

Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions

Fernando Martins



Article

Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado

Madeleine S. G. Casagrande ^{1,*} , Fernando R. Martins ¹ , Nilton E. Rosário ² , Francisco J. L. Lima ³,
André R. Gonçalves ³ , Rodrigo S. Costa ³ , Maurício Zarzur ³, Marcelo P. Pes ³ and Enio Bueno Pereira ³ 

¹ Institute of Marine Science, Federal University of São Paulo (Unifesp), Rua Carvalho de Mendonça, 144, Santos 11070-102, SP, Brazil; fernando.martins@unifesp.br

² Environmental Science Department, Federal University of São Paulo (Unifesp), Rua São Nicolau 210, Diadema 09913-030, SP, Brazil; nrosario@unifesp.br

³ National Institute for Space Research (INPE), Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos 12227-010, SP, Brazil; francisco.lopes@inpe.br (F.J.L.L.); andre.goncalves@inpe.br (A.R.G.); rodrigo.costa@inpe.br (R.S.C.); mauricio.zarzur@inpe.br (M.Z.); marcelo.pes@inpe.br (M.P.P.); enio.pereira@inpe.br (E.B.P.)

* Correspondence: madeleine.gacita@unifesp.br



Citation: Casagrande, M.S.G.; Martins, F.R.; Rosário, N.E.; Lima, F.J.L.; Gonçalves, A.R.; Costa, R.S.; 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 Sens.* **2021**, *13*, 4527. <https://doi.org/10.3390/rs13224527>

Academic Editors: Dimitris Kaskaoutis and Jesús Polo

Received: 27 September 2021
Accepted: 3 November 2021
Published: 11 November 2021

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.

Keywords: solar resource mapping; direct normal irradiance; δ -Eddington approximation; biomass burning

Avaliação da Irradiância incidente na superfície em condições de elevada carga de aerossóis

Contexto:

Grande concentração de aerossóis atmosféricos durante a estação seca no Brasil associado com queimadas e poluição urbana;

Impacto grande na transmitância atmosférica com redução da GHI e DNI (mais significativo)

Desvios das estimativas fornecidas pelo BRASIL-SR apresentavam desvios elevados em estações secas como consequência da parametrização de aerossóis pouco representativa

Article

Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado

Madeleine S. G. Casagrande ^{1,*}, Fernando R. Martins ¹, Nilton E. Rosário ², Francisco J. L. Lima ³, André R. Gonçalves ³, Rodrigo S. Costa ³, Maurício Zarzur ³, Marcelo P. Pes ³ and Enio Bueno Pereira ³

¹ Institute of Marine Science, Federal University of São Paulo (Unifesp), Rua Carvalho de Mendonça, 144, Santos 11070-102, SP, Brazil; fernando.martins@unifesp.br

² Environmental Science Department, Federal University of São Paulo (Unifesp), Rua São Nicolau 210, Diadema 09913-030, SP, Brazil; nrosario@unifesp.br

³ National Institute for Space Research (INPE), Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos 12227-010, SP, Brazil; francisco.lopez@inpe.br (F.J.L.L.); andre.goncalves@inpe.br (A.R.G.); rodrigo.costa@inpe.br (R.S.C.); mauricio.zarzur@inpe.br (M.Z.); marcelo.pes@inpe.br (M.P.P.); enio.pereira@inpe.br (E.B.P.)

* Correspondence: madeleine.gacita@unifesp.br

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.

Keywords: solar resource mapping; direct normal irradiance; δ -Eddington approximation; biomass burning

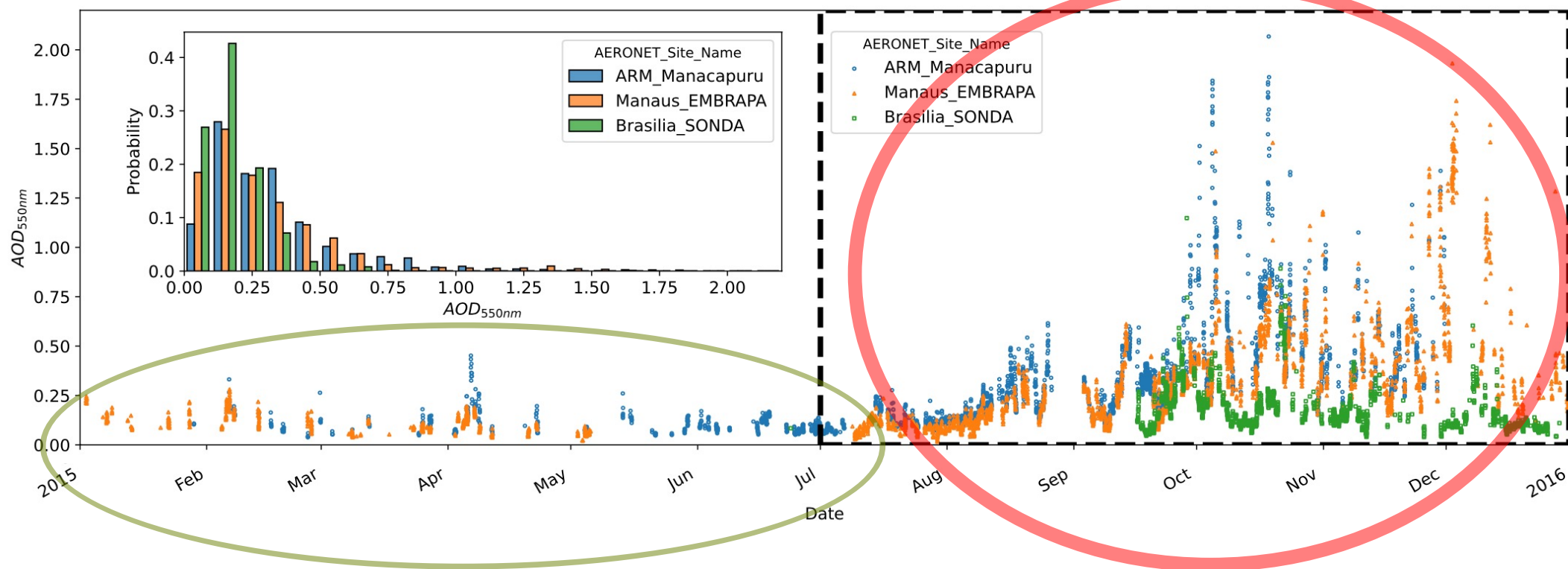


Citation: Casagrande, M.S.G.; Martins, F.R.; Rosário, N.E.; Lima, F.J.L.; Gonçalves, A.R.; Costa, R.S.; Zarzur, M.; Pes, M.P.; Pereira, E.B. Numerical Assessment of Downward Incoming Solar Irradiance in Smoke Influenced Regions—A Case Study in Brazilian Amazon and Cerrado. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 4527. <https://doi.org/10.3390/rs13224527>

Academic Editors: Dimitris Kaskaoutis and Jesús Polo

Received: 27 September 2021
Accepted: 3 November 2021
Published: 11 November 2021

Avaliação da Irradiância incidente na superfície em condições de elevada carga de aerossóis





Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR

Focos da pesquisa:

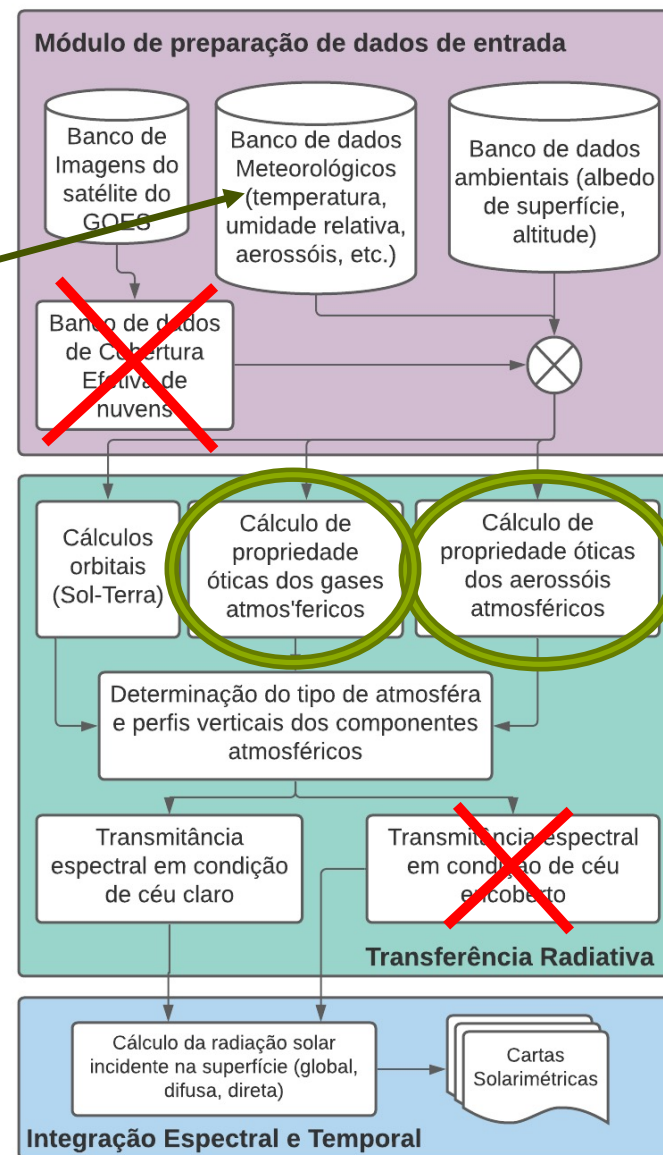
- *Aprimoramento da modelagem de processos radiativos envolvendo aerossóis atmosféricos;*
- *Modelagem espectral em condições de céu claro*
- *Assimilação de produtos de satélite e reanálise meteorológica*
- *Assimilação da absorção de vapor de água*
- *Albedos para direta e difusa, broadband e espectral, em função das BRDF*

Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR

Dois Experimentos numéricos:

In-situ: dados de aerossóis observados nas estações da AERONET e dados meteorológicos observados em campo foram utilizados para alimentar o modelo;

Regional: dados de aerossóis e meteorológicos provenientes da reanálise MERRA-2





Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR

Principais características:

- Adota aproximação de Dois-fluxos na solução da equação de transferência radiativa na atmosfera
- Modelo espectral com 37 intervalos entre 0.2 e 4.0 μm
- Modelo utiliza cobertura efetiva de nuvens obtido por satélite geoestacionário
- Utiliza dados de variáveis meteorológicas básicas – Temperatura, UR, WV
- Assimilação de AOD e uso de BRDF para cálculo de albedo de superfície
- Adota perfis básicos para gases atmosféricos, mas possibilita assimilação de dados de água precipitável e O_3
- Fornece as componentes da irradiância solar incidente na superfície integrada (broadband) – GHI, DHI, e DNI
- Pode fornecer irradiância espectral ou integradas em faixas espectrais de interesse

Avaliação da Irradiância incidente na superfície em condições de elevada carga de aerossóis

Estações de superfície

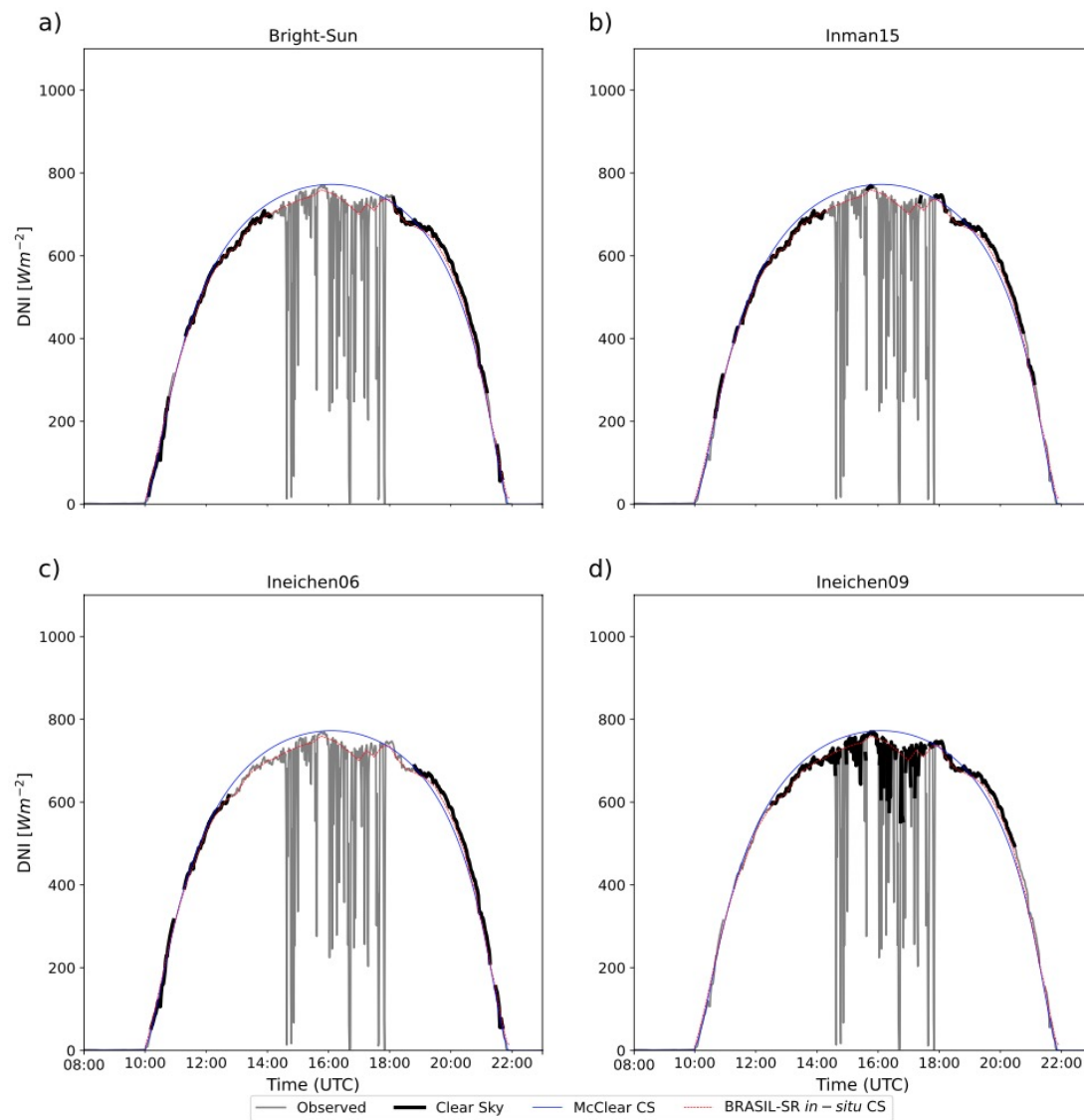
Site	Latitude (°)	Longitude (°)	Variables and Instruments
ARM_Manacapuru	−3.213	−60.598	DNI, GHI, DHI: SKYRAD Spectral irradiance, AOD, AE: MFRSR AOD, PWV, O ₃ : AERONET
Manaus_EMBRAPA	−2.891	−59.970	DNI, GHI, DHI, Spectral irradiance, AOD, AE: MFRSR AOD, AE, PWV, O ₃ : AERONET
Brasilia_SONDA	−15.601	−47.713	DNI: Pyrheliometer NIP Eppley/CHP 1 Kipp&Zonen GHI: Pyranometer CM22 Kipp&Zonen DHI: Pyranometer CM22 Kipp&Zonen plus Sun tracker A2P BD AOD, PWV, O ₃ : AERONET
Palmas_SONDA	−10.179	−48.362	GHI: Pyranometer CM11 Kipp&Zonen DHI: Pyranometer CM11 Kipp&Zonen with shadowing ring CM121B + adapter CV2





Avaliação da Irradiância incidente na superfície em condições de elevada carga de aerossóis

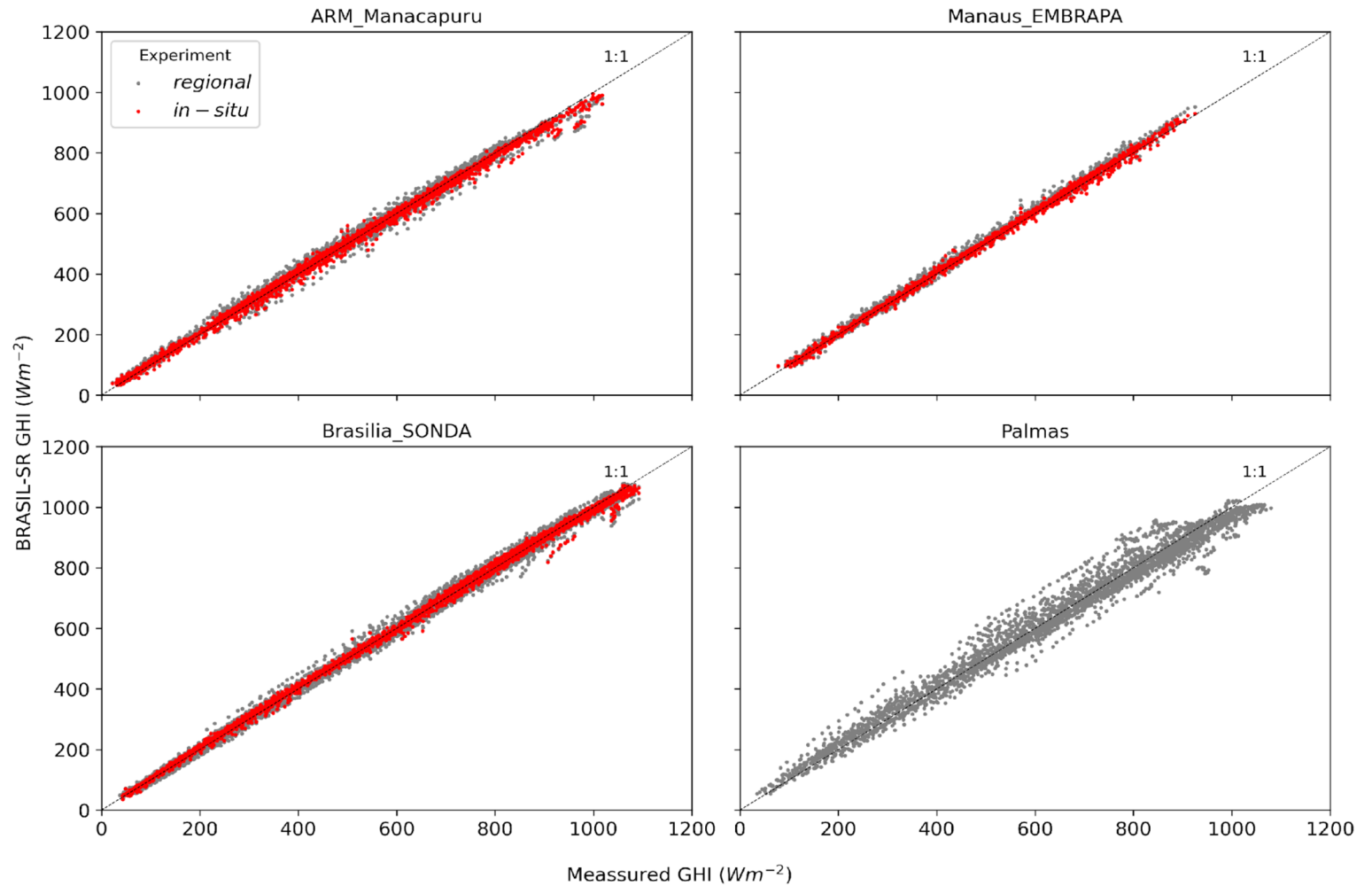
Identificação da condição de céu claro



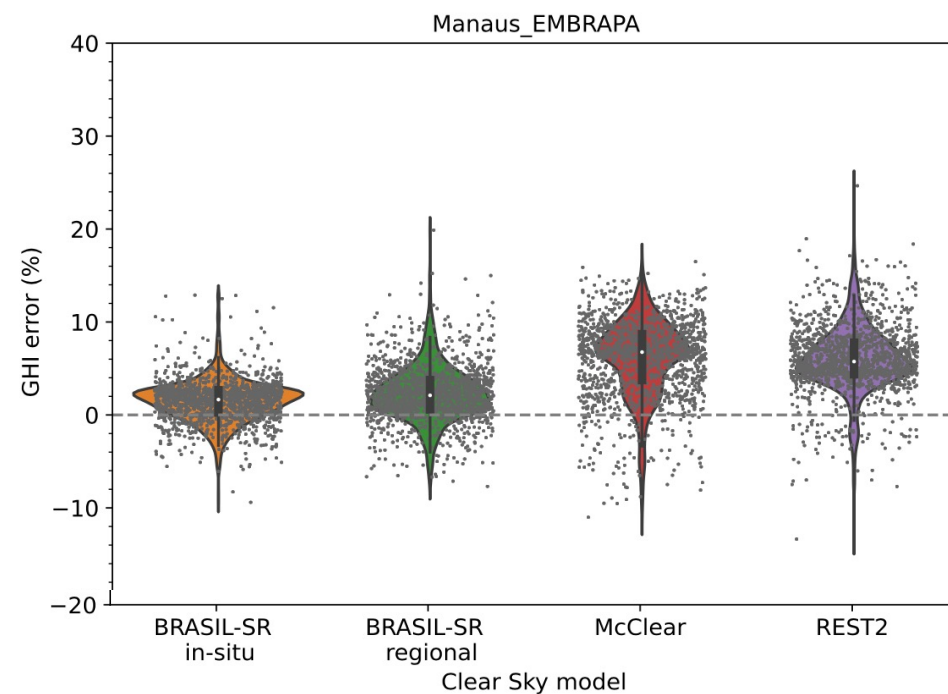
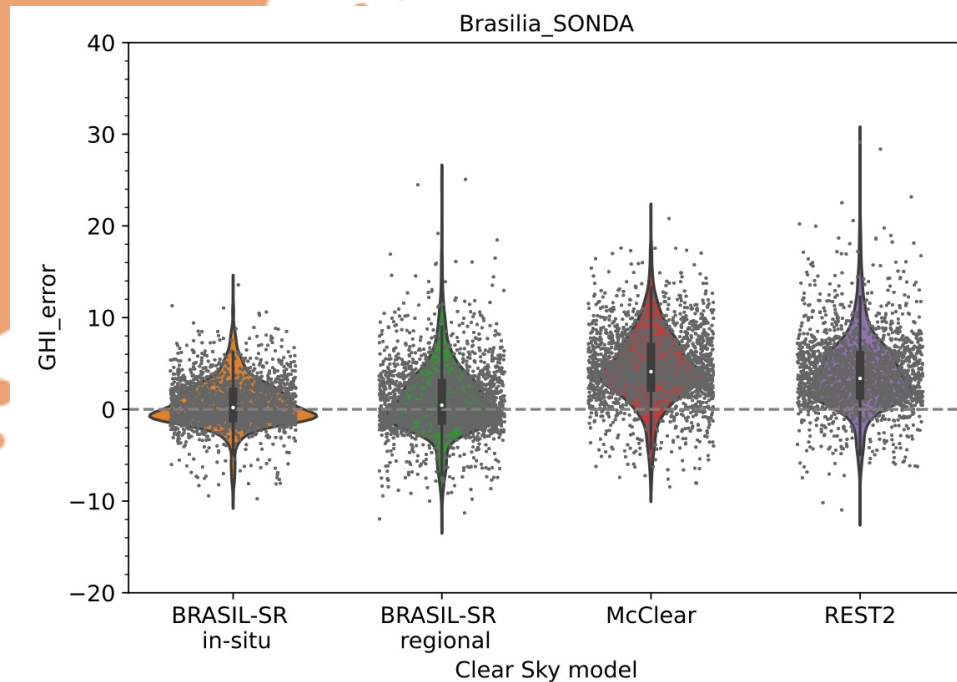
Casagrande et al., 2021

Avaliação da Irradiância Global Horizontal com escalonamento

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos



Casagrande et al., 2021



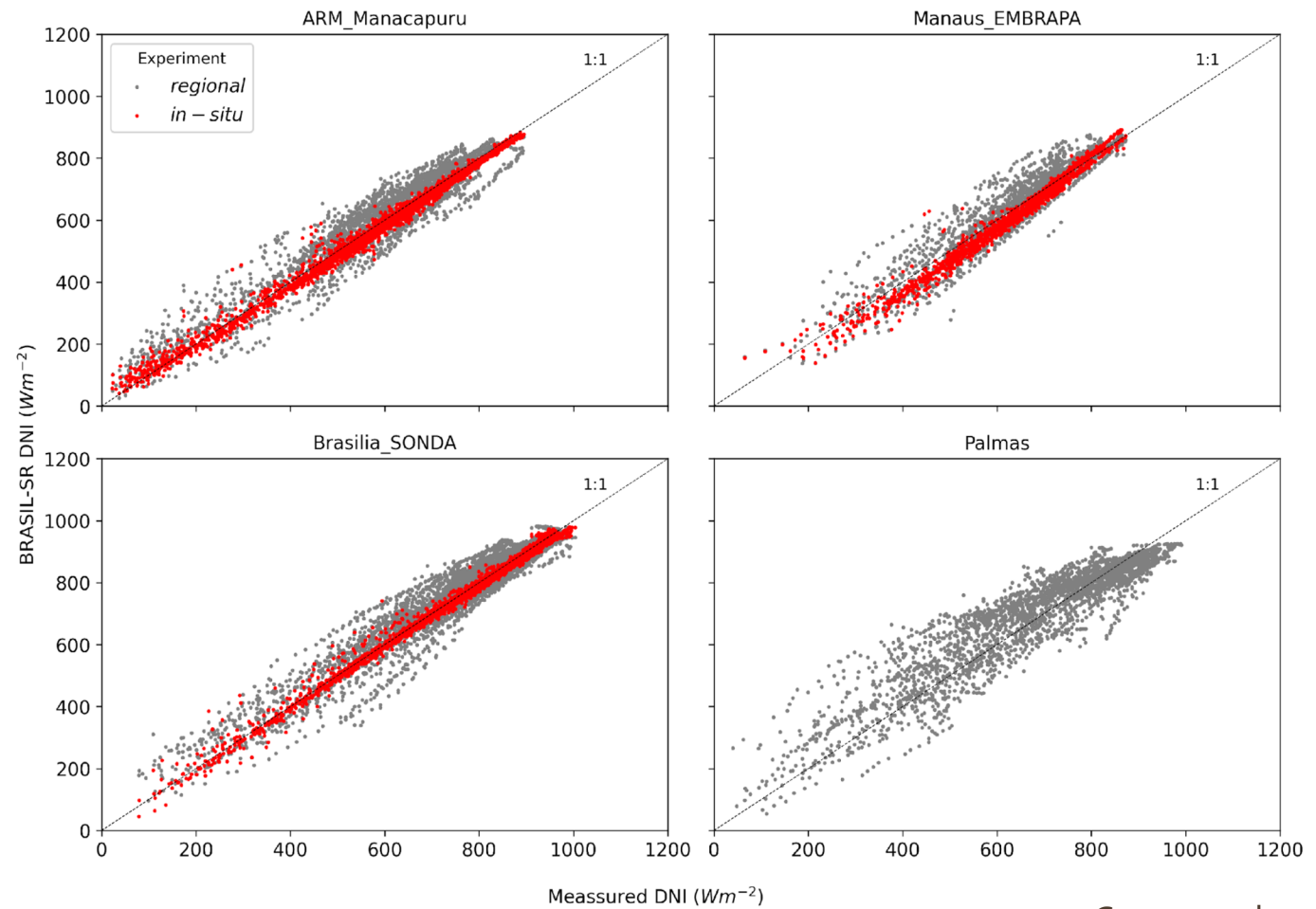
Avaliação da Irradiância Global Horizontal com escalonamento

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos

Casagrande et al., 2021

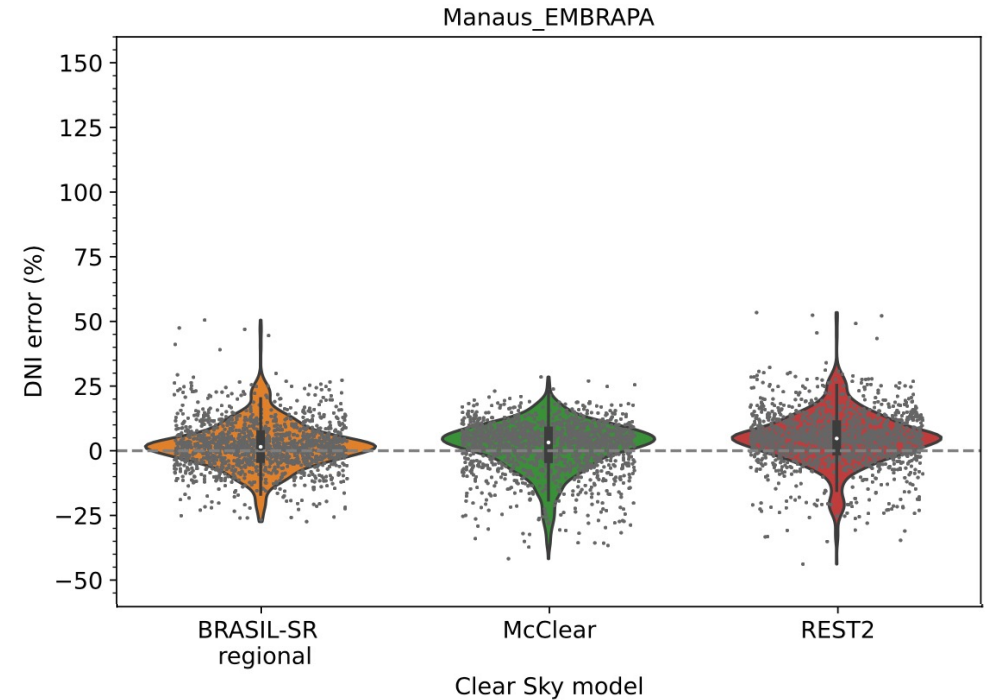
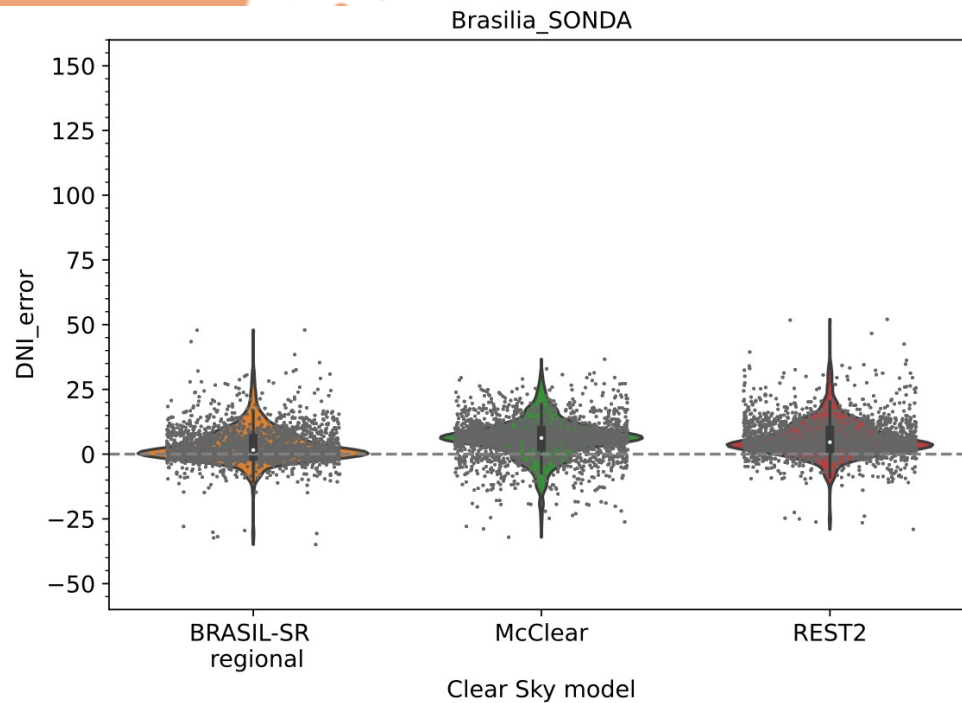
Avaliação da Irradiância Direta Normal sem escalonamento

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos



Casagrande et al., 2021

Regional experiment



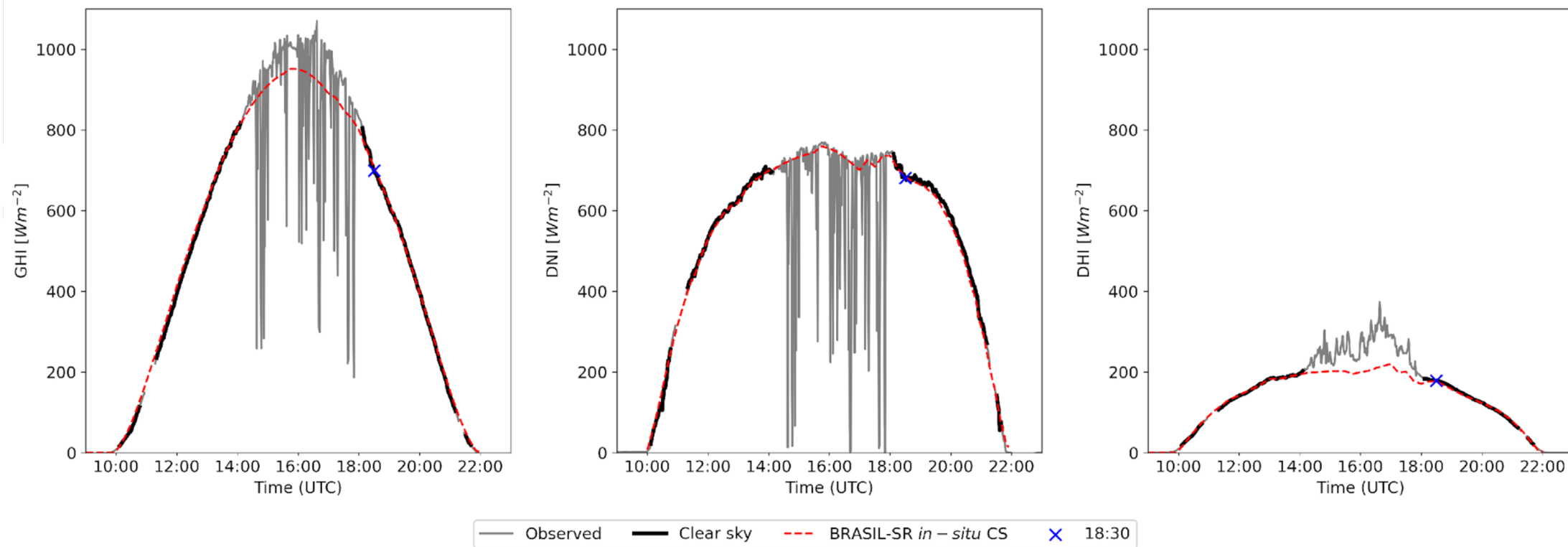
Avaliação da Irradiância DNI sem escalonamento

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos

Casagrande et al., 2021

Modelagem Broadband

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos - em Manaus - 19 Sep de 2020



Casagrande et al., 2021

Modelagem Broadband

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos

Site	N	$\overline{GHI}_{obs}$ Wm^{-2}	MBD Wm^{-2} (%)	RMSD Wm^{-2} (%)	MAD Wm^{-2} (%)	KSI %	OVER %
<i>BRASIL-SR In-situ</i>							
ARM_Manacapuru	2758	460.4	-1.2 (-0.3)	13.4 (2.9)	9.7 (2.1)	14.1	0.0
Manaus_EMBRAPA	1631	459.6	5.9 (1.3)	11.0 (2.4)	9.0 (2.0)	12.1	0.0
Brasilia_SONDA	2424	621.5	0.9 (0.1)	13.0 (2.1)	10.0 (1.6)	14.3	0.0
<i>BRASIL-SR Regional</i>							
ARM_Manacapuru	3088	461.5	3.3 (0.7)	18.8 (4.1)	14.1 (3.1)	18.1	0.0
Manaus_EMBRAPA	2047	459.2	9.6 (2.1)	15.3 (3.3)	12.1 (2.6)	22.6	0.0
Brasilia_SONDA	5742	582.9	-5.1 (-0.9)	18.5 (3.2)	14.9 (2.6)	21.4	0.0
Palmas_SONDA	3639	650.8	-6.2 (-1.0)	37.0 (5.7)	28.9 (4.4)	32.0	1.9
<i>McClear</i>							
ARM_Manacapuru	3088	461.5	20.1 (4.4)	28.6 (6.2)	23.9 (5.2)	57.6	4.5
Manaus_EMBRAPA	2047	459.2	27.3 (5.9)	33.8 (7.4)	29.1 (6.3)	64.0	10.6
Brasilia_SONDA	5742	582.9	20.4 (3.5)	27.4 (4.7)	22.7 (3.9)	79.4	14.9
Palmas_SONDA	3639	650.8	2.2 (0.3)	23.1 (3.5)	16.8 (2.6)	9.2	0.0
<i>REST2</i>							
ARM_Manacapuru	3088	461.5	20.5 (4.5)	29.7 (6.4)	25.2 (5.5)	91.5	23.7
Manaus_EMBRAPA	2047	459.2	26.6 (5.8)	31.1 (6.8)	27.5 (6.0)	61.8	7.2
Brasilia_SONDA	5742	582.9	9.6 (1.6)	22.7 (3.9)	16.8 (2.9)	54.6	1.0
Palmas_SONDA	3639	650.8	30.8 (4.7)	50.7 (7.8)	35.0 (5.4)	97.0	28.6

Modelagem Broadband

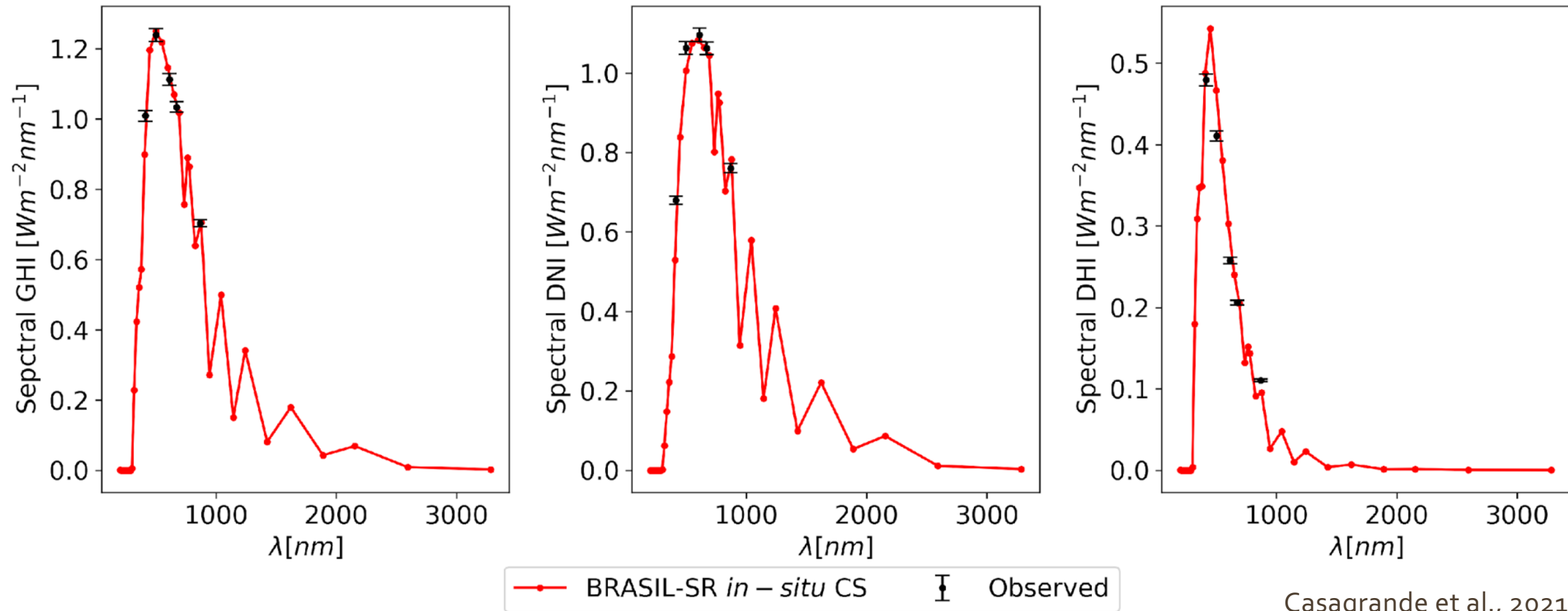
Estudo de influência de aerossóis atmosféricos

Table 4. Benchmark comparisons between clear-sky DNI observations and BRASIL-SR estimations (experiments *in-situ* and *regional*) using δ –Eddington scale.

Site	N	$\overline{DNI_{obs}}$ Wm^{-2}	MBD Wm^{-2} (%)	RMSD Wm^{-2} (%)	MAD Wm^{-2} (%)	KSI %	OVER %
				<i>In-situ</i>			
ARM_Manacapuru	2758	575.9	31.1 (5.4)	44.6 (7.7)	34.8 (6.0)	83.8	29.8
Manaus_EMBRAPA	1631	628.5	25.2 (4.0)	34.9 (5.5)	27.8 (4.4)	52.3	14.7
Brasilia_SONDA	2424	744.5	30.9 (4.1)	39.5 (5.3)	32.3 (4.3)	78.7	27.3
				<i>Regional</i>			
ARM_Manacapuru	3088	584.4	49.0 (8.4)	72.1 (12.3)	56.9 (9.7)	140.3	76.9
Manaus_EMBRAPA	2047	631.7	40.6 (6.4)	64.7 (10.2)	50.9 (8.1)	94.5	51.3
Brasilia_SONDA	5742	775.8	19.4 (2.5)	56.0 (7.2)	40.5 (5.2)	76.2	30.1
Palmas_SONDA	3639	715.8	40.9 (5.7)	89.3 (12.5)	64.3 (9.0)	153.5	91.9

Modelagem espectral

Estudo de influência de aerossóis atmosféricos - em Manaus - 19 Sep de 2020



Casagrande et al., 2021



Modelo de Transferência Radiativa BRASIL-SR

Focos da pesquisa futura:

- *Aprimoramento da modelagem em condições de céu claro;*
- *Aprimoramento da modelagem de processos radiativos envolvendo aerossóis atmosféricos;*
- *Modelagem espectral em condições de céu claro e encoberto*
- *Aprimoramento de metodologia de determinação da cobertura efetiva de nuvens a partir de imagens de satélite;*
- *Aprimoramento da modelagem em condições de céu totalmente encoberto;*
- *Assimilação de produtos de satélite*



OBRIGADO!



Laboratório de Modelagem e Estudos de
Recursos Renováveis de Energia



Departamento de Ciências do Mar

Universidade Federal de São Paulo
Campus Baixada Santista

Fernando Ramos Martins

fernando.martins@unifesp.br

+55 13 997120646

labren.ccst.inpe.br

Rua Carvalho de
Mendonça, 144
Santos - SP - Brasil
11070-100

Post-doc position:

Madeleine S. G. Casagrande

madeleine.gacita@unifesp.br



“Fornecer conhecimento e quando possível, propor soluções que permitam o desenvolvimento com equidade e redução dos impactos sobre o ambiente.”