de satélites geoestacionários permite a aplicação de modelos aproximados para o cálculo da transferência radiativa na atmosfera que conduzem a estimativas razoáveis da irradiação solar global incidente na superfície e da sua variabilidade temporal e espacial. Entre essas aproximações, o método de “Dois Fluxos” se destaca por possibilitar uma redução no tempo de processamento desses modelos com mínima perda de acurácia, mesmo empregando configurações de máquinas modestas, como as de um microcomputador. Considerando-se grandes áreas de levantamento, como no caso do Brasil, e o custo unitário de um radiômetro de primeira linha (padrão BSRN – Baseline Surface Radiation Network), da ordem de R\$7.000,00, sem considerar o custo de instalação e operação, conclui-se que a relação custo benefício é altamente favorável ao emprego dos modelos de satélite.

O modelo BRASIL-SR combina o uso de dados do índice de cobertura efetiva de nuvens obtidos com auxílio de imagens de satélites geoestacionários e dados de séries climatológicas com a adoção da aproximação de “Dois-Fluxos” para solução da equação de transferência radiativa. As diferenças observadas entre as estimativas de irradiação solar na superfície e valores medidos em estações de medida em superfície mostram desvios quadráticos médios na ordem de 10% e desvios sistemáticos da ordem de 6%, na base diária.

A intercomparação das estimativas entre os modelos adotados no projeto SWERA e o modelo HELIOSAT vem comprovando o bom desempenho e a confiabilidade das estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR que, dessa forma, torna-se uma ferramenta importante para o levantamento dos recursos de energia solar no Brasil e América Latina. Atualmente, as maiores limitações ao emprego do modelo BRASIL-SR na América do Sul são a baixa densidade temporal das imagens do satélite GOES-8, a cada três horas, e as limitações na disponibilidade operacional de dados sobre alguns parâmetros ambientais da atmosfera, tais como dados sobre aerossóis e das propriedades microfísicas das nuvens.

Agradecimentos

À FAPESP pelo financiamento de uma bolsa de doutoramento e infra-estrutura computacional, através do processo 96/01243-7 (Fernando R. Martins). Ao CNPq pelo financiamento de bolsas DTI e doutorado (Mariza Pereira de Souza). Ao CPTEC/INPE pelo apoio no desenvolvimento do trabalho por meio da cessão de dados solarimétricos do Projeto ABRACOS, imagens de satélite GOES-8 e infra-estrutura computacional. Aos projetos SWERA (UNEP) e SONDA (FINEP) pelo apoio financeiro. À Tom Eck pela cessão dos dados referentes às estações localizadas em Mina Potosi e Cuiabá. Em especial para Samuel Luna de Abreu e Sergio Colle do LABSOLAR/UFSC pelo longo tempo de trabalho de pesquisa desenvolvido em conjunto para o aperfeiçoamento das estimativas de recursos de energia solar no território brasileiro.

Referências

- [1] C. Tiba et al., *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres* (Editora Universitária da UFPe, Recife, 2000).
- [2] S. Colle e E.B. Pereira, *Atlas de Irradiação Solar do Brasil (Primeira Versão para Irradiação Global Derivada de Satélite e Validada na Superfície)* (Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Brasília, 1998), 58 pp.
- [3] E.B. Pereira e S. Colle, *Revista Ciência Hoje* **22**, 25 (1997).
- [4] National Research Council, *Global change and Our common Future* (National Academy Press, Washington, 1989).
- [5] Climate Change - A Threat to Global Development Enquete Commission "Protecting the Earth's Atmosphere" of the German Bundestag, (Economica Verlag, Bonn, 1992), 235 pp.
- [6] J. Goldemberg, *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento* (EDUSP, São Paulo, 1998).
- [7] R.L. Vianello e A.R. Alves, *Meteorologia Básica e Aplicações* (Imprensa Universitária, Belo Horizonte, 1991).
- [8] E.F. Harrison, P. Minnis, B.R. Barkstrom and G.G. Gibson, in *Radiation Budget at the Top of Atmosphere*, edited by R.J. Gurney, J.L. Foster, and C.L. Parkinson, *Atlas of Satellite Observations Related to Global Change* (Cambridge University Press, San Diego, 1993) p. 19-38.
- [9] D.V. Hoyt and K.H. Schatten, *The role of the sun in climate change* (Oxford University Press, New York, 1997).
- [10] J.C. Ceballos, J.M. de Souza and A.C.T. Dantas, *Int. Jour. Climatology* **21**, 887 (2001).
- [11] C. Schillings, E.B. Pereira, R. Perez, R. Meyer, F. Trieb and D. Rene, in *World Renewable Energy Congress & Expo* (Colonia, Alemanha, 2002).
- [12] R. Stuhlmann, M. Rieland and E. Raschke, *Journal of Applied Meteorology* **29**, 586 (1990).
- [13] F.J. Diekmann, E. Raschke and H. Woick, *Meteorol. Rdsch.* **39**, 59 (1986).
- [14] R.T. Pinker and J. Ewing, *Journal Climate Applied Meteorology* **24**, 389 (1985).
- [15] C. Gautier, G. Diak and S. Masse, *Journal of Applied Meteorology* **19**, 1005 (1980).
- [16] J.D. Tarpley, *Journal Applied Meteorology* **18**, 1172 (1979).
- [17] M. Kerschgens, U. Pilz and E. Raschke, *Tellus* **30**, 429 (1978).
- [18] J.E. Hay and K.J. Hanson, *Bulletin American Meteorological Society* **59**, 1549 (1978).
- [19] E. Raschke, *Beitr. Phys. Atm* **45**, 1 (1972).
- [20] C. Raphael and J.E. Hay, *Journal of Climate and Applied Meteorology* **23**, 832 (1984).
- [21] K.J. Hanson, *Proceedings of Miami Conference on Remote Sensing* (U.S. Department of Commerce, Washington, 1971), p. 133-148.

- [22] T.H. Vonder Haar, *Solar Energy Data Workshop*, NOAA NSF-RA-N-74-062, 143-148 (1973).
- [23] T.H. Vonder Haar and J.S. Ellis, *Optical Solar Energy Utilization* **68**, 18 (1975).
- [24] J.C. Ceballos, *Revista Brasileira de Meteorologia* **15**, 113 (2000).
- [25] J.C. Ceballos and M.J. Bottino, in *Improved solar radiation assessment by satellite using cloud classification*, IRS 2000: Currents problems in atmospheric radiation. (A. Deepak Publishing, 2000), p. 60-63.
- [26] J.V. Dave and Z. Canosa, *Journal of Atmospheric Science* **31**, 1089 (1974).
- [27] K. Liou, *Journal of Atmospheric Science* **33**, 798 (1976).
- [28] J. Lenoble, *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures* (A. Deepak Publishing, Virginia, 1985).
- [29] Sellers *et al.*, *Journal of Climate* **9**, 706 (1996).
- [30] F.R. Martins, *Influência do Processo de Determinação da Cobertura de Nuvens e dos Aerossóis de Queimada no Modelo Físico de Radiação BRASIL-SR*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001, 330 p.
- [31] E.B. Pereira, F.R. Martins, S.L. Abreu, P. Couto, R. Stuhlmann and S. Colle, *Solar Energy* **68**, 91 (2000).
- [32] B. Leckner, *Solar Energy* **20**, 143 (1978).
- [33] R.A. McClatchey, R.W. Fenn, J.E.A. Selby, F.E. Volz and J.S. Garin, *Optical Properties of Atmosphere* (Air Force Cambridge Research Laboratories, Massachusetts, 1972), AFCRL-72-0497, 108 p.
- [34] G.L. Stephens, *Journal of Atmospheric Science* **35**, 2123 (1978).
- [35] Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Anglo Brazilian Amazonian Climate Observation Study - ABRACOS Project homepage, [Online]
<http://www.solarenergy.com/Html/Smith.html> e <http://www3.cptec.inpe.br/abracos/index.html>.
- [36] E.B. Pereira, A.W. Setzer, F. Gerab, P.E. Artaxo, M.C. Pereira and G. Monroe, *Jour. of Geoph. Res.* **101**, 2398 (1996).
- [37] M.P. Souza, *Desenvolvimento de uma Nova Metodologia para Determinação de Cobertura Efetiva de Nuvens*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999, 108 p.
- [38] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George and F. Vignola, *Solar Energy* **73**, 307 (2002).
- [39] E.B. Pereira, F.R. Martins, S. Abreu, H.G. Beyer, S. Colle, R. Perez and D. Heinemann, *Proc. ISES World Congress* (Göteborg, Sweden, 2003).
- [40] H.G. Beyer, C. Costanzo and D. Heinemann, *Solar Energy* **56**, 121 (1996).
- [41] K. Ya Kondratyev, *Radiation in the Atmosphere* (Academic Press, New York, 1969).
- [42] F.R. Martins, Partial Report, [Online]
http://www.cptec.inpe.br/swera/bdd/pub/_report1.PDF (2003).
- [43] $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$
- [44]
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (R_{SAT,i} - R_{EST,i})^2}{\sum_i^n R_{EST,i}}}$$
- [45]
$$MBE = \sum_i^n \frac{(R_{SAT,i} - R_{EST,i})}{R_{EST,i}}$$