

AVALIAÇÃO DA VARIABILIDADE DO RECURSO SOLAR EM TERRITÓRIO BRASILEIRO

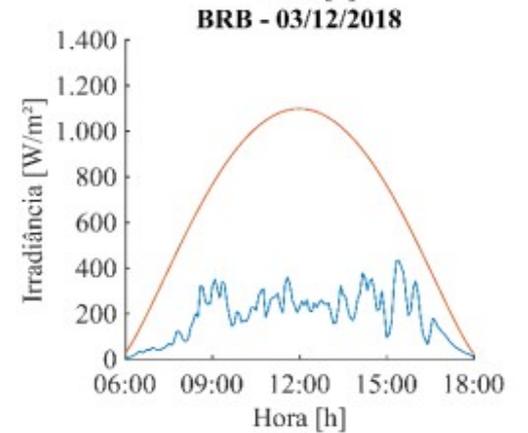
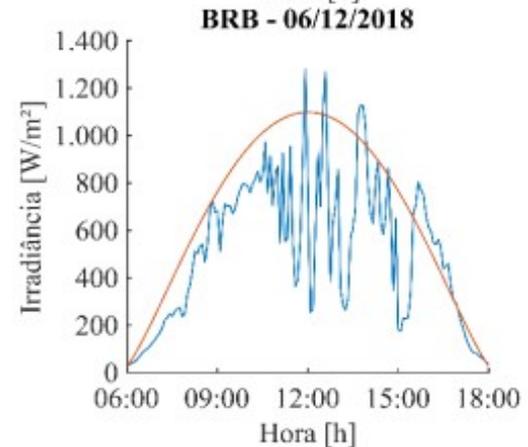
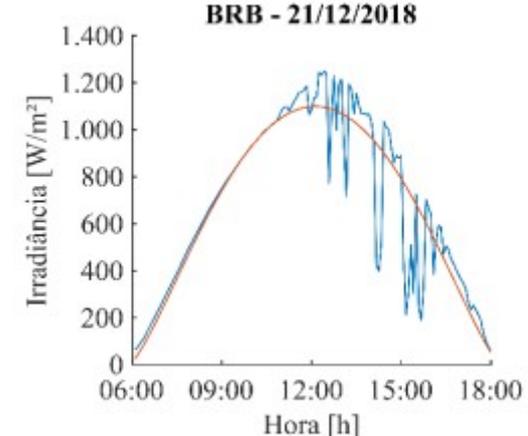
Vinicius Roggério da Rocha
Rodrigo Santos Costa
André Rodrigues Gonçalves
Enio Bueno Pereira

*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Divisão de Impactos,
Adaptação e Vulnerabilidades (DIAV)*

Fernando Ramos Martins

Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Campus Baixada Santista

Jornadas Científicas Regionales de Energía Solar – Feb 2022



Introdução

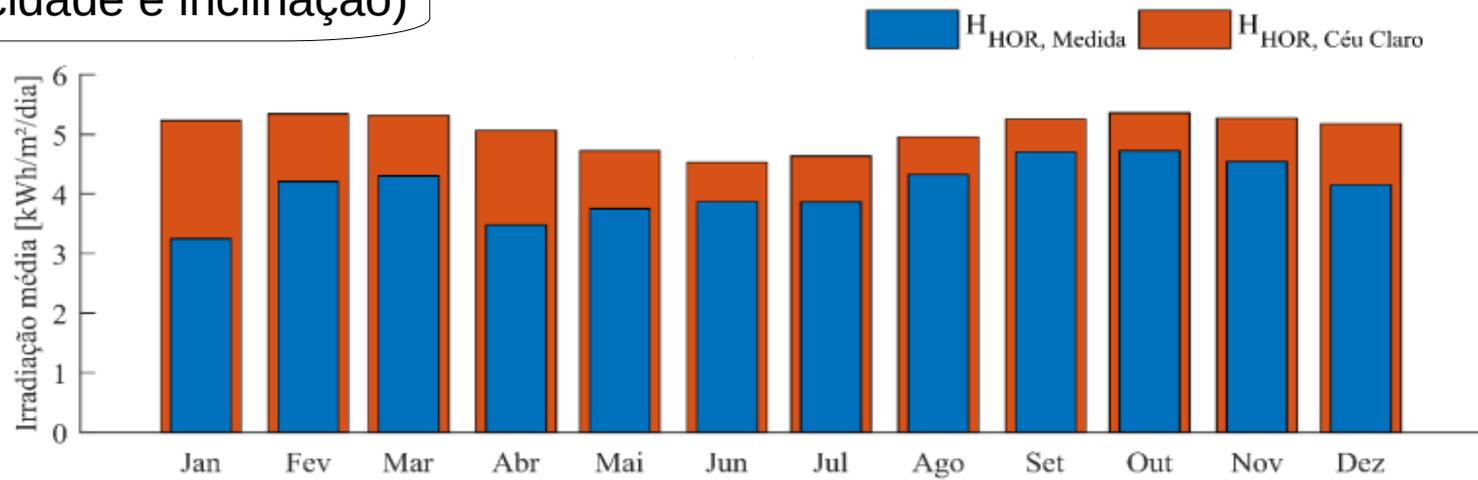
A variabilidade da geração de energia está intrinsecamente relacionada às características do recurso solar, podendo provocar efeitos indesejáveis, como:

- Flutuações de tensão
- Variações de frequência
- Problemas relacionados à qualidade de energia
- Falhas na estabilidade da rede

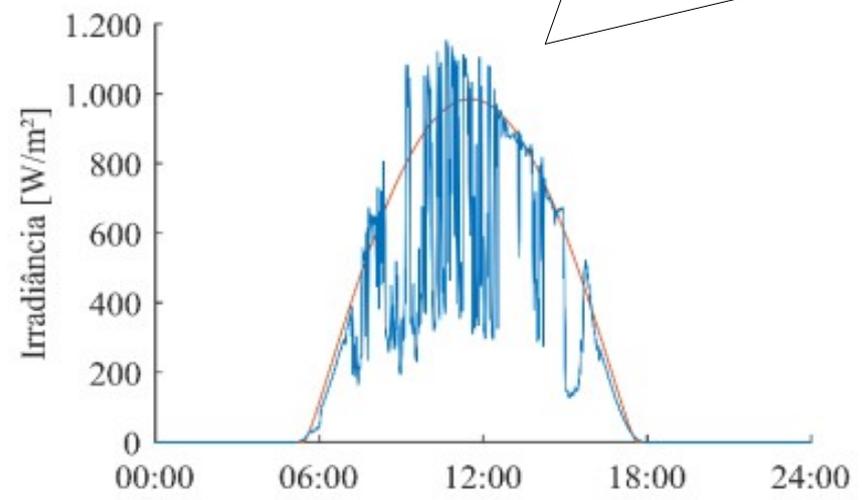
Objetivos

- Proposição de métrica para quantificação da variabilidade temporal do recurso solar
- Aplicação usando dados de superfície e de satélite sobre o território brasileiro

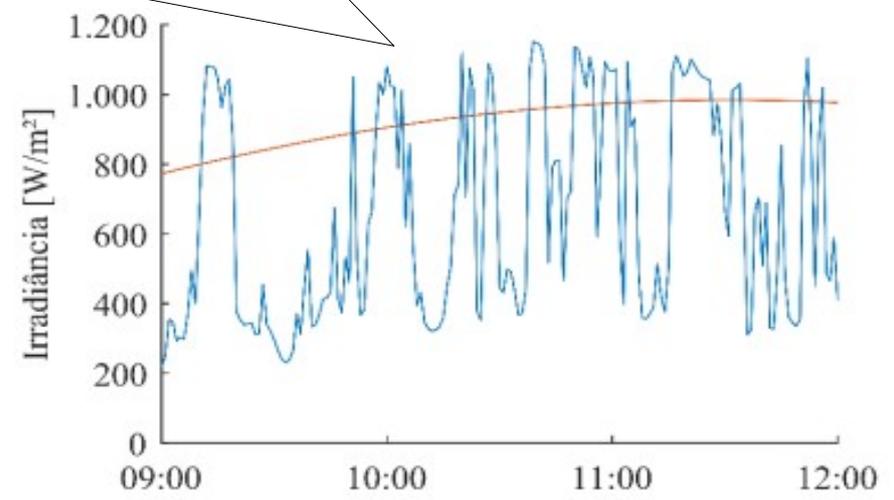
Sazonalidade de escala anual:
translação (excentricidade e inclinação)



Sazonalidade de escala diária:
movimento aparente do Sol



Sazonalidade de escala intra-dia:
nuvens, chuva, aerossóis



Índices diários – nitidez atmosférica

- Índice de Claridade (K_t): indica a nitidez da atmosfera (quanto maior, mais irradiância em superfície)

$$K_t = \frac{GHI_t}{CSI_t}$$

- Coeficiente efetivo de cobertura de nuvens (C_{eff}): relaciona-se com a profundidade óptica da nebulosidade e a fração de cobertura de nuvens presente no pixel (quanto maior, mais nebulosidade)

$$C_{eff} = \frac{L - L_{clr}}{L_{cld} - L_{clr}}$$

(Martins et al., 2008)

Índices diários - variabilidade

- Daily Aggregate Ramp Rate (DARR): somatório de rampas (diferença entre valores sequenciais da irradiação solar incidente na superfície num dado intervalo de tempo)

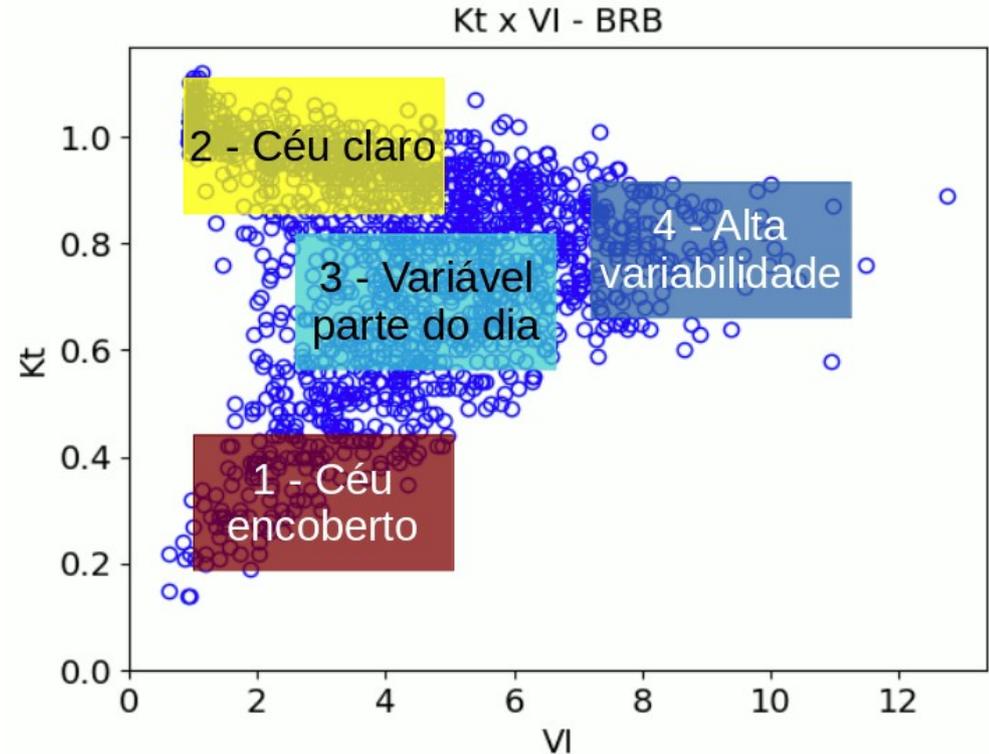
$$DARR = \sum_{t=0}^{N-1} \frac{|GHI_t - GHI_{t-1}|}{C}$$

(Van Haaren et al., 2014)

- Variability Index (VI): quanto maior, mais variabilidade – valores baixos podem ser dias claros ou nublados; gráfico “ponta de flecha”

$$VI = \frac{\sum_{t=2}^n \sqrt{(GHI_t - GHI_{t-1})^2 + \Delta t^2}}{\sum_{t=2}^n \sqrt{(CSI_t - CSI_{t-1})^2 + \Delta t^2}}$$

(Stein et al., 2012)

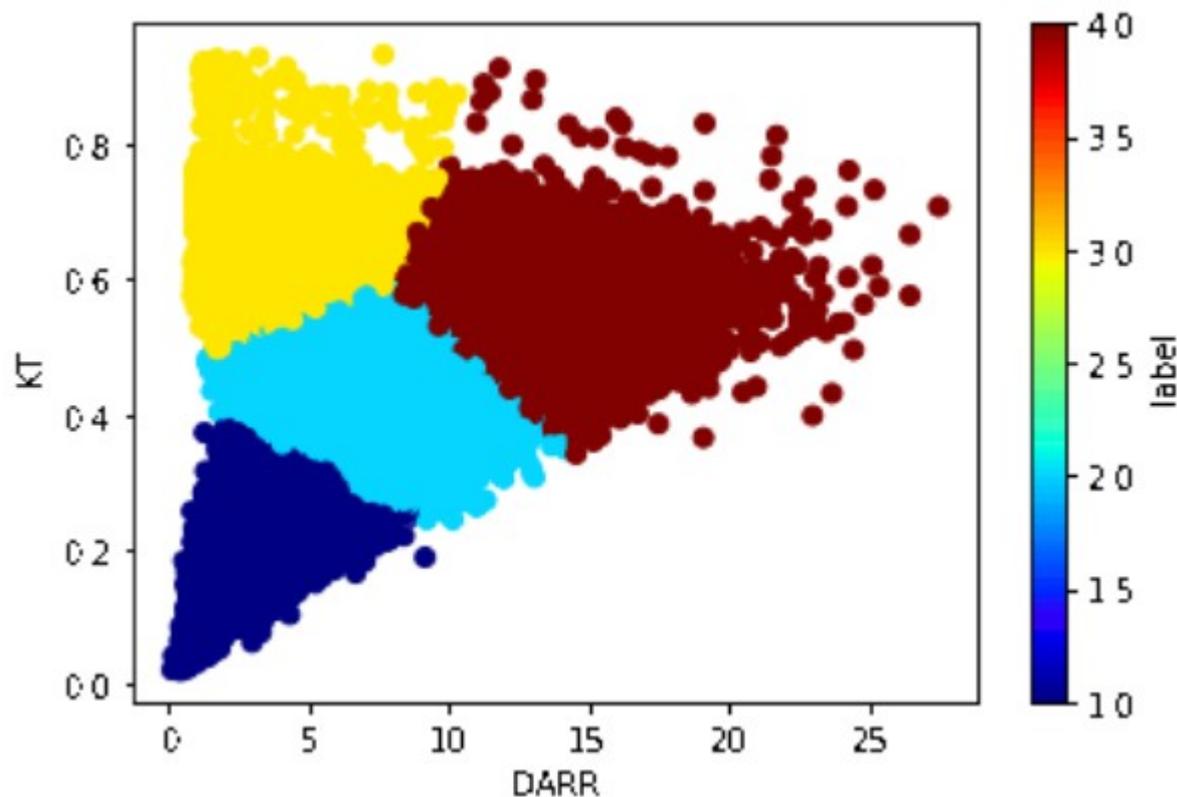


Índice proposto - CPD

- Em um determinado ponto (estação de superfície ou pixel observado por satélite), são calculados os valores diários de DARR e de Kt para toda a série temporal ou uma seleção dela (mensal, por exemplo);
- Para esse ponto, é feito o diagrama Kt *versus* DARR e os pontos são classificados em 4 grupos (ou 3, no caso de satélite) usando k-means;
- É calculado o número de pontos classificados no grupo de melhor recurso solar (maiores valores de Kt e menores valores de DARR)
- Calcula-se o **CPD (Cloudless percentage days)**, ou seja, a razão entre o número calculado no passo anterior e o total de pontos para esse lugar

CPD para dados de superfície

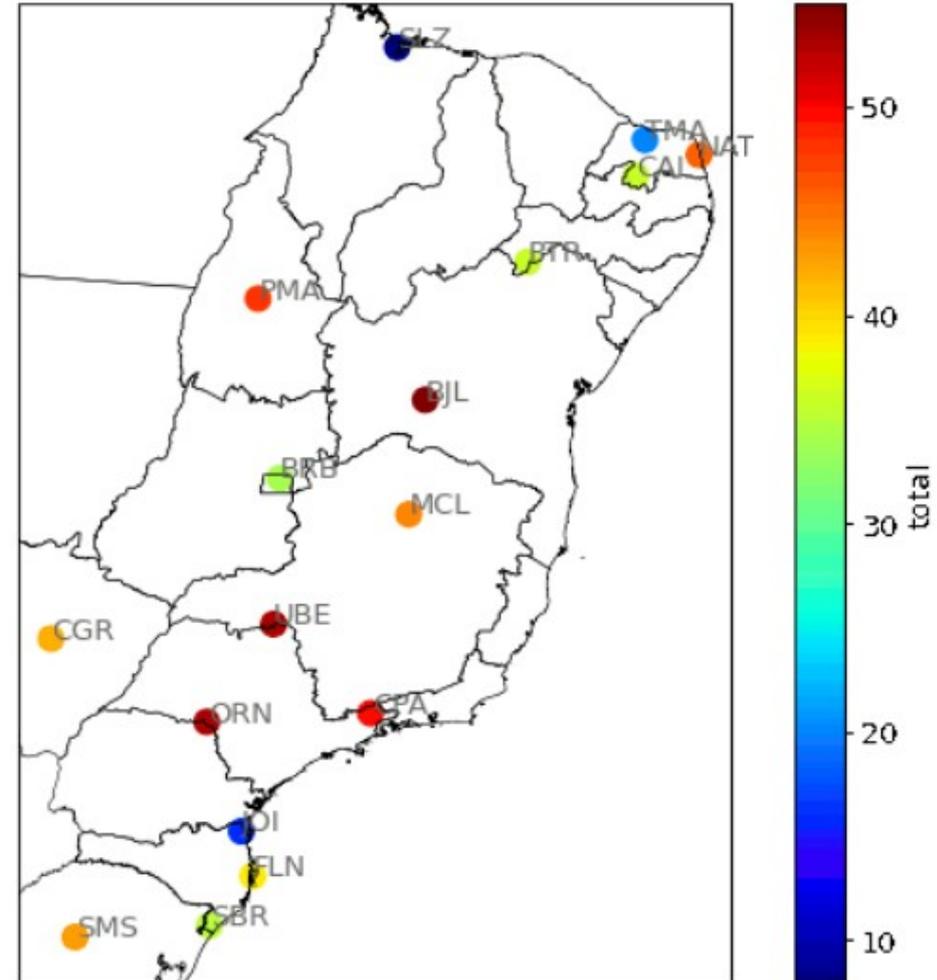
- Irradiância solar global horizontal incidente na superfície medidos com piranômetros Classe 1 de diferentes pontos do território brasileiro
- Valores médios a cada 5 minutos entre 2012 e 2020
- Excluídos horários com elevação solar inferior a 10° e dias com menos de 65% dos registros esperados



CPD para dados de superfície

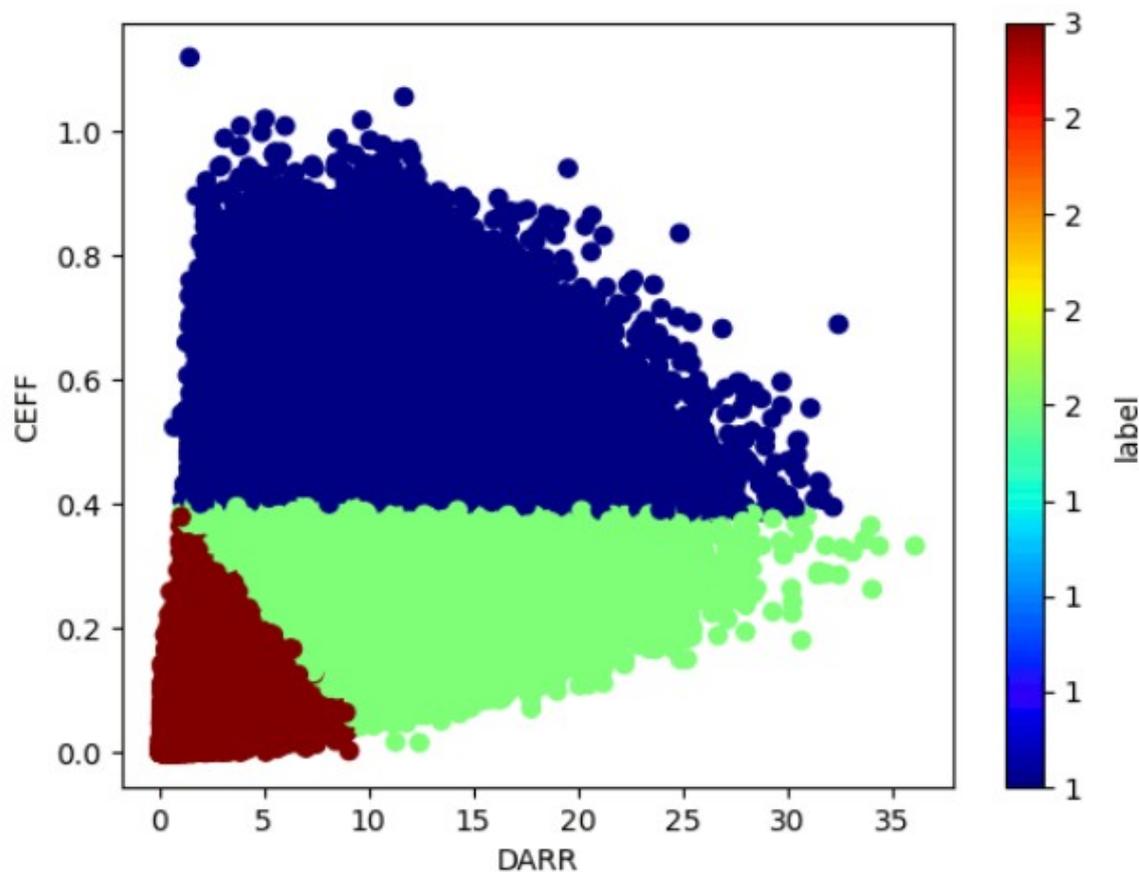
location	month												anual
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SLZ	2	1	1	1	4	4	10	12	19	21	13	6	8
TMA	15	8	10	20	33	28	23	24	20	22	23	10	20
NAT	39	37	48	41	55	51	48	64	55	48	40	31	46
CAI	10	26	24	24	30	32	42	52	53	58	39	28	36
PTR	25	20	20	23	30	31	30	49	59	57	42	37	36
PMA	16	15	16	34	46	84	85	88	53	46	25	26	48
BJL	32	40	31	50	73	66	74	79	90	74	42	34	55
BRB	7	10	8	20	50	66	75	65	59	33	11	8	34
MCL	18	18	20	43	53	69	65	68	66	49	17	23	44
UBE	32	31	15	59	71	67	73	83	61	45	22	8	53
CGR	11	6	12	50	50	57	72	84	67	49	12	4	42
CPA	32	29	40	57	61	66	74	69	60	45	30	31	50
ORN	23	10	68	83	76	73	82	73	72	49	24	13	53
JOI	13	12	15	21	18	24	26	27	14	9	7	8	16
FLN	31	33	35	50	46	53	53	55	34	25	24	30	39
SBR	19	23	23	48	46	56	54	48	36	21	27	15	35
SMS	26	22	39	49	49	52	56	58	48	35	42	34	43

Valores de CPD (em %) por mês e anual (colunas) para cada estação (linhas) para dados de superfície com escala de cores: verde [25,50[; amarelo [50,75[e vermelho [75,100[.



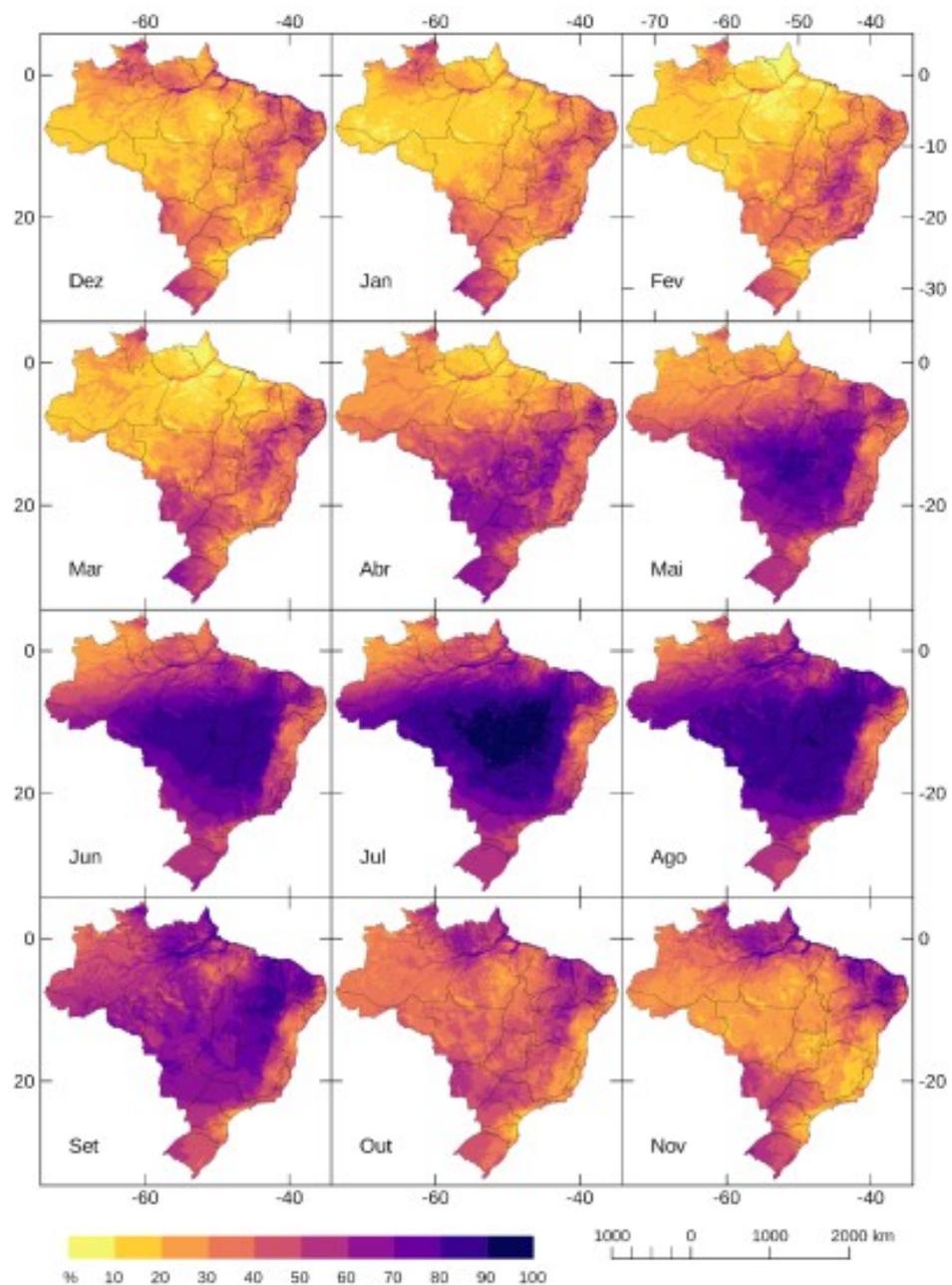
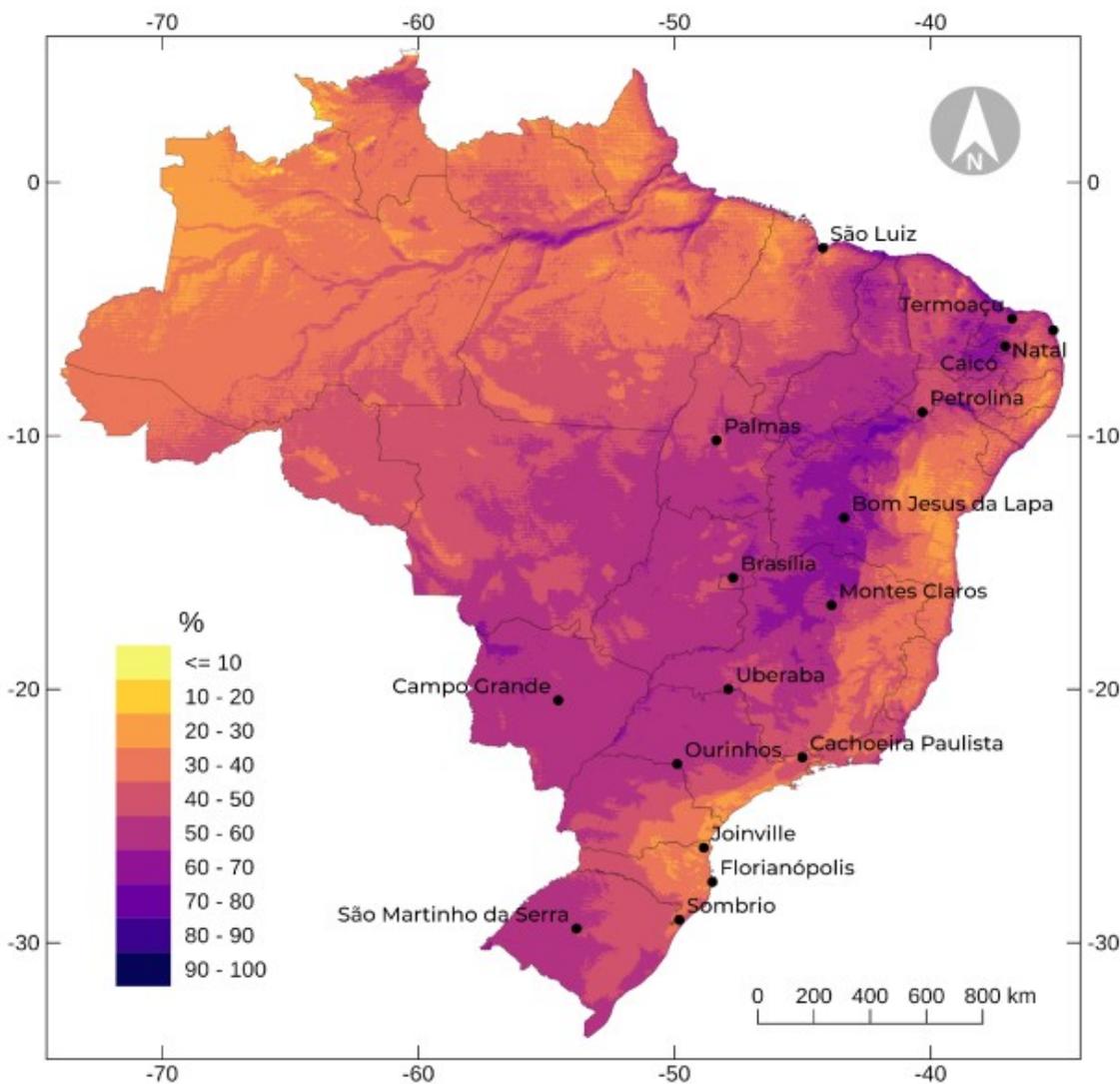
CPD para dados de satélite

- Radiância do canal visível do satélite GOES-13
- Valores a cada 30 minutos entre 2008 e 2016
- Ângulo zenital menor que 80° e dias com mais de 5 rampas



amostra randômica de 0,1%

CPD para dados de satélite



Referências

- Martins, F.R., Silva, S.A.B., Pereira, E.B., Abreu, S.L., 2008. The influence of cloud cover index on the accuracy of solar irradiance model estimates. *Meteorology and Atmospheric Physics* 99, 169–180. doi:10.1007/s00703-007-0272-5.
- SONDA, 2021. SONDA - Sistema Nacional de Organização de Dados Ambientais. URL: <http://sonda.ccst.inpe.br/>.
- Stein, J. S., Hansen, C. W., & Reno, M. J. (2012). The variability index: a new and novel metric for quantifying irradiance and PV output variability. *World Renewable Energy Forum*.
- Van Haaren R, Morjaria M, Fthenakis V. Empirical assessment of short-term variability from utility-scale solar PV plants. *Prog Photovolt Res Appl* 2014;22: 548–59. <https://doi.org/10.1002/pip.2302>.

Resumo

- Novo índice CPD (*Cloudless Percentage Days*): razão entre o número de dias classificados com melhor recurso solar (maior disponibilidade e menor variabilidade) para um lugar
- Calculado para diferentes pontos do território brasileiro usando dados de superfície e de satélite
- Mapa para todo o território brasileiro, permitindo definir áreas para melhor aproveitamento do recurso solar em novas plantas (principalmente do tipo CSP)