

ESTIMATIVA DE IRRADIÂNCIA MÉDIA HORÁRIA A PARTIR DE IMAGENS DO SATÉLITE GOES-16 BASEADA NO MODELO DE TARPLEY DE 1979

Mariana Batista de Sousa – mariana.bsousa@ufpe.br

Rodrigo Henrique L. Farias – rodrigo.hlfarias@ufpe.br

Olga C. Vilela - olga.vilela@ufpe.br

Elielza Moura de Souza Barbosa – elielza.barbosa@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Energias Renováveis (CER-UFPE)

Alex Coutinho Pereira - alexcp@chesf.gov.br

Eduardo Boudoux Jatoba - ejatoba@chesf.gov.br

Alcides Codeceira Neto - alcidesc@chesf.gov.br

José Bione de Melo Filho - jbionef@chesf.gov.br

Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF)

Resumo. A irradiância solar incidente na superfície é o fator ambiental preponderante que influencia na potência de saída de uma central fotovoltaica (SABINO, 2019). A estimativa de irradiação, ou irradiância solar por meio de satélites meteorológicos vem se apresentando como uma alternativa tanto para avaliação de uma pré viabilidade de projetos de usinas fotovoltaicas, sendo esta utilizada como parâmetro de entradas em softwares que simulam a produção das usinas e o fator de capacidade do local, quanto também para ser amplamente utilizada na literatura como variável de entrada em trabalhos de modelos de previsão do recurso solar. Este trabalho tem por objetivo estimar a irradiância solar obtida a partir das imagens do canal visível do satélite geoestacionário meteorológico GOES-16 utilizando o modelo proposto por TARPLEY (1979). Para este estudo foram escolhidas duas localidades no estado de Pernambuco (Recife e Petrolina) e uma localidade próxima à Pernambuco no estado da Bahia (usina fotovoltaica flutuante no lago de Sobradinho). As estimativas horárias de irradiância para a localidade de Petrolina apresentaram desvio nRMSE menores que 15% e as demais localidades aproximadamente 20%.

Palavras-chave: Estimativa, GOES-16, Irradiância, Tarpley.

1. INTRODUÇÃO

Em se tratando da energia solar fotovoltaica, a irradiância solar incidente na superfície é o fator ambiental preponderante que influencia na potência de saída de uma central fotovoltaica (SABINO, 2019). Desta forma, torna-se importante mensurar o recurso solar disponível para uma determinada região de interesse. A maneira mais confiável de se conhecer o recurso solar para fins de geração em uma determinada região é por meio do uso de instrumentos de medição de radiação, como o pireliômetro e piranômetro, instalados em estações solarimétricas que medem as componentes solar direta (DNI, *Direct Normal Irradiance*) e global (GHI, *Global Horizontal Irradiance*) respectivamente. Entretanto, a estimativa de irradiação, ou irradiância solar por meio de satélites meteorológicos vem se apresentando como uma alternativa tanto para avaliação de uma pré viabilidade de projetos de usinas fotovoltaicas, sendo esta utilizada como parâmetro de entradas em softwares que simulam a produção de usinas fotovoltaicas e fator de capacidade do local, quanto também para ser amplamente utilizada na literatura como variável de entrada em trabalhos de modelos de previsão do recurso solar. Os dados de satélite representam uma boa base de dados tanto temporal quanto espacial, e em alguns casos sem custo.

Este trabalho tem por objetivo estimar a irradiância solar obtida a partir das imagens do canal visível do satélite geoestacionário meteorológico GOES-16 utilizando o modelo proposto por TARPLEY (1979), uma vez que tal modelo necessita de poucas variáveis de entrada, utiliza-se de equações elementares e requer um processamento computacional relativamente simples. Para este estudo foram escolhidas duas localidades no estado de Pernambuco (Recife e Petrolina) e 1 localidade próxima à Pernambuco no estado da Bahia (usina fotovoltaica flutuante no lago de Sobradinho) com estações solarimétricas instaladas. A partir do modelo, também espera-se obter e registrar os coeficientes de regressão encontrados para as equações de estimativas propostas de cada localidade. Adicionalmente ao trabalho realizado por Tarpley foi feita a análise de sensibilidade quanto ao valor de brilho de pixel para classificação das imagens nas três categorias: céu claro (sem nuvens), céu parcialmente nublado e céu nublado e a definição de um limiar de desvio padrão de brilho de uma imagem para classifica-la em céu claro. Para fins de comparação, aplicou-se procedimento de garantia

de qualidade de dados de irradiância solar proposto por PETRIBÚ *et al.* (2017) aos dados medidos de cada estação solarimétrica presentes nos locais citados.

2. BASE DE DADOS

2.1. IMAGEM DE SATÉLITE

O GOES-16 (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) é um satélite geostacionário operado por esforços colaborativos entre NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*) e NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e faz parte da missão GOES-R, composto por outros três satélites, cujo objetivo é fornecer imagens avançadas e medições atmosféricas do clima, oceanos e meio ambiente terrestre. O mesmo foi lançado em novembro de 2016 (LOSOS, 2021) e entrando em condições de operação nominal em dezembro de 2017 (NOAA, 2020), assumindo a posição 75,2°O neste mesmo mês e ano (NOAA, 2020), compreendendo a América do Norte, América Central e a América do Sul (Fig. 1), além de parte do Oceano Atlântico e Pacífico.



Figura 1 – Área de cobertura dos satélites GOES-WEST à esquerda e GOES-EAST à direita.
Fonte: NOAA.

Suas principais características, frente aos satélites anteriores são a abrangência espectral contemplada pelo mesmo, atualmente 16 canais, dos quais são dois visíveis, quatro infravermelho próximo e dez no espectro infravermelho. Além destas características, outro diferencial é a resolução temporal, cujo *time-step* é de 10 minutos, fornecendo assim um acompanhamento em tempo real das medições atmosféricas e outros. As Fig. 2 e 3 apresentam tais informações.

CANAL ABI	Comprimento de Onda Nominal (μm) MIN	Comprimento de Onda Nominal (μm) MAX	Comprimento de Onda Central (μm)	Tipo	Nome Fictício	Resolução Espacial (km)
1	0,450	0,490	0,470	Visível	Azul	1,0
2	0,590	0,690	0,640	Visível	Vermelho	0,5
3	0,846	0,885	0,866	Infravermelho-Próximo	Verde	1,0
4	1,371	1,386	1,379	Infravermelho-Próximo	Cirrus	2,0
5	1,580	1,640	1,610	Infravermelho-Próximo	Neve/Gelo	1,0
6	2,225	2,275	2,250	Infravermelho-Próximo	Tamanho de Partícula de Nuvem	2,0
7	3,800	4,000	3,900	Infravermelho	Janela de Ondas Curtas	2,0
8	5,770	6,600	6,185	Infravermelho	Vapor D'água (Nível Superior)	2,0
9	6,750	7,150	6,950	Infravermelho	Vapor D'água (Nível Intermediário)	2,0
10	7,240	7,440	7,340	Infravermelho	Vapor D'água (Nível Inferior)	2,0
11	8,300	8,700	8,500	Infravermelho	Fase de Nuvem	2,0
12	9,420	9,800	9,610	Infravermelho	Ozônio	2,0
13	10,100	10,600	10,350	Infravermelho	Janela de Ondas Longas "Limpas"	2,0
14	10,800	11,600	11,200	Infravermelho	Janela de Ondas Longas	2,0
15	11,800	12,800	12,300	Infravermelho	Janela de Ondas Longas "Suja"	2,0
16	13,000	13,600	13,300	Infravermelho	CO ₂ de Ondas Longas	2,0

Figura 2 - Resoluções espectrais e espaciais dos canais do satélite GOES-16.
Fonte: goes-r.gov.

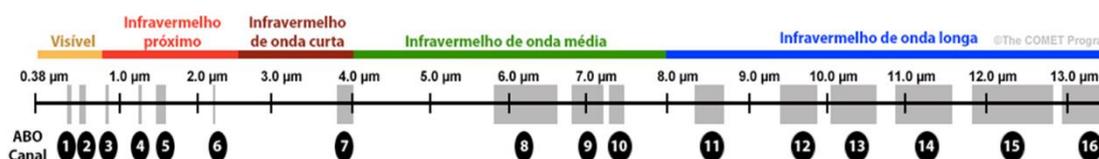


Figura 3 - Intervalo espectral de cada canal do satélite GOES-16.
Fonte: goes-r.gov.

Os metadados do GOES-16 são mantidos pelo NOAA em dois *buckets* (AWS e GOOGLE), disponíveis publicamente para serem acessados. Estes, por sua vez, necessitam passar por geoprocessamento, em que as leituras obtidas pelos sensores do ABI (*Advanced Baseline Imager*), responsável por capturar a radiância refletida pela terra e atmosfera, são transformadas em imagens georreferenciadas.

Os *downloads* dos metadados são realizados através de *script* escrito em linguagem Python, em resolução temporal horária do Canal 02 - ABI do GOES-16 (na região do visível) e resolução espacial de 4 km x 4 km por pixel. Em seguida são submetidos ao geoprocessamento, cujo objetivo é gerar uma imagem geoprocessada com as informações lidas pelo sensor do Canal 02 - ABI no sistema de referência de coordenadas EPSG: 4326, conforme pode ser visto na Fig. 4, extraindo desta a região Nordeste, uma vez que o modo *Full Disk* (Globo inteiro) de cobertura geográfica do satélite gera imagens de toda a sua área de cobertura, o que deixaria as imagens muito pesadas para armazenamento e processamento.

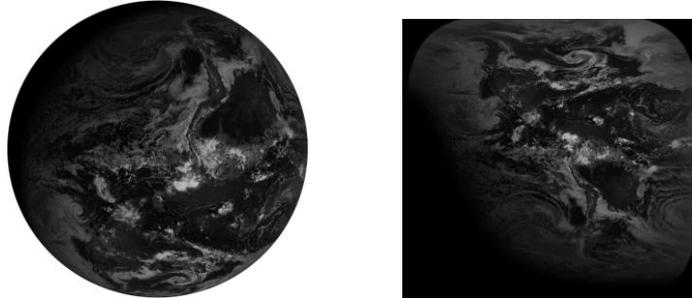


Figura 4 – Imagem à esquerda gerada para todo o disco (*full disk view*) em projeção esférica. Imagem à direita gerada para todo o disco (*full disk view*) em projeção cilíndrica.

Fonte: <http://edc.occ-data.org/goes16/gdal/>.

2.2. DADOS IN SITU

Os dados in situ de irradiância solar foram obtidos para três localidades: CER (Centro de Energias Renováveis) da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) em Recife – PE; CRESF (Centro de Referência em Energia Solar de Petrolina - CHESF) em Petrolina-PE; E estação Meteorológica instalada no lago da Usina Hidrelétrica de Sobradinho da CHESF em Sobradinho - BA.

Tais localidades podem ser vistas na Fig. 5 e suas coordenadas são apresentadas na Tab. 1.

Os dados dos piranômetros foram coletados com frequência de 1 minuto em 1 minuto e foi utilizada apenas a componente global da irradiância (GHI) para todos os locais. Os dados de Sobradinho e de Petrolina passaram por um procedimento de garantia de qualidade com a metodologia descrita por PETRIBÚ *et al.* (2017), enquanto que os dados de Recife foram utilizados conforme fornecido diretamente das medições do instrumento. Os períodos das séries utilizadas são apresentados na Tab. 2.

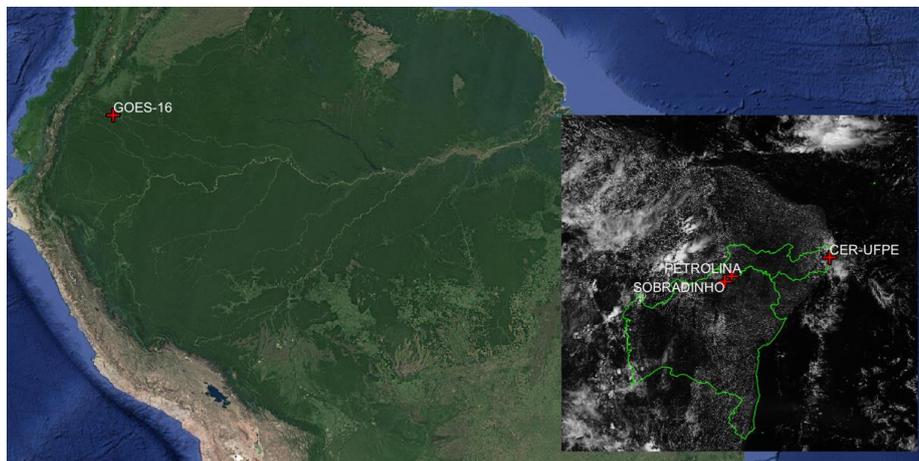


Figura 5 – Imagem do Canal 2 - ABI do satélite GOES-16 recortada para a região Nordeste sobre o mapa da América do Sul. Locais de análise (Recife, Sobradinho e Petrolina) e posição do satélite GOES-16 marcados com cruz vermelha sobre a imagem.

Fonte: O Autor.

Tabela 1 – Localização geográfica dos locais estudados.

Local	Latitude	Longitude
CER-Recife	-8,054995	-34,954989
Sobradinho	-9,422856	-40,825904

Petrolina

-9,106274

-40,443215

Tabela 2 – Período utilizado para calibração e validação.

Local	Início	Fim
CER-Recife	03/04/2018 – 06:00	02/09/2019 - 09:00
Sobradinho	02/10/2018 – 15:00	31/12/2019 – 17:00
Petrolina	26/09/2018 15:00	17/11/2019 - 17:00

2.3. INTEGRAÇÃO DOS DADOS DE PIRANÔMETRO

Uma vez que as imagens de satélite foram obtidas em escala horária e os dados dos piranômetros foram obtidos com frequência de 1 minuto em 1 minuto, os dados de piranômetro foram integrados pela metodologia descrita por Salazar et al. (2020). Em suma o método de integração é realizado com média centrada e calculada em 4 bins de 15 minutos, onde nesses bins de 15 minutos são permitidos apenas uma porcentagem “q” de dados do tipo “NAN” (*Not a Number*), para que algum desses 4 bins não seja descartado e por consequência a hora que ele representa desconsiderada (considerada como NaN). Nesse procedimento foi feita uma análise de sensibilidade de “q” para os dados de Sobradinho para os valores de q igual a 0%, 30%, 40% e 60%.

2.4. ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO BASEADA NO MODELO PROPOSTO POR TARPLEY (1979)

O processo de estimativa começa calculando o ângulo zenital, o azimute solar, conforme equações descritas por Iqbal (1983), e o azimute entre a posição do sol e do satélite. O azimute entre o Sol e o satélite foi definido como o módulo da diferença entre a posição do azimute solar e a posição do azimute do satélite, que por ser geoestacionário, é sempre fixo para um determinado local. O azimute do satélite para cada localidade foi retirado do site “<https://www.satview.org/index.php>” e disposto na Tab. 3. Em seguida se descarta as imagens cujos ângulos zenitais são maiores que 83°, pois estas imagens apresentariam grandes distorções (TARPLEY, 1979).

Tabela 3 – Posição do satélite projetada em relação a cada localidade (azimute).

Local	Azimute do Satélite GOES-16 (°)
CER-Recife	279.9
Sobradinho	284.07
Petrolina	283.39

2.5. REECORTE DA IMAGEM CENTRADA NO LOCAL DE INTERESSE

Faz-se um recorte de uma matriz de 3 x 3 pixels, em todas as imagens, com o pixel central sendo o local de interesse (local dos dados de piranômetro), conforme exemplo da imagem abaixo.

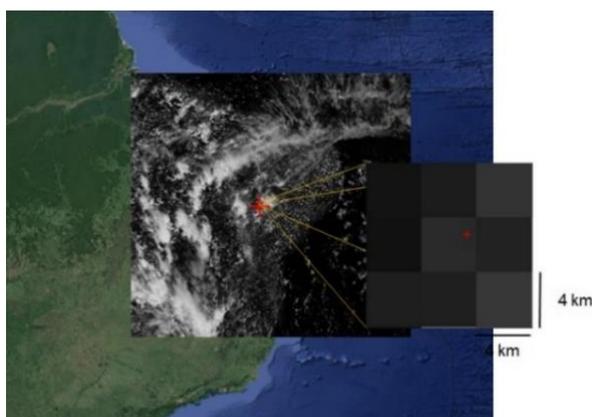


Figura 6 - Zoom do recorte realizado com o pixel central na estação de Sobradinho - BA da CHESF, marcada pela cruz vermelha.
Fonte: O autor.

2.6. DEFINIÇÃO DO BRILHO DE CÉU CLARO

O procedimento baseia-se na tentativa de estimar o que seria uma imagem de céu claro, definindo uma média de brilho de céu claro dos pixels da imagem com valor entre 0 e 255 (8 bits de resolução), para cada posição do sol. Para isso, seleciona-se as imagens cujo desvio padrão entre os pixels seja menor que 5, não sendo feita análise de sensibilidade para este valor de desvio padrão. Então, é feita uma regressão de acordo com a Eq. (1).

$$B = a + b.\cos(X) + c.\sin(X).\cos(\theta) + d.\sin(X).\cos^2(\theta) \quad (1)$$

Onde B é a média de brilho uma imagem de céu claro; X, é o ângulo zenital local; θ , é o ângulo de azimute entre o sol e o satélite; e “a”, “b”, “c” e “d” são os coeficientes da regressão.

Após o cálculo dos coeficientes da regressão, faz-se uma estimativa, a partir das imagens e da equação calibrada, da média de brilho de céu claro e calcula-se o resíduo (diferença), entre a estimativa feita e a média de brilho de fato. As imagens com resíduo superior a 1,3 são descartadas e o procedimento é repetido mais duas vezes, sendo a regressão para a média de brilho de céu claro realizada três vezes ao todo. Após as 3 calibrações, define-se, a partir da Eq. (1) calibrada, um vetor de brilho médio de céu claro estimado para cada instante, ou seja, cada ângulo zenital e ângulo azimutal das imagens utilizadas.

Para exclusão das imagens, a fim de realizar a regressão da equação de média de brilho de céu claro, junto ao critério de desvio padrão menor que 5, foi feita uma análise também, fazendo a inclusão do critério de exclusão das imagens por média de brilho, na premissa de que imagens totalmente nubladas e de céu claro (sem nuvens), pudessem possuir desvio padrão semelhantes, entretanto, a inclusão de tal critério se mostrou indiferente no resultado final.

2.7. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE NUVEM

Com todo o conjunto de dados novamente, sem distinção das imagens de céu claro realizada no processo anterior, definiu-se inicialmente os parâmetros T1 e T2, que representam os limites que vão definir se um pixel está em uma das três classificações: céu claro; céu parcialmente nublado; e céu nublado. Tarpley em seu trabalho definiu T1 como sendo o valor do brilho de céu claro, “B”, mais três e T2 como sendo o valor do brilho de céu claro mais 5 (Tarpley, 1979), não fazendo análise de sensibilidade. Neste trabalho foi realizada uma análise de sensibilidade para cada local, encontrando os valores de T1 e T2 que provocavam melhores estimativas. Um pixel cai na classificação de céu claro se seu brilho \leq T1, céu parcialmente nublado se $T1 < \text{brilho} < T2$, e de céu nublado se $\text{brilho} > T2$.

Em seguida, faz-se o cálculo do índice de cobertura de nuvem “n”, conforme a Eq. (2), abaixo:

$$n = (0.5N2 + N3)/(N1 + N2 + N3) = (N2 + N3)/2N \quad (2)$$

Onde N é o número total de pixels da imagem, N1, N2 e N3, são a quantidade de pixels nas classes céu claro, parcialmente nublado e nublado, respectivamente, para uma determinada imagem.

2.8. ESTIMATIVA DE IRRADIÂNCIA SOLAR HORÁRIA

De acordo com o índice “n” de cobertura de nuvens (quanto maior, mais nublada a imagem), as imagens são separadas em três categorias, de modo a melhor contabilizar diferentes processos físicos que atenuam a radiação incidente sobre as condições de céu claro, parcialmente nublado e condições de céu nublado, assim, realizando uma regressão sobre uma equação que melhor se ajusta a cada condição, conforme equações a seguir:

$$Q_s = a + b.\cos(X) + c.\Psi + d.n + e.(I_m/B)^2, \quad n < 0.4 \quad (3)$$

$$Q_s = a + b.\cos(X) + c.n.(I_{cl}/B_o)^2, \quad 0.4 < n < 1 \quad (4)$$

$$Q_s = a + b.\cos(X) + c.(I_{cl}/B_o)^2, \quad 0.4 < n < 1 \quad (5)$$

Onde Q_s , é a irradiância horária na superfície; X, é ângulo zenital local; Ψ , é a transmitância de céu claro, levando em consideração o vapor de água, espalhamento de Rayleigh e absorção de vapor; n, é a fração da quantidade de nuvens; I_m , é a média de brilho do alvo; I_{cl} , é a média de brilho de céu nublado; B, é o brilho de céu claro estimado; B_o , é o brilho de céu claro normalizado ($X = 45^\circ$, $\theta = 105^\circ$); “a”, “b”, “c”, “d” e “e” são os coeficientes da regressão.

Como neste trabalho não foram utilizados dados de vapor d’água e espalhamento de Rayleigh, a Eq. (3), ficou conforme a Eq. (6):

$$Q_s = a + b.\cos(X) + c.n + d.(Im/B)^2, \quad n < 0.4 \quad (6)$$

2.9. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS DADOS

Em todas as regressões utilizadas no trabalho e para todos os conjuntos de dados, o critério de separação dos dados para calibração e validação seguiu a regra de 70% dos dados para calibração e 30% para validação. Não foram utilizadas outras técnicas como *cross validation* ou análise de sensibilidade quanto a porcentagem de separação dos dados.

3. METODOLOGIA

Foram utilizadas imagens do satélite mais recente da série GOES-R lançado até o momento para a região oeste do globo terrestre, recortadas e centralizadas em cada local e para o mesmo período em que se tinha disponibilidade de dados medidos por estações solarimétricas das localidades estudadas.

O Canal 02 - ABI, canal no espectro do visível do GOES-16, foi escolhido devido a esta se encontrar dentro da maior janela atmosférica da radiação solar, como foi apresentado graficamente na Figura 3, e ser uma das principais faixas de comprimento de onda absorvidas pelo silício de células fotovoltaicas. Além disso, na literatura é amplamente utilizada em trabalhos de estimativas e previsão de radiação solar por imagens de satélite, como os trabalhos propostos por SABINO (2019), TARPLEY (1979), GAUTIER et al. (1980) e CORNEJO-BUENO et al. (2019), possibilitando a análises futuras entre trabalhos.

A finalidade dos dados de medições locais é a de calibração e validação do modelo de modo que a observar o quanto o modelo destoa ou representa a realidade e a capacidade de se relacionar os dados medidos com as imagens pelo modelo. Os dados de piranômetros foram ajustados para que ficassem com a mesma resolução temporal das imagens de satélite e ao mesmo tempo foi avaliada a influência de dados faltantes das séries temporais dos piranômetros no de se considerar o dado final (integralizado) válido ou não.

O modelo utilizado para as regressões e estimativas foi o de Tarpley com algumas modificações como a não utilização de dados de vapor d'água e análise de sensibilidade para o brilho do pixel na definição da condição de céu da imagem, além da definição do limiar para seleção de imagens de brilho de céu claro.

Após os resultados obtidos foi feita uma análise de comparação entre os coeficientes encontrados para localidades estudadas a fim de se obter conclusões gerais e também realizada a comparação com resultados encontrados na literatura para uma das localidades.

4. RESULTADOS

4.1. SENSIBILIDADE AOS DADOS AUSENTES

As porcentagens indicadas na Tab. 4 se referem a porcentagem de dados nulos permitidos em um bin de 15 minutos para que ele não seja desconsiderado e por consequência a hora de que ele faz parte descartada na análise de porcentagem de dados ausentes na série temporal.

Tabela 4 – Estatísticos da análise de sensibilidade quanto a quantidade de dados nulos na integração dos dados de piranômetro.

Local		0%	30%	40%	60%
CER-Recife	RMSE (W/m ²)	85.53	-	85.53	-
	nRMSE (%)	19,47	-	19,47	-
Sobradinho	RMSE (W/m ²)	123.00	121.74	121.74	121.73
	nRMSE (%)	21,47	21,34	21,34	21,34

4.2. SENSIBILIDADE AOS LIMIARES DE CLASSIFICAÇÃO DO CÉU

Outra análise de sensibilidade realizada foi a dos parâmetros T1 e T2 no processo de classificação dos pixels em uma das três categorias: céu nublado, céu parcialmente nublado e céu claro. A sensibilidade foi testada de maneira a encontrar os valores que somados ao brilho de céu claro estimado, classificaria as imagens em uma das três classificações

do céu e a retornar o menor valor de RMSE. A análise forneceu as seguintes considerações, para as localidades, de classificação do pixel.

Tabela 5 – Valores para se classificar os pixels nas categorias: céu claro, céu parcialmente nublado, céu nublado, para cada local estudado.

Local	Céu claro	Céu parcialmente nublado	Céu nublado
CER-Recife	brilho < Bo + 2	Bo + 2 < brilho < Bo + 15	Bo + 15 < brilho
Sobradinho	brilho < Bo + 5	Bo + 5 < brilho < Bo + 19	Bo + 19 < brilho
Petrolina	brilho < Bo + 9	Bo + 9 < brilho < Bo + 18	Bo + 18 < brilho

4.3. COEFICIENTES DAS REGRESSÕES

As tabelas abaixo mostram os coeficientes de calibração das equações de regressão.

Tabela 6 – Coeficientes de regressão da equação de estimativa de brilho de céu claro (Eq. (1)).

Bo				
Local	a	b	c	d
CER-Recife	5,32226	71,65084	-1,47774	-10,08006
Sobradinho	7,12023	20,81578	-0,85945	0,58870
Petrolina	6,07588	22,44814	0,54523	2,32892

Tabela 7 – Coeficientes de regressão da equação de céu claro para estimativa de Irradiância (Eq. (6)).

Céu Claro				
Local	a	b	c	d
CER-Recife	-68,48245	966,060	-284,118	-2,49466
Sobradinho	-62,09823	986,471	-297,151	21,74530
Petrolina	-127,20195	1120,470	-372,446	26,55730

Tabela 8 – Coeficientes de regressão da equação de céu parcialmente nublado para estimativa de Irradiância (Eq. (4)).

Céu Parcialmente Nublado				
Local	a	b	c	
CER-Recife	-27,62041	746,268	-39,8233	
Sobradinho	-66,51677	881,225	-12,3874	
Petrolina	-69,85348	924,849	-10,4544	

Tabela 9 – Coeficientes de regressão da equação de céu nublado para estimativa de Irradiância (Eq. (5)).

Céu Nublado				
Local	a	b	c	
CER-Recife	41,10190	470,474	-22,24580	
Sobradinho	-17,05806	685,138	-6,05461	
Petrolina	-24,79468	710,551	-5,35037	

A tabela abaixo mostra os estatísticos utilizados para avaliação da estimativa: RMSE, nRMSE e correlação de Pearson (R). Os gráficos abaixo mostram uma amostra da série temporal estimada (calculada) e medida in situ, para as cidades de Sobradinho, Recife e Petrolina, realizadas no CER, sendo consideradas apenas as horas de brilho do sol.

Tabela 10 – Estatísticos das estimativas realizadas para cada localidade estudada.

Local	RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	R (-)
CER-Recife	94,80	21,58	0,9246
Sobradinho	106,47	20,14	0,93
Petrolina	74,39	14,85	0,96

4.4. RESULTADOS DA LITERATURA

Tabela 11 – Resultados obtidos por SABINO (2019) de estimativa horária de irradiância solar para a localidade Petrolina-PE.

Estatístico	2013	2014	2015	Média
R(-)	0,88	0,93	0,91	0,91
nRMSE (%)	27,59	20,67	23,10	23,79

4.5. ESTIMATIVA X MEDIÇÃO

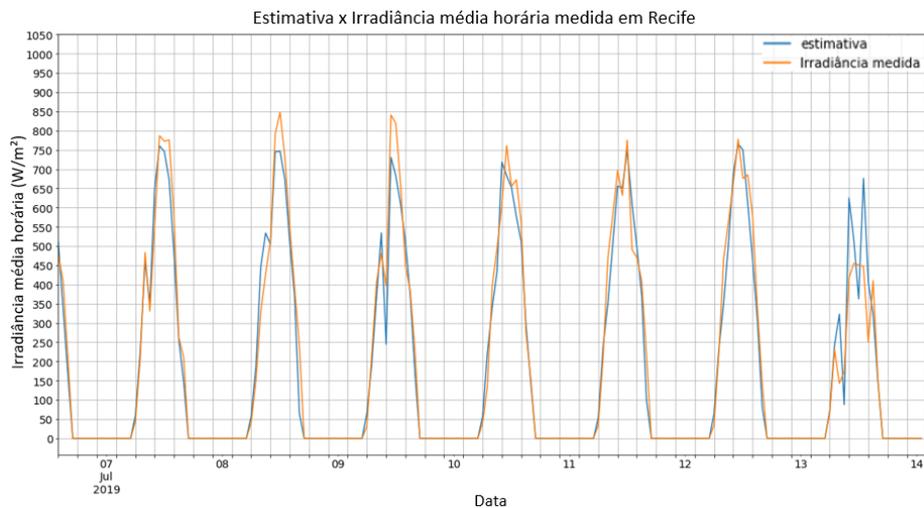


Figura 7 - Série temporal de estimativa de GHI e de medição in situ de GHI no CER, Recife, em julho de 2019.
Fonte: Própria.

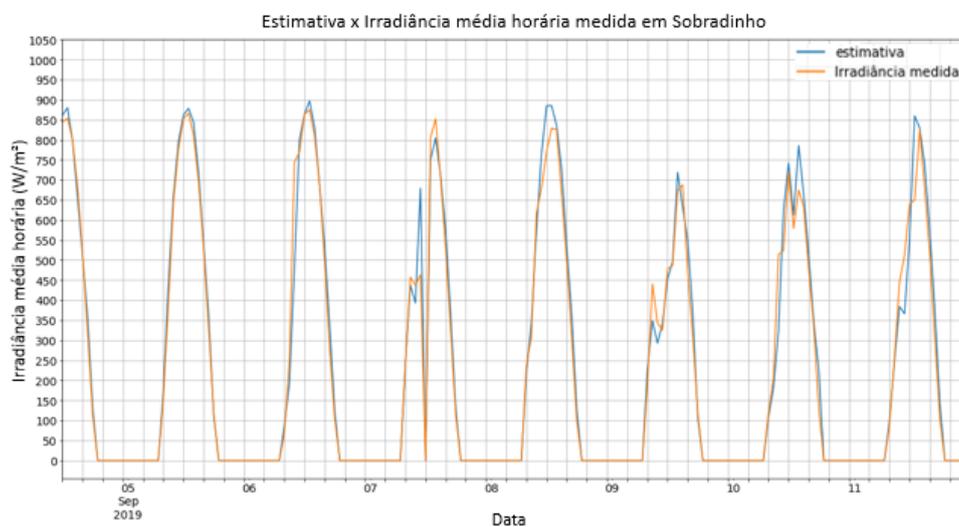


Figura 8 - Série temporal de estimativa de GHI e de medição in situ de GHI em Sobradinho, em setembro de 2019.

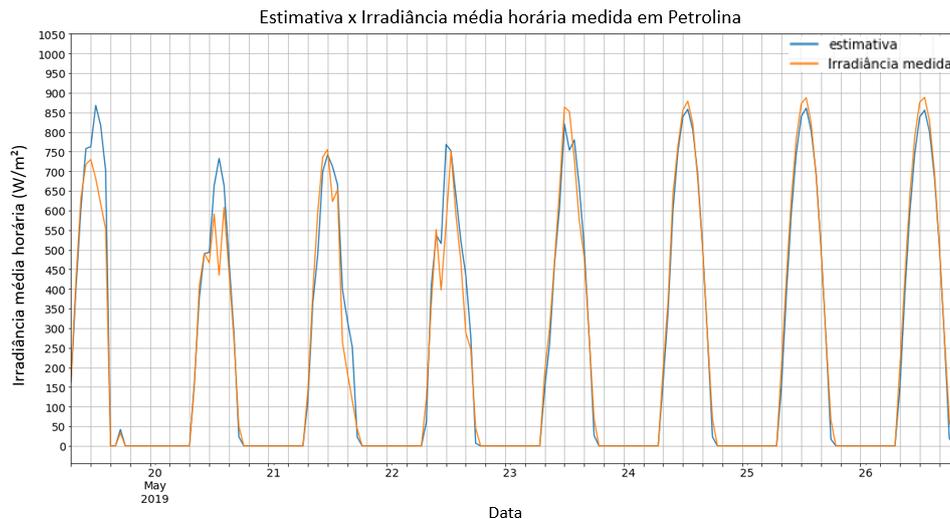


Figura 9 - Série temporal de estimativa de GHI e de medição in situ de GHI em Petrolina, em maio de 2019.

Quanto ao custo computacional, de todos estes procedimentos de importação, recorte, manipulação e cálculo de dados, os scripts para gerar estimativas levam menos de 4 minutos em python. O maior custo computacional gerado foi decorrido da análise de sensibilidade para T1 e T2, no processo de classificação dos pixels, podendo demorar algumas horas dependendo dos critérios de paradas impostos.

5. CONCLUSÕES

Tanto a consideração do critério de exclusão das imagens pela média de brilho no processo de regressão da equação de média de brilho de céu claro, na premissa de que imagens totalmente nubladas e de céu claro (sem nuvens) pudessem possuir desvio padrão semelhantes, como a não consideração de tal critério se mostrou indiferente no resultado final, podendo-se concluir que para estes conjuntos de dados apenas o critério de eliminação por desvio padrão é suficiente para separar imagens de céu claro das demais.

A análise de sensibilidade quanto à quantidade de medições ausentes na integração horária em bins de 15 minutos, mostrou que os resultados para estes conjuntos apresentaram sensibilidade irrisória, ressaltando que a série temporal de dados de Recife apresentou poucos dados ausentes, enquanto que a série de dados de Sobradinho apresentou uma quantidade maior.

Já a análise de sensibilidade quanto à classificação dos pixels em uma das três categorias propostas para o céu (céu claro, parcialmente nublado e céu nublado), mostrou que melhores resultados podem ser obtidos não padronizando os limiares de classificação para cada localidade, entretanto, apesar de diferentes (os limiares para cada localidade), não se mostraram de extrema diferença, uma vez que os valores de brilho do pixel destas imagens podem ir de 0 a 255, sugerindo que para localidades em que não se há a calibração desses resultados, pode-se fazer uma aproximação desses limiares.

Os coeficientes das regressões se mostraram dependentes do conjunto de dados de entrada, ou seja, de cada localidade, entretanto não destoando abruptamente entre os locais testados e Petrolina e Sobradinho, provavelmente por serem mais próximos, apresentaram coeficientes mais semelhantes em comparação com Recife. Uma possibilidade para maiores diferenças nas calibrações foi a não utilização dos dados de vapor d'água e espalhamento de Rayleigh, que poderiam agregar informação, todavia esses resultados podem sugerir a possibilidade de se definir coeficientes genéricos para localidades próximas.

Os gráficos de estimativa para cada uma das localidades também demonstram o maior erro em se estimar em dias nublados e parcialmente nublados (considerando que existem apenas as três classificações citadas no trabalho) e maior precisão de estimativa em dias considerados de céu claro.

Para a localidade de Petrolina, quando comparado com os resultados obtidos previamente por SABINO (2019), verificou-se uma melhora nas estimativas de irradiância solar horária.

Por fim, pode-se concluir que o modelo proposto por TARPLEY (1979) para estimativa de Irradiância média horária, apesar de realizado com algumas alterações como análises de sensibilidade realizadas e da utilização de um satélite mais moderno como o GOES-16, se mostrou junto às imagens do GOES-16 um modelo cujos resultados foram satisfatórios quando analisados junto à literatura com abordagem similar no âmbito do escopo deste artigo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF por meio do projeto 23076.009704/2020-56 e do P&D +I “Exploração de Energia Solar em Lagos de Usinas Hidrelétricas”, CP Eletronorte / Chesf - 003/2015. Os autores agradecem também o apoio recebido da UFPE-FADE (Universidade Federal de Pernambuco - Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE. no âmbito do Programa de P&D ANEEL.

REFERÊNCIAS

- Barros, H.; Costa, A.; Barbosa, E.; Vilela, O.C., 2017. Procedimento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 2017, v. 21, p. 67-78.
- Cornejo-Buenoa, L.; Casanova-Mateob, C.; Sanz-Justoc, J.; Salcedo-Sanza, S., 2020. Machine Learning Regressors for Solar Radiation Estimation from Satellite Data. *Solar Energy*, v. 183, p. 768-775.
- Gautier, C.; Diak, G.; Masse, S. A simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data. *Journal of Applied Meteorology*. v. 19, n. 8, p. 1005-1012, 1980.
- Iqbal, M., 1983. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York, 390 pp.
- Losos, D., 2021. *Beginner’s Guide to GOES-R Series Data*. v. 1.1.
- NOAA, 2020. GOES-16 Transition: NOAA readies GOES-15 and GOES-14 for orbital storage. Osopo. Disponível em: <<https://www.ospo.noaa.gov/Operations/GOES/16/transition.html>>. Acesso em: 23 de novembro de 2021.
- NOAA. Satellites. Weather. Disponível em: <<https://www.weather.gov/about/satellites>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.
- NOAA, NASA, DOC, NESDIS, 2020. Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) – R Series: ABI L2 Cloudy and Moisture Imagery Beta, Provisional and Full Validation Readiness, Implementation and Management Plan (RIMP). v. 2.0.
- NOAA, NASA, GOES-R, S.P.O., GSFCG, 2019. *GOES-R Series Data Book*. Maryland, r. A.
- Petribú, L. B.; Sabino, E.; Barros, H.; Costa, A.; Barbosa, E.; Vilela, O.C., 2017. Procedimento objetivo para a garantia de qualidade de dados de radiação solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente-AVERMA*, 2017, v. 21, p. 67-78.
- Sabino, E. R. C. *Previsão de radiação solar e temperatura ambiente voltada para auxiliar a operação de usina fotovoltaicas*. 2019. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/36837>
- Salazar, G., Gueymard, C., Galdino, J., Vilela, O.C., 2020. Solar irradiance time series derived from high quality measurements, satellite models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 117.
- Satview. Tracking Satellites. Satview. Disponível em: <<https://www.satview.org/index.php>>. Acesso em: 02 de dezembro de 2021.
- Tarpley, J.D., 1979. Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, p. 1172-1181.

MEAN HOURLY IRRADIANCE ESTIMATIVE BY THE SATELLITE GOES-16 IMAGES BASED ON TARPLEY’S 1979 MODEL

Abstract. *The incident solar irradiance at the earth’s surface is the major environmental factor that has influence in the output power of a photovoltaic plant (SABINO, 2019). The solar irradiation estimative, or solar irradiance estimative by meteorological satellites has been presented as an alternative even for a pre-feasibility of photovoltaic plant projects, been used as input parameter in softwares that simulates the energy production of the plants and the capacity factor of a location, as for to be widely used as an input in forecast model works of solar resource. This paper has by objective make solar irradiance estimative from the visible channel images of the geostationary meteorological satellite GOES-16 using the model proposed by TARPLEY (1979). For this study, two locations in the state of Pernambuco (Recife e Petrolina) and one location close to Pernambuco in the state of Bahia (floating photovoltaic plant in the Sobradinho’s lake) were chosen. The hourly irradiance estimative for Petrolina showed an error nRMSE smaller than 15% and the other locations about 20%.*

Key words: *Estimative, GOES-16, Irradiance, Tarpley.*