

Avaliação da irradiação solar utilizando modelo BRASIL-SR em condições de céu claro – estudo do impacto de aerossóis na Amazônia brasileira e no Cerrado

Madeleine Sánchez Gácita Casagrande – madeleine.gacita@unifesp.br
Fernando Ramos Martins – fernando.martins@unifesp.br
Universidade Federal de São Paulo, *campus* Baixada Santista, Santos, São Paulo.

Nilton Évora do Rosário
Universidade Federal de São Paulo, *campus* Diadema, São Paulo.

André Rodrigues Gonçalves

Rodrigo Santos Costa

Francisco José Lopes de Lima

Marcelo Pizutti Pes

Enio Bueno Pereira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo.

Resumo. *As plumas de aerossol geradas durante a estação de queima de biomassa no Brasil sofrem transporte de longo alcance, resultando em grandes profundidades ópticas de aerossol em um domínio extenso do território brasileiro. Como consequência, a irradiação solar da superfície descendente, e em particular o componente direto, pode ser significativamente reduzida. Estimativas da irradiação solar incidente na superfície considerando a contribuição radiativa dos aerossóis de queima de biomassa são necessárias para apoiar o setor de energia solar do Brasil. Este trabalho apresenta resultados obtidos com a 2ª geração do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, desenvolvida para melhorar a representação do aerossol e reduzir as incertezas nas estimativas de irradiação solar de superfície em condições de céu sem nuvens. Dois experimentos numéricos permitiram avaliar a habilidade do modelo usando dados AOD observacionais ou regionais de reanálise do MERRA-2 em uma região frequentemente afetada por queimadas. Quatro locais de medição de solo forneceram dados para alimentar o modelo e validar valores de GHI e DNI por ele fornecidas. As estimativas para a componente GHI foram obtidas utilizando o escalonamento δ -Eddington, mas para a DNI o escalonamento não foi adotado. É evidenciado um aumento no erro relativo das estimativas de GHI e DNI à medida que AOD aumenta. Os desvios de MBD variaram de -2,3 a -0,5%, RMSD entre 2,3 e 4,7% e OVER entre 0 e 5,3% ao usar dados de AOD observados in-situ. De maneira geral, nossos resultados indicam uma boa habilidade do BRASIL-SR para estimar GHI e DNI quando comparados com desvios apresentados pelas estimativas produzidas pelos modelos McClear e Rest2. Estudo de caso com estimativa da irradiação espectral também é apresentada neste artigo..*

Palavras-chave: *Avaliação de recursos solares; Irradiância normal direta; Aproximação Delta-Eddington; Queima de biomassa*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui um vasto recurso de energia solar (Lima *et al.*, 2019, Pereira *et al.*, 2017) e tem experimentado um aumento na implantação fotovoltaica nos últimos anos devido a incentivos governamentais e avanços tecnológicos (Santos e Cunha, 2019). Diversos estudos têm mostrado que a energia solar pode ser alternativa para aumentar a segurança energética, contrabalançando a vulnerabilidade imposta pela alta dependência da hidrelétrica (Luz *et al.*, 2018, Campos *et al.*, 2021). Em particular, as tecnologias de concentração de energia solar (CSP) têm mostrado um potencial notável para o Brasil em cenários de mitigação das mudanças climáticas (Martins *et al.*, 2012; Fichter *et al.*, 2017), especialmente como fonte de calor complementar para processos industriais ou geração de energia híbrida (Soria *et al.*, 2015; Milani *et al.*, 2017). Deve-se notar que algumas áreas potenciais para o desenvolvimento de CSP, como as regiões Centro-Oeste e Sudeste, são frequentemente afetadas pelas emissões de aerossóis em eventos de queimadas, principalmente durante a estação seca (Rosário *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2018).

Os aerossóis atmosféricos são o fator mais importante para a extinção da radiação solar em condições sem nuvens, seguido pelo vapor d'água. Em particular, a irradiação normal direta (DNI) é 2 a 4 vezes mais sensível à presença de aerossol do que a irradiação horizontal global (GHI) (Gueymard, 2012). O impacto dos aerossóis de poeira no DNI foi avaliado para vários locais áridos e semiáridos (Ruiz-Arias *et al.*, 2019; Boraiy *et al.*, 2017). No entanto, faltam avaliações semelhantes levando em consideração os aerossóis de queima de biomassa. Embora menor em magnitude do que o impacto dos aerossóis de poeira devido à profundidade ótica comparativamente moderados, o impacto dos aerossóis de queima de biomassa no DNI é significativo em regiões onde a atividade de queima é sazonalmente intensa. As grandes cargas de aerossóis normalmente injetadas na atmosfera durante a estação seca no Brasil podem resultar em profundidade ótica de aerossol (AOD) elevada, valores superiores 0,8 são frequentemente encontrados, para o comprimento de onda

de 500 nm, na Amazônia Meridional. Valores de AOD_{500nm} até 5,0 têm sido relatados em períodos com atividade de queima de biomassa mais intensa (Artaxo *et al.*, 2013).

Uma avaliação precisa da irradiância solar na superfície, principalmente o DNI, é, portanto, essencial para a análise da viabilidade de projetos de CSP em grande escala em regiões afetadas por plumas de queima de biomassa. Medições de solo a longo prazo são a maneira mais confiável de identificar e avaliar locais de prospecção de instalações de energia solar fotovoltaica e CSP (PV). No entanto, os dados de irradiâncias solares de superfície do solo são medidos apenas em alguns locais esparsa e heterogeneamente distribuídos, e as medições do componente DNI são ainda mais escassas globalmente e no Brasil. Nesse contexto, os modelos numéricos são ferramentas necessárias e poderosas para avaliação espacial da irradiância solar. No setor de energia, os modelos numéricos podem dar suporte para a análise de bancabilidade de projetos de energia solar e previsões de curto prazo para a operação da planta de geração (Sengupta *et al.*, 2021).

O modelo BRASIL-SR é um código de transferência radiativa baseado na aproximação de dois fluxos com escala δ -Eddington que vem sendo desenvolvido ao longo das últimas décadas (Martins *et al.*, 2008) e utilizado no mapeamento de irradiância solar do território brasileiro (Pereira *et al.*, 2017). Apesar da baixa incerteza das estimativas médias mensais e totais diários fornecidas pelo modelo, as versões anteriores do BRASIL-SR usavam uma parametrização de aerossol que não representa adequadamente o perfil vertical da atenuação da radiação em condições de elevada concentração de aerossóis da queima de biomassa (Costa *et al.*, 2016, Darbyshire *et al.*, 2018).

Para este trabalho, nova versão do modelo BRASIL-SR foi desenvolvida para melhorar a representação da atenuação radiativa do aerossol e reduzir as incertezas das estimativas de irradiância solar de superfície em condições nubladas e sem nuvens. Este trabalho apresenta resultados obtidos com a nova versão para a área de estudo que compreende os biomas Amazônia e Cerrado bastante afetados por eventos de queimada durante a estação seca de abril a setembro).

2. METODOLOGIA

2.1 Base de Dados em superfície

Este estudo está centrado na avaliação das incertezas nas estimativas do recurso solar em condições de céu sem nebulosidade em região sujeita à elevada concentração de aerossóis. Como qualquer estudo envolvendo a simulação numérica de processos radiativos na atmosfera, há necessidade de disponibilidade de dados de superfície de qualidade. As estações de coleta de dados solarimétricos, incluindo aquisição de dados DNI, na Amazônia Brasileira e no Cerrado foram cuidadosamente selecionadas, e são particularmente interessantes por estarem inseridas em região com alto número de focos de queimada durante a estação seca (de maio a outubro). Além disso, há disponibilidade de estações AERONET colocalizadas apresentando séries temporais de dados de aerossóis com alta qualidade foi fundamental para o desenvolvimento do estudo. As bases de dados utilizados são produtos de experimentos de campo de dois grandes projetos internacionais. O Green Ocean Amazon (GOAmazon) foi um experimento bem-sucedido e forneceu à comunidade científica dados solarimétricos de boa qualidade e AOD adquiridos por sites AERONET colocalizados. O GOAmazon se estendeu pelas estações chuvosa e seca de janeiro de 2014 a dezembro de 2015. Considerando tanto a disponibilidade de dados quanto a carga de aerossol, foi selecionado para o estudo o período de julho a dezembro de 2015. O ano de 2015 foi bastante seco e quente na região amazônica em decorrência de El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (Jiménez-Muñoz *et al.*, 2016). Como consequência, a atividade de queima de biomassa observada foi mais intensa do que nos anos anteriores (Aragão *et al.*, 2018; Silva Junior *et al.*, 2019). A Figura 1 apresenta a localização geográfica e a Tabela 1 lista os equipamentos utilizados das quatro estações.

Tabela 1. Metadados das estações de coleta de dados utilizadas no estudo.

Nome da Estação	Latitude	Longitude	Variáveis observadas e Instrumentação utilizada
Manacapuru – AM	-3,21°	-60,60°	SKYRAD: para aquisição de DNI, GHI, DHI; MFRSR: para aquisição de irradiância solar espectral e AOD AERONET: AOD, Água precipitável, Ozônio
Manaus – AM	-2,89°	-59,97°	MFRSR : DNI, GHI, DHI, Irradiância Espectral, AOD AERONET: AOD, AE, PW, O3
Brasília – DF	-15,60°	-47,71°	Pirheliômetro NIP Eppley/CHP 1 Kipp&Zonen: DNI Piranômetro CM22 Kipp&Zonen: GHI Piranômetro CM22 Kipp&Zonen com rastreador A2P : DHI AERONET: AOD, PWV, O3
Palmas – TO	-10,18°	-48,36°	Piranômetro CM11 Kipp&Zonen: GHI Piranômetro CM11 Kipp&Zonen e anel de sombreamento: DHI

Quatro algoritmos foram testados e avaliados para identificação da condição de céu claro (sem nebulosidade) na base de dados observacionais: Bright *et al.* (2020), Inman *et al.* (2015); Ineichen *et al.* (2006) e Ineichen *et al.* (2009). Em geral, Bright-Sun teve o melhor desempenho entre os quatro algoritmos, apresentando melhor habilidade para detectar a condição de céu sem nebulosidade mesmo em situações moderadamente poluídas. Portanto, esse foi o método usado para procedimentos de triagem em céu claro e sol claro.

Figura 1. Localização da área de estudo incluindo as estações de coleta de dados em superfície nos biomas Cerrado (fronteira vermelha) e Floresta Amazônica (fronteira azul).



2.2 Modelagem numérica aplicada na avaliação do recurso solar

O modelo do BRASIL-SR é um modelo físico de transferência radiativa que utiliza dados de satélite para estimar a irradiância solar na superfície incidente na superfície. O núcleo do modelo BRASIL-SR é executado para duas condições atmosféricas: sem nebulosidade (céu claro embora alta profundidade óptica de aerossol possa ocorrer) e completamente encoberto com nuvens apresentando profundidade óptica muito alta. A estimativa dos componentes da irradiância solar na superfície para quaisquer condições de cobertura de nuvens são obtidos pela interpolação entre as duas soluções usando o índice de cobertura de nuvens efetivo determinado com análise das imagens de satélite. As estimativas fornecidas pelo modelo são para o instante de tempo correspondente ao horário das imagens de satélite. Os cálculos de transferência radiativa seguem uma aproximação de dois fluxos com escala δ -Eddington. O DNI é obtido sem δ -scaling. Da mesma forma, a irradiação horizontal difusa (DHI) pode ser obtida como GHI considerando δ -scaling, ou pela diferença entre GHI e a irradiação horizontal direta obtida sem δ -scaling. O modelo BRASIL-SR não estimativa a contribuição da irradiação circunsolar.

O modelo BRASIL-SR usa 37 intervalos espectrais distribuídos de 200 a 3500 nm, com intervalos mais estreitos nas faixas espectrais de UV e visível. A absorção de radiação solar por vapor d'água, O₃, CO₂ e oxigênio é calculada usando ajustes de soma exponencial para transmitâncias (ESFT). A versão do modelo atual usa coeficientes de absorção atualizados para vapor de água calculados com base no método proposto por Wiscombe e Evans (1977) para convergência de ESFT e dados de transmitância obtidos com Py4CATS-PYthon (Schreier *et al.*, 2019) e banco de dados espectroscópico HITRAN2016 (Gordon *et al.*, 2017). Os dados espectrais solares no topo da atmosfera (TOA) seguem Gueymard (2004). Os perfis atmosféricos verticais de temperatura do ar, pressão atmosférica e gases seguem Anderson *et al.* (1986), e estão disponíveis para as cinco atmosferas-padrão selecionadas em função da temperatura da superfície.

O albedo espectral do solo para radiação direta e difusa foi obtido usando os parâmetros do kernel BRDF e fórmulas polinomiais com coeficientes que são independentes do comprimento de onda, conforme descrito por Schaaf *et al.* (2002). Os parâmetros do kernel BRDF dependem apenas do comprimento de onda e das características do solo e da vegetação local. Os parâmetros do kernel de superfície BRDF derivados para MODIS são interpolados linearmente para os 37 comprimentos de onda espectrais usados no modelo BRASIL-SR e posteriormente usados para calcular os albedos espectrais para cada comprimento de onda.

A profundidade óptica do aerossol em 550 nm é distribuída verticalmente para cada célula da grade e interpolada para os 36 comprimentos de onda de intervalo espectral restantes usando o expoente de Angström. O BRASIL-SR usa um perfil de aerossol fixo para alturas entre 5 km e 50 km com a profundidade ótica do aerossol dada por $\tau_{5-50\text{ km}} = 0,0216$. Abaixo de 5 km de altura, duas opções de perfil estão disponíveis para o usuário: (a) valor máximo do coeficiente de extinção de aerossol ocorre no primeiro km acima da superfície (a primeira camada atmosférica) com redução exponencial para alturas maiores, ou (b) o valor máximo do coeficiente de extinção de aerossol ocorre na segunda camada (2 km acima da superfície) com a primeira (1 km) e a terceira (3 km) camadas apresentando coeficientes de extinção iguais. A segunda opção simula o perfil típico de aerossol observado durante a estação de queima de biomassa (Darbyshire *et al.*, 2018), e foi adotada para este estudo. A seleção das propriedades ópticas do aerossol é baseada no bioma predominante na área de estudo.

O modelo BRASIL-SR requer os seguintes dados de entrada: longitude, latitude, altitude, temperatura da superfície, umidade relativa, vapor de água precipitável total (PW), ozônio total na coluna (O₃), AOD em 550 nm e expoente de Angström (AE), classificação de bioma e parâmetros de albedo de superfície determinados com satélite MODIS. Quando

executado para um domínio espacial (uma região ou território brasileiro), o modelo pode ser alimentado por dados regionais extraídos de bases de dados de reanálise ou obtidos por interpolação de dados de superfície. Além disso, o modelo pode ser executado para obter estimativas locais de irradiância se há disponibilidade de dados observados in situ como, por exemplo, AOD, AE e PW observados em estações de AERONET. Os dados locais de vapor d'água precipitável, quando disponíveis, são corrigidos para a altura da base do modelo usando a altura da escala para o perfil.

As saídas de banda larga de GHI, DNI e DHI estão disponíveis para a área de estudo (todos os pontos de grade se executado para um domínio espacial) estabelecidos no conjunto de dados de entrada. As saídas do BRASIL-SR incluem a radiação solar espectral de superfície descendente para locais específicos definidos pelo usuário. O modelo BRASIL-SR é menos complexo e exige menos recursos computacionais do que modelos como LibRadtran (Emde *et al.*, 2016) e DISORT (Laszlo *et al.*, 2016). No entanto, ele exige mais recursos computacionais do que modelos específicos de banda larga. Os requisitos de memória podem ser particularmente exigentes.

Para este estudo, dois experimentos numéricos foram realizados para avaliação do desempenho do modelo BRASIL-SR. No primeiro experimento denominado como experimento regional, o modelo foi executado para um domínio espacial que engloba as quatro estações de superfície com dados de entrada de AOD, AE, PW fornecidos pela base de dados de reanálise MERRA-2 (Randles *et al.*, 2017; Buchard *et al.*, 2017). No segundo experimento (denominado experimento in situ), o modelo BRASIL-SR foi executado localmente para as posições geográficas das estações de coleta de dados em superfície assumindo apenas a condição de céu claro (sem nebulosidade) e utilizando dados observacionais medidos in situ para as variáveis AOD, AE e PW. Por não possuir uma estação AERONET, apenas o experimento regional foi investigado na estação de Palmas–TO.

2.3 Indicadores estatísticos para validação das estimativas do modelo

Os seguintes índices estatísticos, na forma proposta por Gueymard (2014), foram adotados para avaliar a incerteza das estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

Desvio de Bias Médio:

$$MBD = \frac{100}{O_m} \sum_{i=1}^{N_{CS}} (p_i - o_i) \quad (1)$$

onde p_i e o_i são os valores de irradiância estimada pelo modelo e observada em superfície, respectivamente. O valor médio das observações é representado por O_m e N_{CS} é o número de observações em condições de céu claro.

- Raiz do Desvio Quadrático Médio

$$RMSD = \frac{100}{O_m} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{CS}} \frac{(p_i - o_i)^2}{N_{CS}}} \quad (2)$$

- Desvio Absoluto Médio

$$MAD = \frac{100}{O_m} \sum_{i=1}^{N_{CS}} |p_i - o_i| \quad (3)$$

- Integral de Kolmogorov-Smirnov – definido como as diferenças integradas entre as funções de distribuição cumulativa (CDFs) dos conjuntos de valores das estimativas fornecidas pelo modelo e os dados observacionais

$$KSI = \frac{100}{A_c} \int_{h_{min}}^{h_{max}} D_n dh \quad (4)$$

onde D_n é a diferença absoluta entre as duas distribuições normalizadas dentro do intervalo de irradiância, h_{min} e h_{max} são os valores de irradiância solar mínimo e máximo, e A_c é uma quantidade característica da distribuição determinada por $A_c = \left(\frac{1,63}{\sqrt{N_{CS}}}\right) (h_{max} - h_{min})$ para $N_{CS} > 35$.

- OVER – indicador semelhante ao KSI, mas a integração é calculada apenas para as diferenças dos CDFs que excedem o limite $\left(\frac{1,63}{\sqrt{N_{CS}}}\right)$ do método Kolmogorov-Smirnov.

$$OVER = \frac{100}{A_c} \int_{h_{min}}^{h_{max}} \text{Max} \left(D_n - \frac{1,63}{\sqrt{N_{CS}}}, 0 \right) dh \quad (5)$$

Além da comparação com dados observacionais, as estimativas do modelo BRASIL-SR foram comparadas com dois modelos de céu claro de banda larga, McClear (Gschwind *et al.*, 2019, CAMS, 2021) e REST2 (Gueymard, 2008) com o intuito de avaliar o comportamento do BRASIL-SR mediante modelos consolidados na comunidade acadêmica e larga aplicação em diversas regiões do globo. As estimativas produzidas pelo modelo McClear estão disponibilizadas livremente como resolução temporal de 1 minuto pelo *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS, 2021). O modelo combina uma tabela de consulta de resultados de transferência radiativa pré-calculados e um esquema de

interpolação. A parametrização da contribuição de aerossóis baseia-se em dados de AOD da reanálise do MACC. O tipo de aerossol é derivado das profundidades ópticas parciais das espécies de aerossóis MACC, enquanto o expoente de Angström é calculado a partir do MACC AOD em 550 e 1240 nm.

O modelo REST2 disponibiliza séries temporais para irradiância de céu claro (*cloudless conditions*) com 1 minuto de resolução temporal. O acesso à base de dados foi realizado com uso da biblioteca irradiapy-Python (Bright *et al.*, 2020). O modelo REST2 adota a reanálise MERRA-2 para os dados de AOD e AE. O modelo foi desenvolvido com base no modelo espectral SMARTS (Myers e Gueymard, 2004) duas bandas espectrais largas 0,29–0,70 μm e 0,70–4,0 μm para estimativa da irradiância solar na superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra os gráficos de dispersão entre a irradiação horizontal global (GHI) observada e estimada pelo modelo BRASIL-SE para os quatro locais e os dois experimentos: in-situ e regional. Em geral, há concordância entre as estimativas e observações, com alinhamento próximo à linha 1:1. Apenas os resultados do experimento regional estão apresentados para a estação localizada em Palmas-TO uma vez que não há disponibilidade de dados de aerossóis da AERONET nesta localidade.

A Tabela 2 lista os resultados de benchmarking para os dados GHI. O desvio de bias médio (MBD) foi pequeno em todas as estações para os dois experimentos de modelo. Os valores menores de MBD foram obtidos no experimento in-situ com valores variando no intervalo entre 0,3% <MBD <1,3%. No experimento regional, o valor de MBD variou entre -1,0% e 2,1%. O desvio quadrático médio também foi menor no experimento in situ com valores entre 2,1% e 2,9%, enquanto 3,2% \leq RMSD \leq 5,7% para o experimento regional. Os valores de MAD também foram maiores para o experimento regional, com valores entre 2,6% e 4,4%, enquanto no experimento in-situ, o menor valor foi de 1,6% em Brasília-DF. Valores semelhantes foram obtidos em Manacapuru-AM e Manaus-AM (2,1% e 2,0%, respectivamente). Os valores de KSI e OVER indicam a alta similaridade entre as funções de distribuição cumulativa (CDFs) das irradiâncias observada e modelada, exceto para Palmas-TO, onde o valor de OVER foi maior que zero no experimento regional, embora ainda apresentando um valor bastante reduzido (1,9%). Os indicadores estatísticos obtidos para as estimativas GHI fornecidas pelos modelos McClear e REST2 também estão listadas na Tabela 2. Ambos os modelos apresentaram desempenho semelhante no Manacapuru-AM e Manaus-AM. O REST2 apresentou menores desvios em Brasília-DF, enquanto McClear foi melhor em Palmas-TO. Os parâmetros estatísticos mostram que modelo BRASIL-SR proporcionou estimativas com menores desvios, exceto para Palmas-TO, onde McClear apresentou os menores desvios.

A aproximação de dois fluxos com escala de δ -Eddington é amplamente utilizada para resolver numericamente a equação de transferência radiativa na atmosfera em razão de sua menor demanda de tempo computacional comparado a outras metodologias. Os resultados alcançados com a metodologia são razoavelmente precisos para estimar a irradiância global horizontal incidente na superfície. No entanto, é esperado que o método resulte superestimativa da componente direta normal da irradiância na superfície. Matematicamente, isso acontece porque a profundidade óptica escalonada é sempre menor do que a profundidade óptica real (Joseph *et al.*, 1976). Neste estudo, o uso do escalamento δ -Eddington para estimativa da DNI foi avaliado em termos dos valores dos desvios obtidos na comparação com valores observados de DNI. O estudo identificou que o escalamento δ -Eddington acarreta desvios maiores quando adotado para estimativas da DNI conforme mencionado anteriormente. Maiores detalhes podem ser encontrados em Casagrande *et al.* (2021).

Tabela 2. Indicadores estatísticos apresentados para as estimativas de GHI na superfície fornecidos pelos modelos BRASIL-SR, McClear e REST2. Apenas o modelo BRASIL-SR apresenta estimativas para o experimento in-situ.

Modelo	Localidade	Ncs	\overline{GHI}_{obs} W/m ²	MBD W/m ² (%)	RMSD W/m ² (%)	MAD W/m ² (%)	KSI %	OVER %	
BRASIL-SR	in-situ	Manacapuru-AM	2758	460,4	-1,2 (-0,3)	13,4 (2,9)	9,7 (2,1)	14,1	0,0
		Manaus-AM	1631	459,6	5,9 (1,3)	11,0 (2,4)	9,0 (2,0)	12,1	0,0
		Brasília-DF	2424	621,5	0,9 (0,1)	13,0 (2,1)	10,0 (1,6)	14,3	0,0
	regional	Manacapuru-AM	3088	461,5	3,3 (0,7)	18,8 (4,1)	14,1 (3,1)	18,1	0,0
		Manaus-AM	2047	459,2	9,6 (2,1)	15,3 (3,3)	12,1 (2,6)	22,6	0,0
		Brasília-DF	5742	582,9	-5,1 (-0,9)	18,4 (3,2)	14,9 (2,6)	21,4	0,0
		Palmas-TO	3639	650,8	-6,2 (-1,0)	37,0 (5,7)	28,9 (4,4)	32,0	1,9
McClear	regional	Manacapuru-AM	3088	461,5	20,1 (4,4)	28,6 (6,2)	23,9 (5,2)	57,6	4,5
		Manaus-AM	2047	459,2	27,3 (5,9)	33,8 (7,4)	29,1 (6,3)	64,0	10,6
		Brasília-DF	5742	582,9	20,4 (3,5)	27,4 (4,7)	22,7 (3,9)	79,4	14,9
		Palmas-TO	3639	650,8	2,2 (0,3)	23,1 (3,5)	16,8 (2,6)	9,2	0,0
REST2	regional	Manacapuru-AM	3088	461,5	20,5 (4,5)	29,7 (6,4)	25,2 (5,5)	91,5	23,7
		Manaus-AM	2047	459,2	26,6 (5,8)	31,1 (6,8)	27,5 (6,0)	61,8	7,2
		Brasília-DF	5742	582,9	9,6 (1,6)	22,7 (3,9)	16,8 (2,9)	54,6	1,0
		Palmas-TO	3639	650,8	30,8 (4,7)	50,7 (7,8)	35,0 (5,4)	97,0	28,6

A Figura 3 apresenta os gráficos de dispersão entre DNI observado e estimado sem escalonamento δ -Eddington. Os valores de MBD variam entre 0,5 e 2% quando o escalonamento não é utilizado. Valores de RMSD também apresentaram uma redução de 3 pontos percentuais quando o escalonamento não é utilizado para a estimativa de DNI. Os indicadores MAD, KSI e OVER também apresentaram resultados significativamente melhores quando a estimativa de DNI é executado sem o escalonamento δ -Eddington.

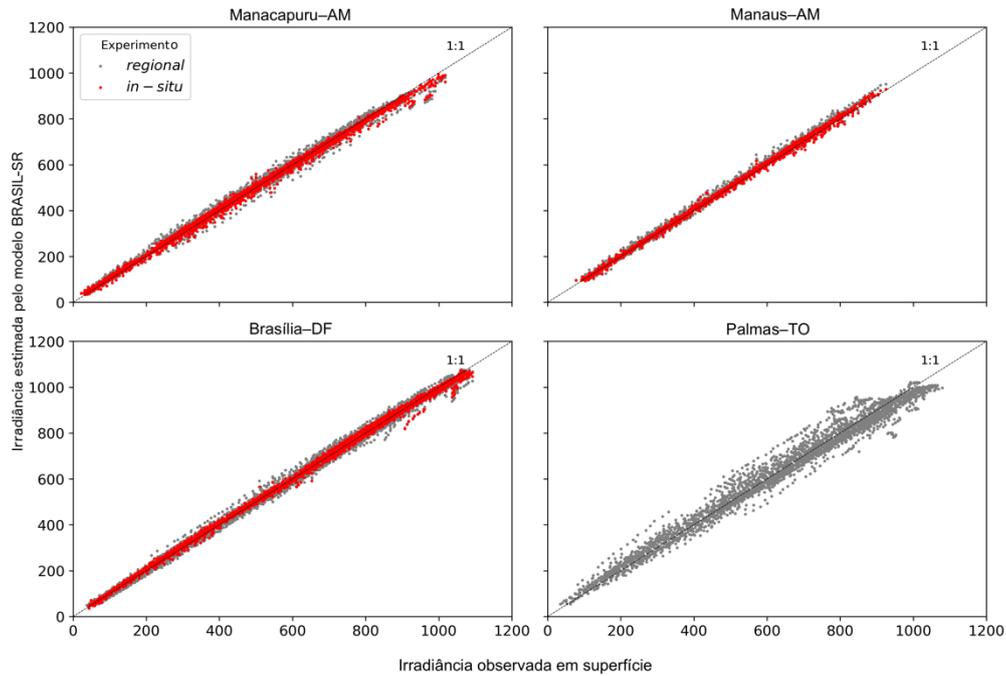


Figura 2. Gráficos de dispersão entre valores de irradiância global horizontal (em W/m^2) observados em superfície e estimativas produzidas pelo modelo BRASIL-SR. A linha superior estão as estações localizadas na Floresta Amazônica e a linha inferior apresenta os resultados para as estações no Cerrado. Fonte: Casagrande et al. (2021).

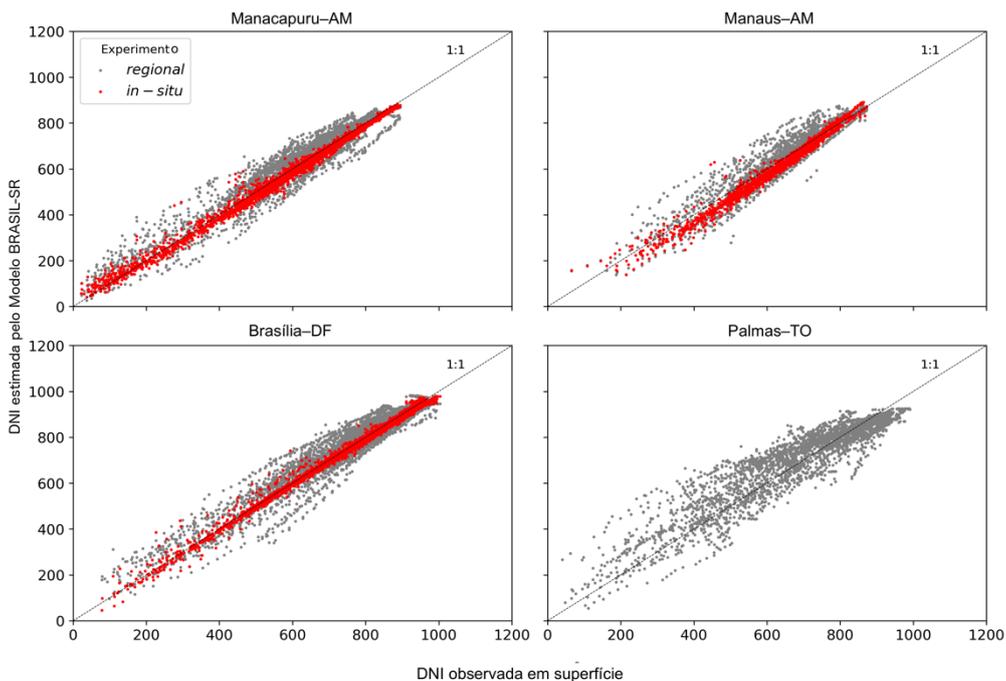


Figura 3. Gráficos de dispersão entre valores de irradiância direta normal (em W/m^2) observados em superfície e estimativas produzidas pelo modelo BRASIL-SR sem escalonamento δ -Eddington. Fonte: Casagrande et al. (2021).

A Tabela 3 apresenta os indicadores estatísticos determinados para as estimativas de DNI fornecidas pelo modelo BRASIL-SR nos dois experimentos quando o escalonamento não é utilizado. Deve-se ressaltar que as incertezas dos valores de DNI observados em Manaus-AM e Palmas-TO são maiores do que em Manacapuru-AM e Brasília-DF uma vez que, nas duas primeiras estações, a DNI observada indiretamente por meio do cálculo da diferença entre irradiância horizontal global e difusa medida pelo MFRSR e piranômetro CM11 Kipp&Zonen, respectivamente.

Tabela 3. Indicadores estatísticos apresentados para as estimativas de irradiância direta normal fornecidos pelos modelos BRASIL-SR, McClear e REST2. Apenas o modelo BRASIL-SR apresenta estimativas para o experimento in-situ.

Modelo	Localidade	N _{cs}	\overline{DNI}_{obs} W/m ²	MBD W/m ² (%)	RMSD W/m ² (%)	MAD W/m ² (%)	KSI %	OVER %	
BRASIL-SR	in-situ	Manacapuru-AM	2758	575,9	-13,4 (-2,3)	24,7 (4,3)	20,0 (3,5)	41,0	5,3
		Manaus-AM	1631	628,5	-13,7 (-2,2)	29,3 (4,7)	22,8 (3,6)	35,6	1,5
		Brasília-DF	2424	744,5	-4,1 (-0,5)	17,2 (2,3)	11,7 (1,6)	12,3	0,0
	regional	Manacapuru-AM	3088	575,9	12,1 (2,1)	53,4 (9,1)	42,4 (7,9)	35,8	1,7
		Manaus-AM	2047	628,5	9,0 (1,4)	51,0 (8,1)	39,3 (7,3)	28,8	6,2
		Brasília-DF	5742	744,5	0,8 (0,1)	45,8 (5,9)	33,0 (6,5)	25,1	1,6
		Palmas-TO	3639	715,8	8,1 (1,1)	68,7 (9,6)	51,4 (5,5)	79,7	26,9
McCclear	regional	Manacapuru-AM	3088	575,9	10,5 (1,8)	57,3 (9,8)	45,9 (7,9)	47,9	15,7
		Manaus-AM	2047	628,5	9,8 (1,6)	57,2 (9,0)	45,9 (7,3)	65,3	22,5
		Brasília-DF	5742	744,5	35,9 (4,6)	59,9 (7,7)	50,3 (6,5)	140,1	99,9
		Palmas-TO	3639	715,8	-7,4 (-1,0)	52,5 (7,3)	39,3 (5,5)	48,3	6,4
REST2	regional	Manacapuru-AM	3088	575,9	40,5 (6,9)	66,9 (11,4)	54,3 (9,3)	116,1	60,0
		Manaus-AM	2047	628,5	28,3 (4,5)	61,3 (9,7)	48,7 (7,7)	70,6	38,5
		Brasília-DF	5742	744,5	21,1 (2,7)	52,6 (6,8)	38,0 (4,9)	82,8	40,7
		Palmas-TO	3639	715,8	59,2 (8,3)	94,4 (13,2)	70,1 (9,8)	183,9	122,7

Além das estimativas de banda larga das irradiâncias global horizontal (GHI), direta normal (DNI) e difusa horizontal (DHI), o modelo BRASIL-SR também possibilita avaliar as componentes em 37 intervalos espectrais. A Figura 5 ilustra o GHI, DNI e DHI em 19/09/2015, na estação Manacapuru-AM. As estimativas de DHI são obtidas a partir da diferença entre a GHI obtida com escalonamento δ -Eddington e DNI sem escalonamento, uma vez que se mostraram com menores incertezas. A Figura 4 mostra a saída espectral do BRASIL-SR entre 200 e 2400 nm e os dados de irradiação global observada com uso do MFRSR às 18h30. Na comparação, foram utilizadas médias de 5 min das irradiâncias espectrais observadas, centradas no horário de saída do modelo. Rosario *et al.* (2019) apontam incertezas de 1,5% para a irradiância espectral observada com MFRSR.

A estimativa espectral de GHI fornecida pelo BRASIL-SR apresenta uma concordância elevada com as observações pelo MFRSR, como pode ser visto na Figura 5. A estimativa espectral de DNI apresenta uma ligeira subestimação na faixa visível do espectro, embora considerando as incertezas do modelo (resultante de um conjunto fixo de propriedades ópticas do aerossol, além das incertezas associadas ao processamento numérico dos métodos adotados na modelagem) e as diferenças na resolução entre a grade espectral do modelo e MFRSR. A subestimação do DNI resulta em uma superestimação semelhante do DHI, uma vez que esta é resultado da diferença entre o GHI e o DNI.

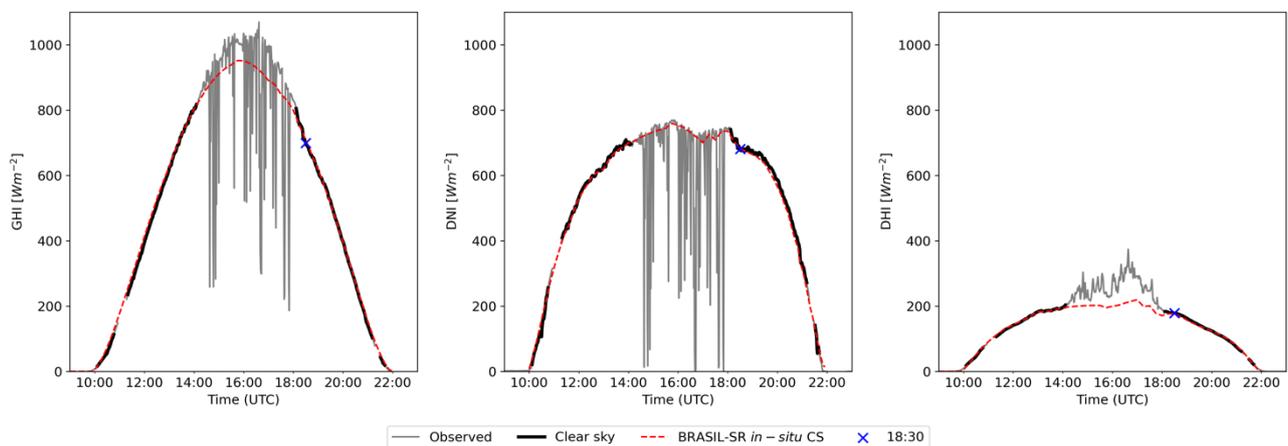


Figura 4. Integrais espectrais das componentes GHI (esquerda), DNI (centro) e DHI (direita) fornecidas pelo modelo BRASIL-SR para Manacapuru-AM em 19 de setembro de 2015. A hora da comparação dos resultados espectrais (18:30 UTC) está indicada pelo marcado X. Fonte: Casagrande et al. (2021).

4. CONCLUSÕES

Este estudo descreve, de forma sucinta, os resultados do aprimoramento do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, principalmente no que concerne aos processos de atenuação por aerossóis atmosféricos, água precipitável, albedo de superfície e perfil vertical de gases atmosféricos. O trabalho foi desenvolvido em colaboração pela Universidade

Federal de São Paulo e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais com fomento de bolsa de pós-doutoramento da FAPESP.

A análise das incertezas nas estimativas de GHI e DNI para condições de céu claro (sem nebulosidade, mas sujeito a carga de aerossóis) fornecidas pela nova versão do modelo BRASIL-SR foi realizada para estações de observação instaladas na Amazônia Brasileira e Cerrado que estão sujeitas ao impacto de eventos de queimadas no seu entorno durante a estação seca característica da região central do Brasil. As estimativas do modelo BRASIL-SR foram obtidas em dois experimentos numéricos: a) utilizando dados de aerossóis medidos localmente em missões de campo e em estações da AERONET e b) utilizando dados para pontos de grade disponíveis na base de dados de reanálise meteorológica MERRA-2. Os resultados de validação demonstraram que o modelo BRASIL-SR apresentou excelente desempenho em ambas as experiências. Como esperado, desvios menores foram observados nos experimentos *in-situ* com uso de base de dados de propriedades óticas de aerossóis (AOD e AE) e água precipitável fornecidas por estações AERONET colocalizadas com as estações de dados solarimétricos e meteorológicos.

No segundo experimento numérico (chamado de experimento regional), o modelo apresentou indicadores estatísticos de desempenho similares a dois modelos consolidados na comunidade acadêmica – REST2 e McClear. A vantagem do modelo BRASIL-SR em relação aos dois modelos reside no fato de permitir ao usuário definir a resolução temporal intra-horária em conformidade com a disponibilidade de dados satelitais do GOES-R para o território brasileiro. O modelo ainda possibilita ao usuário obter estimativas espectrais em bandas de interesse do usuário como PAR, UV e faixas espectrais características de curva de resposta de tecnologias de geração solar. Resultados preliminares para estimativas espectrais da irradiância na superfície mostram que o modelo possui excelentes resultados quando comparadas com valores observados em campo. No entanto, há necessidade de maior investigação para maior número de casos.

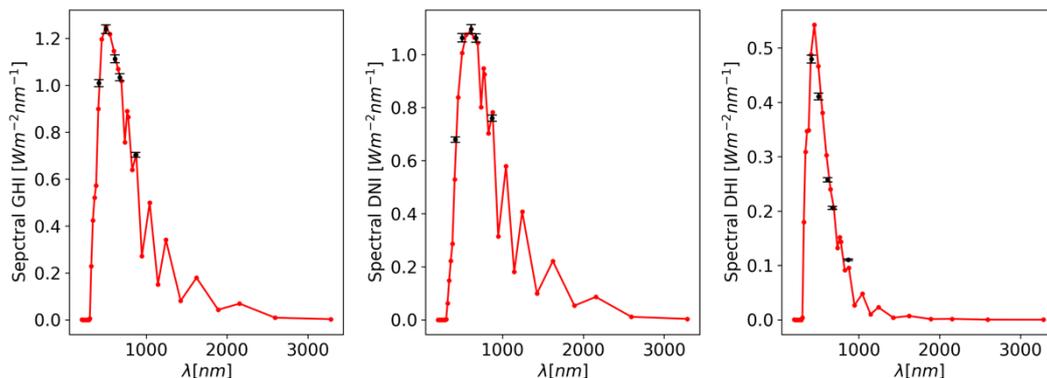


Figura 6. Irradiância espectral GHI (esquerda), DNI (centro) e DHI (direita) no dia 19 de setembro de 2015, 18:30UTC fornecida pelo modelo BRASIL-SR (linha vermelha) para Manacapuru-AM. Valores de irradiância medidos pelo MFRSR estão em negro com incerteza indicadas por Rosário et al. (2019). Fonte: Casagrande et al. (2021).

Agradecimentos

Agradecemos aos pesquisadores do IFUSP por manter as estações AERONET e ACONVEX (LFA-IFUSP). Agradecemos também à equipe de pesquisa do LABREN por manter a rede SONDA. Agradecemos à UNIFESP e ao INPE pelo apoio à equipe de pesquisa. Dra. Madeleine Casagrande foi financiada pela FAPESP 2019/05361-8. Agradecemos ao INCT-Mudanças Climáticas (FAPESP 2014/50848-9, CNPq 465501/2014-1 e CAPES FAPS n° 16/2014). Agradecimentos são devidos também ao CNPq pelas bolsas de pesquisa de Fernando Martins e Enio Pereira.

REFERÊNCIAS

- Anderson, G.P.; Clough, S.A.; Kneizys, F.X.; Chetwynd, J.H., Jr.; Shettle, E.P. *Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km)*; Technical Report AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophysical Laboratory, Hanscom AFB, MA, USA; 1986.
- Aragão, L.E.; Anderson, L.O.; Fonseca, M.G.; Rosan, T.M.; Vedovato, L.B.; Wagner, F.H.; Silva, C.V.; Silva Junior, C.H.; Arai, E.; Aguiar, A.P.; et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nat. Commun.* 2018, 9, 1–12. doi:10.1038/s41467-017-02771-y.
- Artaxo, P.; Rizzo, L.V.; Brito, J.F.; Barbosa, H.M.; Arana, A.; Sena, E.T.; Cirino, G.G.; Bastos, W.; Martin, S.T.; Andreae, M.O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. *Faraday Discuss.* 2013, 165, 203–235.
- Boraiy, M.; Korany, M.; Aoun, Y.; Alfaro, S.C.; El-Metwally, M.; Abdelwahab, M.M.; Blanc, P.; Eissa, Y.; Ghedira, H.; Siour, G.; et al. Improving direct normal irradiance retrieval in cloud-free, but high aerosol load conditions by using aerosol optical depth. *Meteorol. Z.* 2017, 26, 475–483. doi:10.1127/metz/2017/0844.
- Bright, J.M.; Bai, X.; Zhang, Y.; Sun, X.; Acord, B.; Wang, P. irradipy: Python package for MERRA-2 download, extraction and usage for clear-sky irradiance modelling. *Sol. Energy* 2020, 199, 685–693.

- Buchard, V.; Randles, C.; Da Silva, A.; Darmenov, A.; Colarco, P.; Govindaraju, R.; Ferrare, R.; Hair, J.; Beyersdorf, A.; Ziemba, L.; et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *J. Clim.* 2017, 30, 6851–6872.
- Campos, E. F.; Pereira, E.B.; van Oel, P.; Martins, F.R.; Gonçalves, A.R.; Costa, R.S. Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. *J. Environ. Manag.* 2021, 294, 112989. doi:10.1016/j.jenvman.2021.112989.
- Casagrande, M. S. G.; Martins, F. R.; Roário, N. E.; Lima, F. J. L.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. C.; Zarzur, M.; Pes, M. P.; Pereira, E. B. Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote Sensing* 2021, 13(22), 4527.
- Copernicus Atmosphere Monitoring Service. CAMS McClear Service for Irradiation under Clear-Sky, 2021. Available online: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-mcclear> (accessed on July 25th, 2021).
- Costa, R.S.; Martins, F.R.; Pereira, E.B. Atmospheric aerosol influence on the Brazilian solar energy assessment: Experiments with different horizontal visibility bases in radiative transfer model. *Renew. Energy* 2016, 90, 120–135.
- Darbyshire, E.; Morgan, W.T.; Allan, J.D.; Liu, D.; Flynn, M.J.; Dorsey, J.R.; OShea, S.J.; Lowe, D.; Szpek, K.; Marengo, F.; et al. The vertical distribution of biomass burning pollution over tropical South America from aircraft in situ measurements during SAMBBA. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2018, 19, 5771–5790. doi:10.5194/acp-2018-921.
- Emde, C.; Buras-Schnell, R.; Kylling, A.; Mayer, B.; Gasteiger, J.; Hamann, U.; Kylling, J.; Richter, B.; Pause, C.; Dowling, T.; et al. The libRadtran software package for radiative transfer calculations (version 2.0.1). *Geosci. Model Dev.* 2016, 9, 1647–1672. doi:10.5194/gmd-9-1647-2016.
- Fichter, T.; Soria, R.; Szklo, A.; Schaeffer, R.; Lucena, A.F. Assessing the potential role of concentrated solar power (CSP) for the northeast power system of Brazil using a detailed power system model. *Energy* 2017, 121, 695–715.
- Gordon, I.E.; Rothman, L.S.; Hill, C.; Kochanov, R.V.; Tan, Y.; Bernath, P.F.; Birk, M.; Boudon, V.; Campargue, A.; Chance, K.; et al. The HITRAN2016 molecular spectroscopic database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2017, 203, 3–69. doi:10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.
- Gueymard, C.A. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 39, 1024–1034.
- Gueymard, C.A. Temporal variability in direct and global irradiance at various time scales as affected by aerosols. *Sol. Energy* 2012, 86, 3544–3553.
- Gueymard, C.A. REST2: High-performance solar radiation model for cloudless-sky irradiance, illuminance, and photosynthetically active radiation—Validation with a benchmark dataset. *Sol. Energy* 2008, 82, 272–285.
- Gueymard, C. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Sol. Energy* 2004, 76, 423–453. doi:10.1016/j.solener.2003.08.039.
- Gschwind, B.; Wald, L.; Blanc, P.; Lefèvre, M.; Schroedter-Homscheidt, M.; Arola, A. Improving the McClear model estimating the downwelling solar radiation at ground level in cloud-free conditions—McCclear-v3. *Meteorol. Z.* 2019, 28, 147–163.
- Ineichen, P. Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks. *Sol. Energy* 2006, 80, 468–478. doi:10.1016/j.solener.2005.04.018.
- Ineichen, P.; Barroso, C.S.; Geiger, B.; Hollmann, R.; Marsouin, A.; Mueller, R. Satellite Application Facilities irradiance products: hourly time step comparison and validation over Europe. *Int. J. Remote Sens.* 2009, 30, 5549–5571.
- Inman, R.H.; Edson, J.G.; Coimbra, C.F. Impact of local broadband turbidity estimation on forecasting of clear sky direct normal irradiance. *Sol. Energy* 2015, 117, 125–138. doi:10.1016/j.solener.2015.04.032.
- Jiménez-Muñoz, J.C.; Mattar, C.; Barichivich, J.; Santamaría-Artigas, A.; Takahashi, K.; Malhi, Y.; Sobrino, J.A.; Van Der Schrier, G. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* 2016, 6, 1–7.
- Joseph, J.H.; Wiscombe, W.; Weinman, J. The delta-Eddington approximation for radiative flux transfer. *J. Atmos. Sci.* 1976, 33, 2452–2459.
- Laszlo, I.; Stammes, K.; Wiscombe, W.J.; Tsay, S.C. The discrete ordinate algorithm, DISORT for radiative transfer. In *Light Scattering Reviews, Volume 11*; Springer: Berlin, Heidelberg 2016; pp. 3–65.
- Lima, F.J.L.; Martins, F.R.; Costa, R.S.; Gonçalves, A.R.; dos Santos, A.P.P.; Pereira, E.B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2019, 35, 335–346. doi:10.1016/j.seta.2019.08.006.
- Luz, T.; Moura, P.; Almeida, A. Multi-objective power generation expansion planning with high penetration of renewables. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 81, 2637–2643.
- Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Pereira, E. B. Scenarios for solar thermal energy applications in Brazil. *Energy Policy* 2012, 48, 640–649.
- Martins, L.D.; Hallak, R.; Alves, R.C.; de Almeida, D.S.; Squizzato, R.; Moreira, C.A.; Beal, A.; da Silva, I.; Rudke, A.; Martins, J.A.; et al. Long-range transport of aerosols from biomass burning over southeastern South America and their implications on air quality. *Aerosol Air Qual. Res.* 2018, 18, 1734–1745.
- Martins, F.; Pereira, E.; Silva, S.; Abreu, S.; Colle, S. Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. *Energy Policy*, 2008, 36, 2853–2864.
- Milani, R.; Szklo, A.; Hoffmann, B.S. Hybridization of concentrated solar power with biomass gasification in Brazil's semiarid region. *Energy Convers. Manag.* 2017, 143, 522–537.

- Myers, D.R.; Gueymard, C.A. Description and availability of the SMARTS spectral model for photovoltaic applications. In *Organic Photovoltaics V. International Society for Optics and Photonics*; Denver, Colorado, United States; 2-6 August 2004; Volume 5520, pp. 56–67
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Gonçalves, A. R.; Costa, R. S.; Lima, F. L.; Rütther, R.; Abreu, S. L.; Tiepolo, G. M.; Pereira, S. V.; Souza, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2nd ed.; São José dos Campos, SP, Brazil, INPE: 2017.
- Randles, C.; Da Silva, A.; Buchard, V.; Colarco, P.; Darmenov, A.; Govindaraju, R.; Smirnov, A.; Holben, B.; Ferrare, R.; Hair, J.; et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *J. Clim.* 2017, 30, 6823–6850.
- Rosário, N.E.; Longo, K.M.; Freitas, S.R.d.; Yamasoe, M.A.; Fonseca, R.M.d. Modeling the South American regional smoke plume: aerosol optical depth variability and surface shortwave flux perturbation. *Atmos. Chem. Phys.* 2013, 13, 2923–2938.
- Ruiz-Arias, J.A.; Gueymard, C.A.; Cebecauer, T. Direct normal irradiance modeling: Evaluating the impact on accuracy of worldwide gridded aerosol databases. *AIP Conf. Proc.* 2019, 2126. doi:10.1063/1.5117710.
- Santos Carstens, D.D.; Cunha, S.K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. *Energy Policy* 2019, 125, 396–404.
- Schaaf, C.B.; Gao, F.; Strahler, A.H.; Lucht, W.; Li, X.; Tsang, T.; Strugnell, N.C.; Zhang, X.; Jin, Y.; Muller, J.P.; et al. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ.* 2002, 83, 135–148.
- Schreier, F.; García, S.G.; Hochstaffl, P.; Städt, S. Py4CATS-PYthon for computational ATmospheric spectroscopy. *Atmosphere* 2019, 10, 262. doi:10.3390/atmos10050262.
- Sengupta, M.; Habte, A.; Wilbert, S.; Gueymard, C.; Remund, J. Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications, 3rd ed.; 2021; Golden, CO, United States; pp. 1–348.
- Silva Junior, C.H.; Anderson, L.O.; Silva, A.L.; Almeida, C.T.; Dalagnol, R.; Pletsch, M.A.; Penha, T.V.; Paloschi, R.A.; Aragão, L.E. Fire responses to the 2010 and 2015/2016 Amazonian droughts. *Front. Earth Sci.* 2019, 7, 97.
- Soria, R.; Portugal-Pereira, J.; Szklo, A.; Milani, R.; Schaeffer, R. Hybrid concentrated solar power (CSP)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for CSP deployment in Brazil. *Energy Policy* 2015, 86, 57–72.
- Wiscombe, W.J.; Evans, J.W. Exponential-sum fitting of radiative transmission functions. *J. Comput. Phys.* 1977, 24, 416–444. doi:10.1016/0021-9991(77)90031-6.

FORMAT INSTRUCTIONS FOR PAPERS SUBMITTED TO THE CONGRESS

Abstract. Smoke aerosol plumes generated during the biomass burning season in Brazil suffer long-range transport, resulting in large aerosol optical depths over an extensive domain. As a consequence, downward surface solar irradiance, and in particular the direct component, can be significantly reduced. Accurate solar energy assessments considering the radiative contribution of biomass burning aerosols are required to support Brazil's solar power sector. This work presents the 2nd generation of the radiative transfer model BRASIL-SR, developed to improve the aerosol representation and reduce the uncertainties in surface solar irradiance estimates in cloudless hazy conditions and clean conditions. Two numerical experiments allowed to assess the model's skill using observational or regional MERRA-2 reanalysis AOD data in a region frequently affected by smoke. Four ground measurement sites provided data for the model output validation. Results for DNI obtained using δ -Eddington scaling and without scaling are compared, with the latter presenting the best skill in all sites and for both experiments. An increase in the relative error of DNI results obtained with δ -Eddington optical depth scaling as AOD increases is evidenced. For DNI, MBD deviations ranged from -2.3 to -0.5%, RMSD between 2.3 and 4.7% and OVER between 0 and 5.3% when using in-situ AOD data. Overall, our results indicate a good skill of BRASIL-SR for the estimation of both GHI and DNI.

Key words: Solar resource assessment; Direct normal irradiance; Delta-Eddington approximation; Biomass burning