

EFEITOS DA VARIABILIDADE DA VISIBILIDADE HORIZONTAL NA QUANTIFICAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO SOLAR

Rodrigo Santos Costa – rodrigo.costa@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. São José dos Campos/SP.

Ambidados Consultoria em Meio Ambiente, à serviço da Petrobras. Rio de Janeiro/RJ.

Fernando Ramos Martins – fernando.martins@cptec.inpe.br

Enio Bueno Pereira – enio.pereira@cptec.inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre. São José dos Campos/SP.

69999: ST5 – Dados Meteorológicos

Resumo. *Os aerossóis apresentam um papel importante na avaliação da irradiação solar direta para fins de geração de energia solar térmica e fotovoltaica concentradas, podendo influenciar na quantificação destes recursos, em especial durante a estação seca. O modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, desenvolvido no Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, vem sendo utilizado na quantificação do recurso energético solar para o território brasileiro e dentre os dados de entrada necessários para a sua execução, está incluída uma base de dados mensal de visibilidade horizontal climatológica. Porém, esta base não consegue representar de forma consistente a variabilidade espacial e sazonal dos aerossóis atmosféricos. Neste trabalho são apresentados resultados preliminares obtidos com a utilização de uma nova base de dados de visibilidade horizontal gerada a partir de observações em aeroportos para dois meses de condições meteorológicas distintas do ano de 2007. Os resultados obtidos foram obtido comparados com as estimativas produzidas com a utilização da base de visibilidade horizontal original e com dados coletados em estações da rede SONDA. Com a aplicação dessa nova metodologia, as estimativas de irradiação solar global e de suas componentes direta e difusa apresentaram desvios menores em relação aos dados observados em campo, principalmente no mês de Setembro quando ocorre o pico sazonal de queimadas na região Centro-Norte do Brasil. A influência da nova base de dados foi mais pronunciada durante a estação seca mesmo na região Sul do país onde a influência dos aerossóis emitidos em queimadas é menor e decorre como resultado do transporte atmosférico.*

Palavras-chave: Visibilidade horizontal, Aerossóis atmosféricos, Modelo de transferência radiativa.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil está entre os países que melhor aproveitam seus recursos renováveis. Em 2010, as usinas hidroelétricas foram responsáveis por cerca de 85% da geração de eletricidade no país; no entanto, a contribuição da geração eólica e da geração solar para a matriz energética brasileira ainda é muito pequena. Diversos estudos mostram que a exploração destas fontes de energia podem trazer benefícios ao Brasil, como o desenvolvimento a áreas remotas, ainda não atendidas pelo sistema interligado nacional; o aumento da segurança energética por meio de regulação da oferta de energia durante períodos de secas prolongadas, a redução da dependência de combustíveis fósseis e da emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera (Naspolini *et al.*, 2010; Rütther and Zilles, 2010; Pereira *et al.*, 2008; Martins *et al.*, 2008), entre outros.

Embora o potencial de aplicação das tecnologias eólica e solar no Brasil sejam imensos (Pereira *et al.*, 2008), a experiência brasileira tem encontrado algumas barreiras, que retardam a transição para um mercado de energia com maior participação destes recursos na matriz energética nacional. Um estudo recente, realizado por meio de consulta aos tomadores de decisão e líderes de pesquisa do setor energético, mostrou que fatores como a necessidade de aprimoramento da regulamentação do setor energético, a escassez de programas governamentais de incentivos, a falta de informações cientificamente confiáveis e o desenvolvimento de tecnologias adaptadas às condições específicas da climatologia observada no país tem contribuído para retardar a exploração desses recursos energéticos (Martins e Pereira, 2011).

No que tange a barreira de conhecimento científico, um grande esforço foi realizado com o desenvolvimento do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*). Este projeto, financiado pelo GEF/UNEP, teve como objetivo prover uma base de dados ambientais consistente e de elevada confiabilidade e acessibilidade, para incentivar a inserção de fontes renováveis de energia, como a energia solar e a energia eólica, na matriz de países em desenvolvimento. O Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2006) está entre os resultados mais significativos deste esforço, que propiciou ainda o desenvolvimento de diversos estudos e pesquisas, todos voltados para o uso do recurso energético solar e da análise de cenários energéticos para o Brasil (Viana *et al.*, 2011; Silva *et al.* 2010; Martins *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2008).

Para a elaboração do Atlas Brasileiro de Energia Solar, foi utilizado o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, que utiliza informações de imagens de satélite geostacionários e valores climatológicos de variáveis meteorológicas para modelar os processos radiativos que ocorrem na atmosfera. Seus resultados se mostraram bastante coerentes e foram validados com as estações de referência do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA) e com estações meteorológicas automáticas operadas pelo CPTEC/INPE (Pereira *et al.*, 2006). O BRASIL-SR apresentou desempenho similar a outros modelos de transferência radiativa utilizados no mapeamento do potencial solar em diferentes regiões do planeta, quando da realização da etapa de intercomparação de modelos adotados no projeto SWERA para mapeamento das diversas regiões do planeta (Beyer *et al.*, 2004). Ainda no âmbito do projeto SWERA, o Grupo de Pesquisa em Energias de Fontes Renováveis e Bioenergia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE), aperfeiçoou BRASIL-SR, que tem uma nova versão em fase de desenvolvimento, a fim de preparar uma segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar no ano de 2012.

Um dos aperfeiçoamentos em desenvolvimento está relacionado com a modelagem de aerossóis atmosféricos. Os aerossóis influenciam diretamente a disponibilidade de radiação solar incidente na superfície, e verificou-se que os desvios das estimativas do modelo BRASIL-SR eram maiores em situações com elevada carga de aerossóis atmosféricos. Essa deficiência nas parametrizações destes aerossóis ocorre por que no modelo BRASIL-SR simula a concentração de aerossóis assumindo um perfil para atmosfera-padrão corrigido por valores climatológicos da visibilidade horizontal. A metodologia proposta neste trabalho para aperfeiçoamento da modelagem inclui a geração de uma nova base de visibilidade horizontal que leva em consideração dados observados em campo que melhor descrevam a variabilidade decorrente do cenário de queima de biomassa e do crescimento das regiões metropolitanas no Brasil. A base de dados utilizada originalmente apresenta uma variabilidade sazonal e espacial que não representa a realidade observada na atualidade. Neste trabalho serão apresentados resultados preliminares obtidos para os meses de Março e Setembro, identificados como aqueles onde foram observados, respectivamente, os maiores e menores valores de visibilidade horizontal para o ano de 2007 no território brasileiro.

2. METODOLOGIA

2.1 Dados de visibilidade horizontal

Foram utilizados dados diários de visibilidade horizontal (mínima, máxima e média diária) e umidade relativa (mínima, máxima e média diária), além de dados horários de visibilidade horizontal, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e informação de tempo presente, oriundos de mensagens METAR, observados no ano de 2007 em 105 aeroportos na América do Sul. A localização das estações está apresentada na Figura 1.

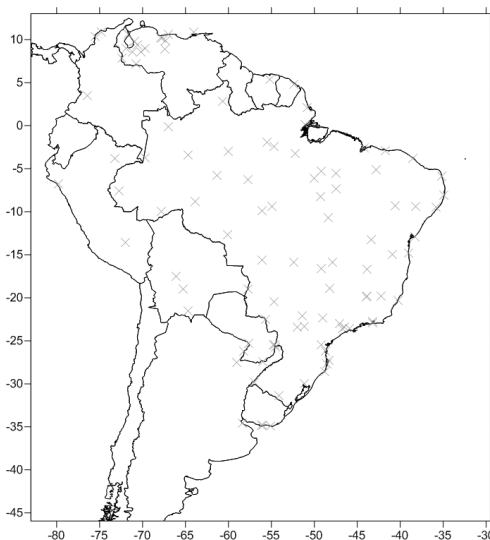


Figura 1: Localização das estações utilizadas na elaboração da base de visibilidade horizontal a ser utilizada no modelo BRASIL-SR.

Dois conjuntos diferentes de dados estavam disponíveis entre as 105 estações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. Para alguns 28 estações estavam disponíveis apenas valores diários das variáveis meteorológicas. Para as demais estações, valores horários estavam registrados. Dessa forma, houve a necessidade de desenvolver procedimentos específicos para o tratamento e manipulação dos dados em conformidade com os dados disponíveis em cada estação. Em ambos os casos, a metodologia foi baseada nos critérios utilizados por Husar *et al.*, (2000), para identificar valores de visibilidade horizontal que estivessem relacionados com aerossóis atmosféricos. O processamento inicial buscou a exclusão de registros onde os baixos valores de visibilidade horizontal pudessem ocorrer em função da presença de hidrometeoros - associados a fenômenos meteorológicos - e não à presença de aerossóis.

Assim, para os dados dispostos em médias diárias, foi implementada uma rotina computacional que realizou a exclusão dos registros onde a média diária da umidade relativa fosse igual ou superior a 90%. Para os dados horários, o

mesmo critério foi aplicado, mas por meio da exclusão dos registros onde a diferença entre a temperatura do ar e a temperatura do ponto de orvalho fosse inferior que 2,2 ° C. Também foram eliminados valores de visibilidade horizontal relacionados com as condições de tempo, sendo a eliminação de valores espúrios de visibilidade horizontal (*spikes*) realizada através do seu confronto com o campo de informação do tempo presente. Se o valor de visibilidade representasse o que é conhecido como névoa seca (*dry fog*), o dado era mantido na base; caso negativo, o dado era desconsiderado para a realização deste estudo. Para os dados diários, o registro de umidade relativa máxima era observado; a névoa seca era identificada quando na ocorrência de valores de UR menor ou igual a 75%.

Após a implementação destes critérios de consistência, uma rotina computacional determinou as médias mensais utilizadas para a confecção dos mapas de visibilidade horizontal para o território brasileiro. Foi utilizado o método de interpolação por *Kriging*, a fim de obter uma grade regularmente espaçada. Para fins de uso no modelo BRASIL-SR, a resolução espacial foi de 0,125° X 0,155°, idêntica à resolução espacial das imagens do satélite geoestacionário.

2.2 Modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico utilizado na obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície. Foi desenvolvido pelo grupo de Energias Renováveis e Bioenergia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CCST/INPE), em parceria com o Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC), tendo com base o modelo alemão IGMK (Stuhlmann *et al.*, 1990). Ele utiliza a aproximação de “Dois-fluxos” na solução da equação de transferência radiativa e faz uso de dados climatológicos (temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica) para parametrização dos processos radiativos na atmosfera. O modelo também estima a informação de cobertura de nuvens estatisticamente, a partir de imagens de satélite geoestacionário, assumindo que esta informação é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica (Martins, 2001).

O coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} , é determinado por meio de uma relação linear entre a radiância observada pelo satélite em condições de céu claro e encoberto. Este coeficiente descreve a distribuição espacial e espessura óptica das nuvens, sendo obtido pela Eq. (1):

$$C_{eff} = \frac{(L - L_{clear})}{L_{cloud} - L_{clear}} \quad (1)$$

onde L é a radiância visível medida pelo canal 1 (0.52–0.75 μm) do GOES-East, L_{clear} e L_{cloud} são as radiâncias medidas no mesmo canal em condições de céu claro e encoberto. Os valores de L_{clear} e L_{cloud} são produzidos através de análises estatísticas mensais das imagens do satélite. Martins e Pereira (2006) mencionam que a confiabilidade de C_{eff} é um fator importante para a acurácia das estimativas de irradiação solar na superfície. O modelo assume que fluxo de radiação solar no topo da atmosfera F_0 está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas, céu claro e céu encoberto. Assume também a existência de uma relação linear entre a irradiação global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera, de modo que a irradiação solar à superfície F_{\downarrow} é obtida através da Eq. (2).

$$F_{\downarrow} = F_0 \{ \tau_{clear} (1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} C_{eff} \} \quad (2)$$

A transmitância atmosférica em condições de céu claro (τ_{clear}) e em condições de céu encoberto de (τ_{cloud}) são obtidas por meio da resolução da equação de transferência radiativa na atmosfera (Martins, 2001). Para isso, o BRASIL-SR divide o espectro de radiação solar em 135 intervalos e a atmosfera em 30 camadas verticais. Os processos radiativos de interação da radiação solar com nuvens, espalhamento (Rayleigh) e absorção (O_3 , CO_2 e vapor d'água) por gases atmosféricos, espalhamento (Mie) devido aos aerossóis são modelados numericamente. A concentração de cada constituinte atmosférico, assim como a espessura de cada camada são definidos com base no tipo de atmosfera padrão, selecionado através do valor climatológico da temperatura do ar na superfície. A Eq. (2) é aplicada para cálculo da radiação incidente, após a determinação das transmitâncias nas duas condições extremas de nebulosidade. Foi demonstrado por Colle e Pereira (1998) que essa aproximação, bastante simples, apresenta bons resultados. O fluxograma exposto na Figura 2 mostra o diagrama de blocos do modelo BRASIL-SR.

2.3 Parametrização de aerossóis no modelo BRASIL-SR.

A concentração de aerossóis é determinada nas camadas atmosféricas a partir de perfis continentais desenvolvidos por McClatchey *et al.* (1972), sofrendo modificações em seus primeiros 5 km acima da superfície em função de valores climatológicos de visibilidade (Leckner, 1978; Selby e McClatchey, 1972). O modelo utiliza médias climatológicas dos valores mensais de visibilidade ao nível do mar, determinados a partir de observações de campo realizadas globalmente, dispostos em faixas latitudinais com resolução de 5°, conforme mostrado na Figura 3 para os meses de março e setembro. A transmitância para a radiação solar direta dos aerossóis é baseada em parametrização desenvolvida por Angström (1964):

$$\tau_{a\lambda} = e^{(-\beta\lambda^{-\alpha}m)} \quad (03)$$

onde β é o coeficiente de turbidez de Angström, α é o expoente de comprimento de onda, λ é o comprimento de onda da radiação solar e m é a massa óptica dos aerossóis. Este produto é modelado em três intervalos de altitude: menor que 2 km, entre 2 km e 10 km e maior que 10 km, para 37 comprimentos de onda.

Os valores de visibilidade atmosférica ao nível do mar são corrigidos de forma empírica para a elevação do solo, conforme a Eq. (04), antes de serem aplicados para a modificação do perfil atmosférico dos aerossóis:

$$\beta = (0,55)^\alpha (3,912 / VIS - 0,01162) [0,02472(VIS - 5) + 1,132] \quad (04)$$

onde VIS é a visibilidade horizontal. Esta fórmula resolve a transmitância na superfície e assume que ela diminui exponencialmente com a altitude.

Trata-se de uma metodologia bastante simplificada para a modelagem da variabilidade espacial e temporal dos aerossóis atmosféricos observados no Brasil, em especial durante a estação seca, onde se verifica uma maior emissão e transporte de material particulado, em razão da ocorrência de eventos de queimada na região Centro-Norte do país. o uso de valores de visibilidade horizontal próximos das condições realmente observadas na superfície é essencial para minimizar os desvios nos estimativas de irradiação solar na superfície fornecidas pelo modelo, principalmente durante a estação seca. Outro aspecto relevante está relacionado às condições meteorológicas observadas nesta estação do ano, que possibilitam o aumento do tempo de permanência dos aerossóis na atmosfera: os processos físicos responsáveis pela sua retirada são diminuídos, principalmente pela ocorrência de baixos valores de umidade do ar, pelos efeitos de inversão e pela diminuição da precipitação. Porém, deve-se ter em mente que os estudos anteriores indicaram que as estimativas de radiação foram satisfatórias em condições de céu claro, onde não existiam fontes antrópicas significativas de aerossóis. Estimativas em grandes regiões urbanas, ou em regiões de ocorrência de queimadas possuem condições muito acima das médias climatológicas de visibilidade adotadas originalmente no modelo BRASIL-SR, podendo acarretar desvios significativos nas estimativas de irradiação solar na superfície, podendo atingir valores de até 60% em alguns dias do ano (Martins, 2001).

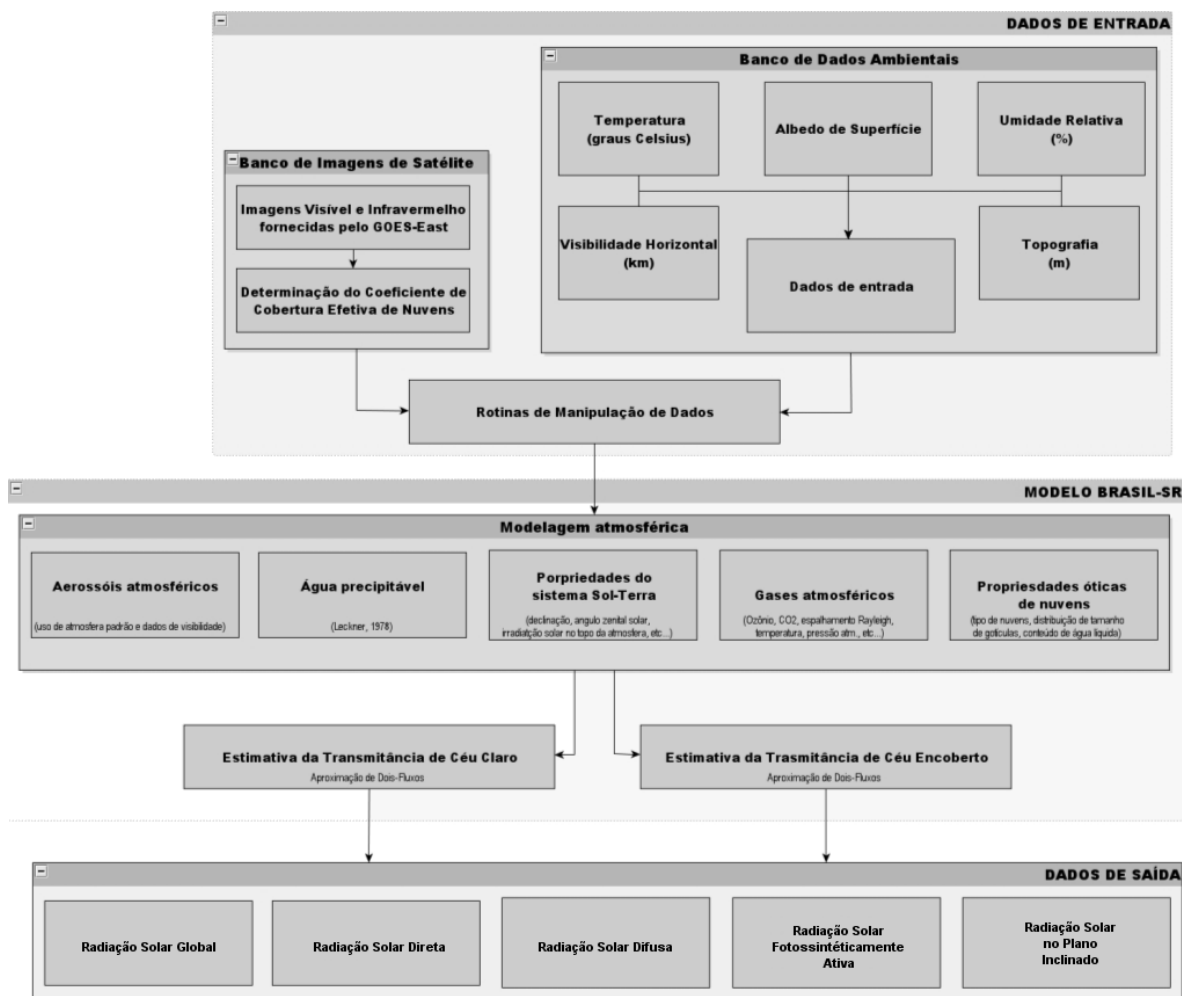


Figura 2 – Geração dos dados de entrada do modelo BRASIL-SR.

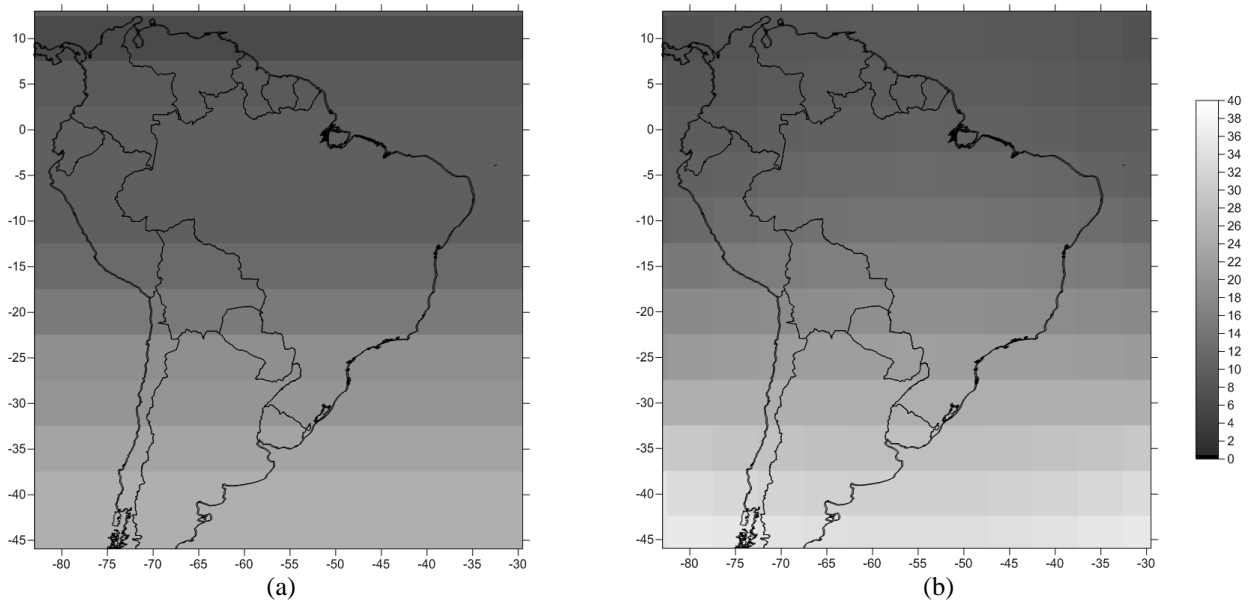


Figura 3 – Mapas de visibilidade horizontal climatológica utilizado na versão original do Modelo BRASIL-SR, para os meses de março (a) e setembro (b).

2.4 Validação das estimativas de irradiação solar na superfície.

As estimativas de irradiação solar global e das componentes difusa e direta foram comparadas com dados coletados em estações de superfície do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (SONDA). Esta rede, operada e mantida pelo CCST/INPE, tem como principal objetivo a aquisição de dados de irradiação solar, dados eólicos e dados meteorológicos a partir de estações distribuídas pelo território brasileiro. Os parâmetros coletados são destinados à avaliação e ao refinamento de modelos para estimativa e previsão do potencial energético renovável. Após passar por processos de qualificação e controle, eles são disponibilizados para acesso público em (<http://www.sonda.ccst.inpe.br/>). A Figura 4. Apresenta a localização das estações de coleta de dados distribuídas pelo território nacional. Para este estudo foram utilizadas as estações operando em Cuiabá, Campo Grande e São Martinho da Serra. O processo de qualificação aplicado identifica a confiabilidade dos dados através de algoritmos numéricos, sendo composto por quatro etapas, e sinalizam a qualidade do dado através de códigos numéricos de quatro dígitos. Não há nenhuma modificação dos valores obtidos, e sim uma espécie de classificação dos mesmos dentro dos critérios de qualificação estabelecidos, deixando a critério do usuário sua utilização. Estes critérios seguem padrões internacionais da *Base line Surface Radiation Network (BSRN)* para os dados de irradiação solar e da *WebMET* para os dados meteorológicos. Um detalhamento maior do procedimento de qualificação pode ser obtido em Chagas *et al.* (2006).

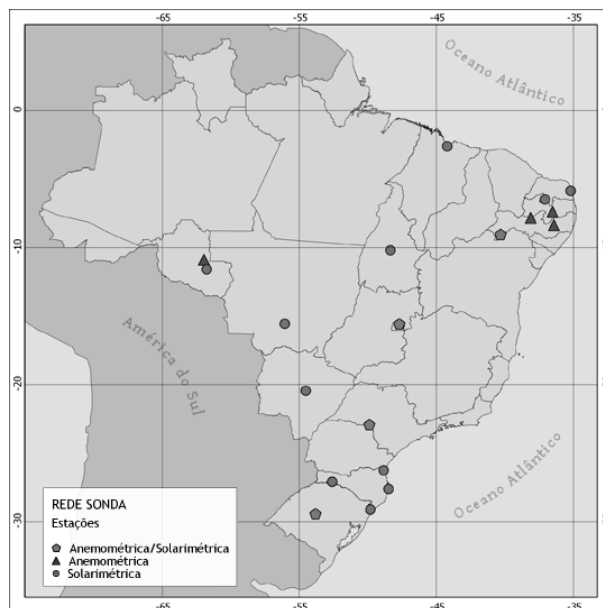


Figura 4. Mapa de localização das estações de superfície para a coleta de dados meteorológicos e radiométricos da rede SONDA. Toda a base de dados está disponível para acesso público em <http://www.sonda.ccst.inpe.br/>.

Os equipamentos instalados na estação SONDA – SMS são:

- Piranômetro CM 21 (*Kipp&Zonen*) – efetua medidas de radiação solar global na faixa de 300 a 2800 nm. Possui um sistema de ventilação CV 2 (*Kipp&Zonen*) para melhoramento de seu desempenho;
- Piranômetro CM 22 (*Kipp&Zonen*) – realiza medidas de radiação solar difusa na faixa de 200 a 3600 nm. Possui oclutador do disco solar acoplado a um “*Tracker 2AP*” para medir somente a radiação solar proveniente de outras direções, que não a direção do feixe solar;
- *Two Axis Positioner – 2AP* (*Kipp&Zonen*) – é um rastreador da posição do Sol de dois eixos que tem como finalidade ocultar os raios solares diretos para a realização das medidas de irradiação solar difusa e de radiação de onda longa; e também manter o pireliômetro direcionado para o Sol para coleta da radiação de incidência normal.
- Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) – trata-se de equipamento para medida de irradiância solar de incidência normal que efetua medidas de radiação solar direta em um plano normal à incidência de radiação, através do acompanhamento do sol ao ser acoplado ao “*Tracker2AP*”;
- Anemômetro Modelo 05106 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas da velocidade horizontal e da direção do vento de 0 a 60 m/s, resistindo a rajadas de até 100 m/s;
- Barômetro PTB 101 (*Vaisala*) – efetua medidas da pressão atmosférica na faixa de 600 a 1060 mbar através de um sensor capacitivo;
- Sensor de Temperatura do ar Model 41342 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas da temperatura do ar através de um sensor de temperatura de platina;
- Sensor de Temperatura do ar/Umidade do ar Model 41372 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas de temperatura e umidade relativa do ar através de um sensor de umidade de alta precisão.
- Datalogger CR23X Micrologger (*Campbell Scientific*) – converte e armazena temporariamente os sinais dos dados coletados em números que representam a grandeza da variável medida.

3. RESULTADOS

A Figura 5 apresenta os mapas da base de visibilidade horizontal atualizada (em km), gerados para os meses de março (a) e setembro (b) de 2007. Observam-se valores de visibilidade entre 9,9 km e 10,6 km no mês de março. Para o mês de setembro, os valores de visibilidade horizontal observados estão entre 6,6 km e 10,4 km. Pode-se atentar para a redução significativa da visibilidade na região Centro-Norte do país em setembro (6,4 km e 8 km), quando comparado com o mês de março (superior a 10 km). É importante mencionar que o ano de 2007 apresentou o segundo maior número de queimadas desde 2000, com um total de 231745 focos ao longo do ano (INPE, 2011), sendo observados 2346 focos em Março e 95406 focos em Setembro.

Definimos como mapas de diferença NP-OP aqueles gerados a partir da diferença das estimativas de irradiação solar na superfície fornecidas pelo modelo BRASIL-SR utilizando a visibilidade horizontal climatológica e as estimativas com a visibilidade horizontal atualizada. Assim, as Figuras 6 e 7 apresentam os mapas de diferença NP-OP para a irradiação global, direta e difusa (em kWh/m²), para os meses de março e setembro de 2007, respectivamente. Conforme já mencionado, em razão do fato de a visibilidade horizontal climatológica variar apenas latitudinalmente pode-se observar faixas horizontais nos mapas de diferenças NP-OP, principalmente a partir de 15° S, como consequência da acentuação da discrepância entre a visibilidade proposta e os seus valores climatológicos.

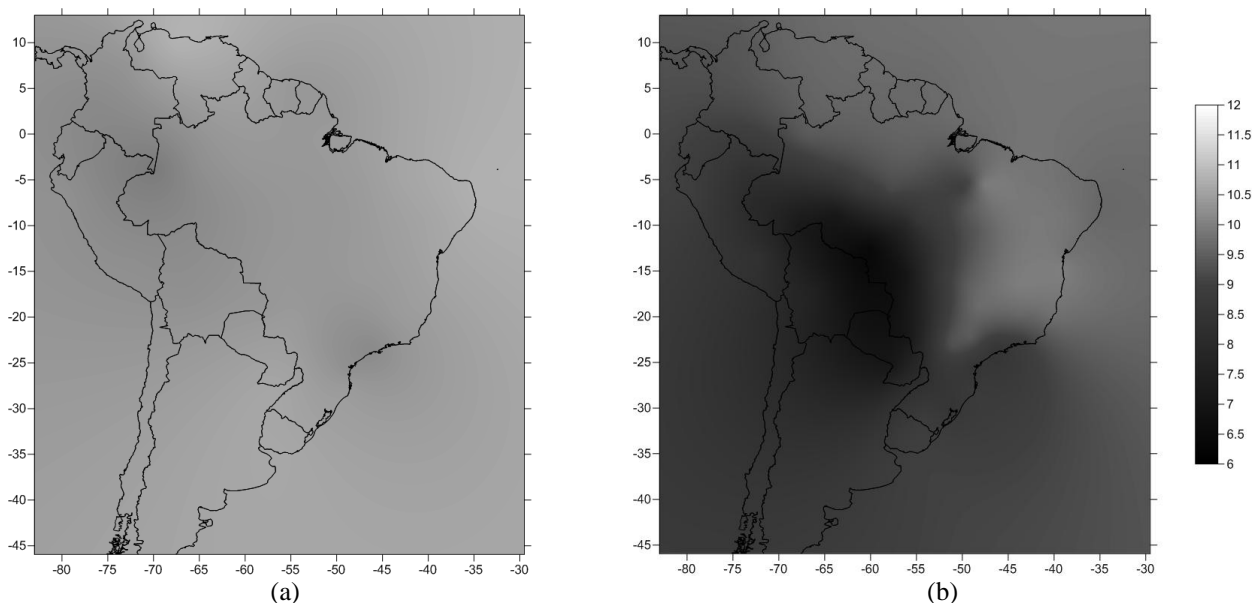


Figura 5 – Mapas de visibilidade horizontal atualizada (km) dos meses de março (a) e setembro (b) de 2007.

O mês de Março de 2007 (Figura 6), mesmo sendo aquele no qual as ocorrências de queimadas é pequena e quando foram registrados os maiores valores de visibilidade horizontal, mostra diferenças NP-OP relevantes em relação às estimativas de irradiação global e as componentes difusa e direta obtidas utilizando os valores climatológicos. Os resultados podem ser observados no mapa de diferenças NP-OP para a irradiação global (Figura 6a), que apresenta valores positivos sobre o território brasileiro, variando entre 0,05 e 0,20 kWh / m². Os mapas de diferenças NP-OP para a irradiação direta (Figura 6b) apresentaram diferenças expressivas após 15° S, com diferenças entre 0,2 e 0,3 kWh/m² no território brasileiro. No caso da irradiação difusa (Figura 6c), os valores das diferenças NP-OP apresentaram valores entre -0,08 e 0,1 kWh/m² no território brasileiro.

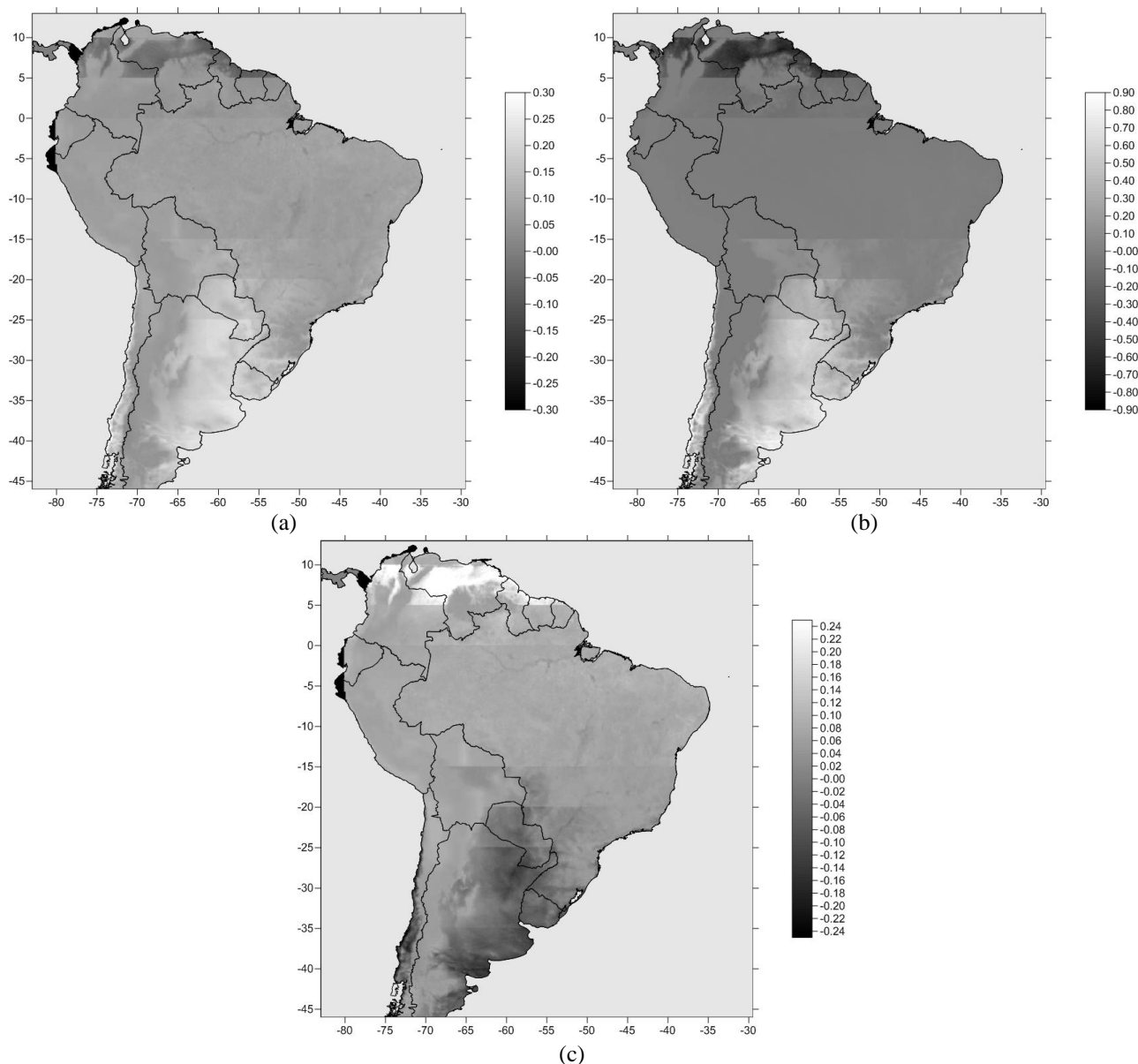


Figura 6 – Mapas de diferenças NP-OP para a irradiação global (a) e componentes direta (b) e difusa (c), em kWh/m², para o mês de Março de 2007.

As diferenças encontradas nas simulações ficaram mais acentuadas no mês de Setembro (Figura 7), quando os menores valores de visibilidade horizontal foram observados (Figura 5b), como consequência das emissões em eventos de queimadas na região Centro-Norte do Brasil. O mapa de diferença de irradiação global (Figura 7a), assim como no mapa do mês de Março, apresenta valores positivos sobre o território brasileiro, que variam entre 0,05 e 0,3 kWh/m². As diferenças na irradiação direta (Figura 7b) observadas dentro do território brasileiro estavam entre 0,1 e 0,9 kWh/m² e para a irradiação difusa (Figura 7c), foram observados valores entre -0,3 e 0,06 kWh/m². Importante salientar que essas diferenças foram obtidas apenas pela substituição dos arquivos de visibilidade horizontal, visando caracterizar a variabilidade das condições atmosféricas reais.

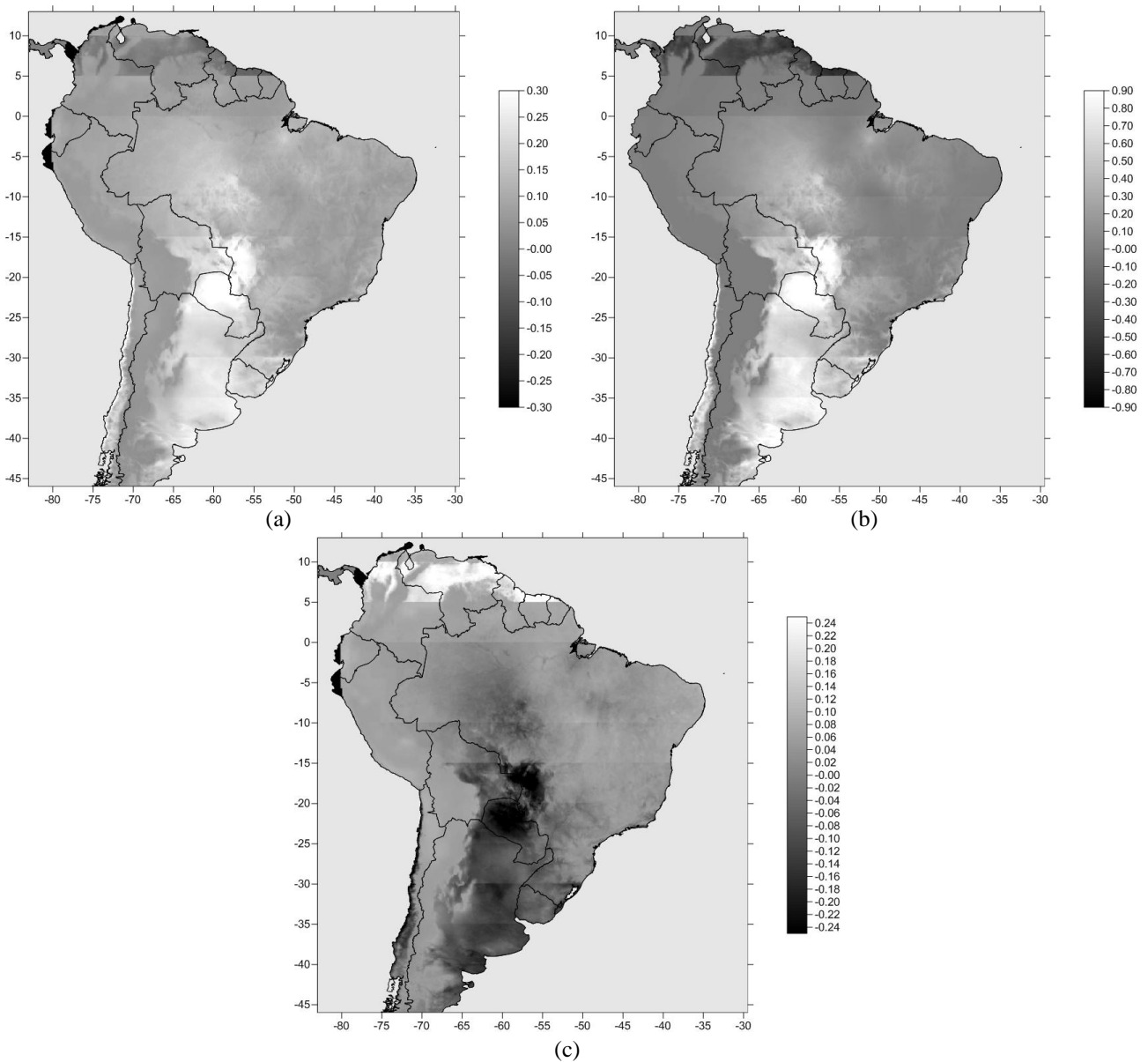


Figura 7 – Mapas de diferença de irradiação global (a), direta (b) e difusa (c), em kWh / m², do mês de Setembro de 2007.

A Tabela 1 apresenta o desvio quadrático médio (RMSE) e o desvio médio (BIAS) apresentados pelas estimativas de irradiação solar fornecidas pelo modelo BRASIL-SR quando utilizando a base de dados de visibilidade original e a proposta neste trabalho, com base em dados coletados nos aeroportos brasileiros. Os resultados apresentados na tabela mostram que a diferença de visibilidade atmosférica entre os valores utilizados originalmente e os valores proposto neste trabalho na região Centro-Norte do Brasil para o mês de Setembro, resultou na redução significativa dos desvios RMSE e BIAS para as estações localizadas em Cuiabá e Campo Grande no mês de Setembro. Mesmo para as estimativas para a estação localizada fora da região mais afetada pela ocorrência de queimadas apresentaram desvios menores quando a base de dados de visibilidade foi utilizada. Infelizmente, as duas estações localizadas na região Centro-Oeste não dispõem de sensores para a aquisição de dados da componente direta da irradiação solar.

Observa-se ainda que não houve uma variação apreciável dos desvios no mês de Março para as estações de Cuiabá e Campo Grande. Isso acontece porque a visibilidade proposta é muito próxima da visibilidade originalmente adotado pelo modelo para as localidades de Cuiabá e Campo Grande. Em São Martinho da Serra/RS, a base de visibilidade proposta apresenta um valor de visibilidade cerca de 50% menor do que aquele apresentado na base de dados original. Em função disso, os desvios obtidos para a irradiação global apresentaram um pequeno crescimento para essa localidade. Um estudo mais detalhado está sendo realizado para identificar as causas desse crescimento das discrepâncias das estimativas do modelo.

Tabela 1: Desvios RMSE and BIAS (em % do valor médio observado) das estimativas de irradiação solar global na superfície e suas componentes direta e difusa. Os resultados representam valores de integração diária da irradiação solar nos meses de Março e Setembro de 2007.

Cuiabá (-56.06 -15.55)		Global (%)		Direta (%)		Difusa (%)	
		Março	Setembro	Março	Setembro	Março	Setembro
RMSE	Visibilidade Original	7,25	27,44	*	*	*	41,39
	Visibilidade Proposta	9,36	21,71	*	*	*	23,45
BIAS	Visibilidade Original	7,23	-26,20	*	*	*	41,39
	Visibilidade Proposta	9,34	-20,44	*	*	*	19,89

Campo Grande (-54.53 -20.40)		Global (%)		Direta (%)		Difusa (%)	
		Março	Setembro	Março	Setembro	Março	Setembro
RMSE	Visibilidade Original	15,59	10,34	*	*	22,64	37,78
	Visibilidade Proposta	16,24	6,37	*	*	23,60	32,36
BIAS	Visibilidade Original	11,47	-5,32	*	*	0,51	27,65
	Visibilidade Proposta	11,64	-2,74	*	*	1,67	18,42

São Martinho da Serra (-53.81 -29.45)		Global (%)		Direta (%)		Difusa (%)	
		Março	Setembro	Março	Setembro	Março	Setembro
RMSE	Visibilidade Original	12,66	17,62	33,64	51,48	28,80	43,71
	Visibilidade Proposta	12,51	15,45	26,83	44,87	28,91	40,27
BIAS	Visibilidade Original	1,89	-12,98	-19,69	-37,32	18,56	13,49
	Visibilidade Proposta	2,39	-8,84	-12,58	-31,23	19,13	9,59

4. CONCLUSÕES

O trabalho em desenvolvimento tem como objetivo aprimorar a parametrização dos aerossóis atmosféricos utilizada no modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, em uso pelo Grupo de Energias Renováveis e Bioenergia do CCST/INPE para avaliação da disponibilidade de energia solar no território brasileiro. Este trabalho apresenta os resultados preliminares do estudo utilizando dados de visibilidade horizontal coletados em aeroportos brasileiros e de alguns países latino-americanos, para gerar uma nova base de dados para parametrizar a influência dos aerossóis atmosféricos na solução da equação de transferência radiativa. O objetivo foi preparar uma nova base de dados de visibilidade horizontal que representasse de forma mais consistente a variabilidade sazonal e espacial observada no território brasileiro como resultado da queima de biomassa e das emissões provenientes das atividades em grandes centros urbanos. Os resultados preliminares apresentados deste estudo estão apresentados neste artigo para os meses de Março e Setembro de 2007, ano com o maior número de queimadas no território brasileiro na última década.

Com o uso de valores de visibilidade horizontal mais próximos da realidade, o modelo BRASIL-SR apresentou estimativas de irradiação solar incidente na superfície com menores desvios em duas estações localizadas no Centro-Oeste brasileiro, onde a ocorrência de queimadas durante a estação seca é bastante intensa. De um modo geral, o modelo foi capaz de reproduzir a redução da irradiação global e irradiação direta, além do aumento da irradiação difusa na superfície. Investigação mais detalhada será necessária para avaliar as causas do pequeno crescimento dos desvios das estimativas no mês de março, onde não havia carga significativa de aerossóis na atmosfera. O uso da nova base de dados de visibilidade horizontal também produziu estimativas com desvios menores para a estação SONDA localizada em São Martinho da Serra, Rio Grande do Sul. Apesar desta estação estar distante da região com maior ocorrência de queimadas, os resultados indicam que a nova base de dados conseguiu simular de forma mais realista a concentração de aerossóis nessa área da região sul do Brasil.

REFERÊNCIAS

- Angstrom, A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, 16, 64-75, 1964.
 Beyer H. G.; Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Colle, S.; Perez, R.; Schillings, C.; Mannstein, H.; Meyer, R., 2004. Assessing satellite derived irradiance information for South America within the UNEP resource assessment project SWERA. Proceedings of 5th ISES Europe Solar Conference, Freiburg, Germany.

- Chagas, R. C., Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B. Procedimentos de qualificação de dados da rede de estações do Projeto SONDA In Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia Florianópolis 2006 Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia. 2006.
- Colle, S.; Pereira, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil – 1^a. versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 1998.
- Husar, R. B., Husar, J. D., Martin, L., Distribution of continental surface aerosol extinction based on visual range data. Atmospheric Environment 34, 5067-5078, 2000.
- INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Monitoramento de Focos de Queimadas. [online]: <http://peassaba.cptec.inpe.br/queimadas/qmanova/>, Outubro de 2011.
- Leckner, B. The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface elements of model, Sol. Energy 20, pp. 143–150, 1978.
- Martins, F. R., Pereira, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil In Energy Policy. , v.39, 4378-4390, 2011.
- Martins, F. R., Ruther, R., Abreu, S. L., Pereira, E. B.. Solar energy scenarios in Brazil, Part two: Photovoltaics applications In Energy Policy. , v.36, 2865-2877, 2008.
- Martins, F.R., Pereira, E.B. Parameterization of aerosols from burning biomass in the Brazil-SR radiative transfer model. Solar Energy 80, 231–239, 2006.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Abreu, S. L., Beyer, H. G., Colle, S., Perez, R., Heinemann, D.. Cross validation of satellite radiation transfer models during SWERA project in Brazil. Proceedings of ISES Solar World Congress 2003-Solar Energy for Sustainable Future in Goteborg, Sweden, June 2003.
- Martins, F.R., Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR. Tese de Doutorado - INPE, São José dos Campos, 2001.
- McClatchey, R. A., W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garin,; Optical properties of the atmosphere. AFGL-71-0279, Air Force Cambridge Research Laboratories, 85pp, 1972.
- Napolini, H.F., Militão, H.S.G., Rütther, R. The role and benefits of solar water heating in the energy demands of low-income dwellings in Brazil, Energy Conversion and Management, 51, 12, 2835-2845, 2010.
- Pereira, E. B., Lima, J. H. G., Martins, F. R., Abreu, S. L., Rütther, R., Chan, C. S., Amarante, O. A. C. Solar and Wind Energy Resource Assessment in Brazil d ed 1. vols 1, p. 100. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Rütther, R. Atlas brasileiro de energia solar. INPE, São José dos Campos, 2006.
- Rütther, R., Zilles, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil, Energy Policy, 39, 3, 1027-1030, 2011.
- Selby I. E. A., McClatchey R. E. Atmospheric transmittance from 0.25–28.5 μm , computer code LOWTRAN 3, AFCLR-TR- 75–0255, 1972.
- Silva, S. B., Oliveira , M. A. G., Severino, M. M. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon, Energy Policy, 38, 11, 6713-6723, 2010.
- Stuhlmann, R., Rieland, M., E. Raschke. An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data. J. Appl. Meteor. 29, 1990.
- Viana, T.S., Rütther, R., Martins, F.R., Pereira, E. B. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation In Solar Energy. 85, 486-495, 2011.