

# DESENVOLVIMENTO DE MAPA DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO

**Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho** (IFPE) - manoel.henrique.opf@gmail.com

**Elton Barbosa Cavalcante** (IFPE) - eltoncavalcante66@gmail.com

## **Resumo:**

*A apresentação de dados de radiação em forma de mapa é uma das formas que permite visualizar como esta variável se distribui geograficamente, e quais áreas possuem níveis de irradiação interessantes para o desenvolvimento de projetos. Neste trabalho, apresenta-se a metodologia para a elaboração de um mapa de irradiação solar diária global horizontal para o Estado de Pernambuco, utilizando-se inicialmente 44 estações em solo oriundas de três instituições: IFPE, INMET e APAC, no período de 2015 a 2017. Foram aplicados filtros de qualidade que levaram em consideração a falta de dados em determinados intervalos de tempo, e uma comparação com uma referência para detecção de dados inconsistentes. Utilizou-se o programa Qgis para a elaboração do mapa. Como resultado, obteve-se um mapa da distribuição espacial da irradiação global média diária do período. Este foi validado com base nos dados do atlas solarimétrico do INPE de 2017. Os indicadores estatísticos apresentaram valores que foram comparados com os da literatura.*

**Palavras-chave:** *Mapa solarimétrico, Radiação solar, QGIS*

**Área temática:** *Radiação Solar*

**Subárea temática:** *Recursos Solares e Meteorologia da Radiação Solar*

# DESENVOLVIMENTO DE MAPA DE IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO

**Elton Barbosa Cavalcanti** – eltoncavalcante66@gmail.com

**Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho** – manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

## 1. Radiação solar

### 1.1 Recursos solares e meteorologia da radiação solar

**Resumo.** A apresentação de dados de radiação em forma de mapa é uma das formas que permite visualizar como esta variável se distribui geograficamente, e quais áreas possuem níveis de irradiação interessantes para o desenvolvimento de projetos. Neste trabalho, apresenta-se a metodologia para a elaboração de um mapa de irradiação solar diária global horizontal para o Estado de Pernambuco, utilizando-se inicialmente 44 estações em solo oriundas de três instituições: IFPE, INMET e APAC, no período de 2015 a 2017. Foram aplicados filtros de qualidade que levaram em consideração a falta de dados em determinados intervalos de tempo, e uma comparação com uma referência para detecção de dados inconsistentes. Utilizou-se o programa Qgis para a elaboração do mapa. Como resultado, obteve-se um mapa da distribuição espacial da irradiação global média diária do período. Este foi validado com base nos dados do atlas solarimétrico do INPE de 2017. Os indicadores estatísticos apresentaram valores que foram comparados com os da literatura.

**Palavras-chave:** Mapa solarimétrico, Radiação solar, QGIS.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta altos índices de radiação especialmente na região Norte e Nordeste por se encontrarem na chamada zona tropical, região caracterizada por médias anuais de temperatura em torno de 25°C (INMET, 2018). Desse modo, o recurso solar que é uma das variáveis mais importantes quando se pensa na geração de energia elétrica com a utilização de um sistema fotovoltaico é abundante, o que propicia boas condições de geração.

A partir destes princípios se faz necessária uma forma de quantificar os valores de irradiação com a melhor precisão possível, já que sua intensidade pode variar consideravelmente entre dois pontos separados por uma distância de poucos quilômetros. Daí surge a necessidade da elaboração de um mapa de irradiação solar, que pode reunir informações de um grande espaço geográfico, considerando um determinado período, e apresentá-las de forma prática e eficiente que certamente irá atender aos requisitos de um possível analista ou investidor da área.

Ao pesquisar sobre mapas solares brasileiros podemos encontrar diversos mapas que cobrem todo o território nacional como o elaborado por (Pereira et al., 2006), em sua 1ª edição do atlas brasileiro solar de energia, (Pereira et al., 2017), em sua 2ª edição do atlas solarimétrico brasileiro. E alguns mapas regionais como o Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná (Tiepolo et al., 2018), entre outros, como a 1ª versão do mapa solarimétrico brasileiro (Tiba, 2000).

Mapas referentes a regiões menores e mais específicas trazem informações extras quando comparado com mapas a nível nacional. Portanto, a elaboração de um mapa solar para o Estado de Pernambuco mostra-se necessário para incentivar a utilização da energia solar no Estado e permitir o acesso mais fácil às informações sobre o recurso solar e a sua distribuição territorial.

Para a realização deste trabalho, o IFPE contou com parcerias com outras instituições como o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e a Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC) que disponibilizaram os recursos e informações necessárias. Foram utilizadas inicialmente 44 estações solarimétricas com a seguinte distribuição: IFPE (7), APAC (12) e INMET (25). O período considerado para a obtenção das médias diárias anuais foi de três anos: 2015, 2016 e 2017, totalizando 1097 dias.

O programa escolhido para a construção do mapa foi o Qgis que é um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). O Qgis pode ser utilizado em Windows, Linux, Mac OSX e entre outras plataformas. Ele é totalmente gratuito e permite funções como a edição, visualização e importação de dados georreferenciados (QGIS, 2019).

## 2. METODOLOGIA

Inicialmente foi realizado um levantamento das estações solarimétricas com dados disponíveis no Estado de Pernambuco. Baseado em (Silva, 2018), foram identificadas 27 estações que estão contidas no território do Estado. Para a elaboração do mapa, observou-se que é necessário que se utilizem estações que fazem fronteira com os limites do Estado, que foram denominadas estações de borda. Sua localização mais afastada proporciona uma cobertura mais

completa dos arredores do Estado permitindo que seja possível chegar a médias de radiação mais precisas naqueles locais. Além destas, foi verificado que a APAC disponibilizou dados de mais uma estação, não prevista no trabalho de (Silva, 2018), e o INMET instalou novas estações no Estado. O que totalizou 44 estações para o início dos trabalhos, conforme indica a Fig. 1.



Figura 1: Mapa do Estado de Pernambuco com a distribuição das estações solarimétricas.

Na Fig. 1, está indicada uma estação do INPE, porém, esta não foi utilizada para este trabalho.

Após o levantamento das estações, foram utilizados critérios de qualificação de dados:

1 – Estações com quantidade de dias menor que 95% do total (1042) – neste critério foram descartas estações que por terem sido ativadas recentemente, não possuem uma quantidade suficiente de dados para serem utilizados no mapa.

2 – Identificação de falhas e buracos nos dados - a aplicação deste critério exigiu muito trabalho manual, pois os dados brutos possuem buracos (falta de dados em alguns horários), fazendo com que ocorram dias no banco de dados que não contém todas as horas, aumentando assim a incerteza associada à irradiação daquele dia. Para a identificação, foram elaboradas operações de consulta no banco de dados do Access. Foram desconsiderados os dias com mais de 2 horas faltantes.

3 – Comparação das médias com uma referência – neste critério a média diária anual obtida após as exclusões anteriores foi comparada com uma referência como uma forma de verificar a qualidade dos valores. Utilizou-se o banco de dados do INPE (Pereira et al., 2017) como valor de referência.

## 2.1 Tratamento de dados por fonte

### INMET

Foi feita uma solicitação para o INMET dos dados horários da radiação solar global dos três anos que foram considerados neste trabalho (2015, 2016 e 2017) das 25 estações. Uma tabela padrão (Fig. 2) para cada estação foi montada, na qual foram organizados os campos: data, hora, irradiação horária em  $J/m^2$ , irradiação horária em  $Wh/m^2$ , irradiação diária em  $Wh/m^2$  e campos de flag para marcação de hora e dia inválidos.

A	B	C	S	U	V	W	X
codigo_estacao	data	hora	radiação[joule]	Radiação wh/m²	Radiação diária	Dia inválido	
A357	01/01/2015	9	82,137	22,81583333	11042,855		
A357	01/01/2015	10	541,533	150,42583333	11410,14194		
A357	01/01/2015	11	1124,22	312,28333333	11439,16972		
A357	01/01/2015	12	2699,08	749,74444444	11151,65972		
A357	01/01/2015	13	2243,04	623,06666667	10401,91528		
A357	01/01/2015	14	1740,29	483,41388889	9822,3088889		
A357	01/01/2015	15	2857,77	793,825	9599,269167		
A357	01/01/2015	16	2441,63	678,23055556	9313,280278		
A357	01/01/2015	17	1286,38	357,32777778	9315,630278		
A357	01/01/2015	18	818,805	227,44583333	9831,624722		
A357	01/01/2015	19	644,412	179,00333333	10473,365		
A357	01/01/2015	20	408,378	113,43833333	10977,25889		
A357	01/01/2015	21	65,803	18,27861111	11426,765		
A357	01/01/2015	22	0	0	11923,81694		
A357	02/01/2015	9	70,645	19,62361111	12495,73917		
A357	02/01/2015	10	609,775	169,38194444	12919,62111		
A357	02/01/2015	11	1157,02	321,39444444	12975,14944		
A357	02/01/2015	12	2522,01	700,55833333	12686,66833		
A357	02/01/2015	13	3071,82	853,28333333	11986,11		
A357	02/01/2015	14	3136,88	871,35555556	11178,1075		
A357	02/01/2015	15	3415	948,61111111	10560,41		
A357	02/01/2015	16	3243,65	901,01388889	10074,70167		
A357	02/01/2015	17	3398,85	944,125	9828,929444		
A357	02/01/2015	18	2175,15	604,20833333	9849,879444		
A357	02/01/2015	19	1404,37	390,10277778	10020,16278		
A357	02/01/2015	20	646,033	179,45361111	10208,07389		

Figura 2: Tabela padrão para organização dos dados das estações.

Para a montagem dos campos das tabelas, utilizou-se 3,6 como constante de conversão de  $J/m^2$  para  $Wh/m^2$ . E para o cálculo da irradiação diária, foi feito o somatório dos valores horários da irradiação (Eq. 1) (Rabl, 1985), considerando-se apenas os valores positivos que estão concentrados em sua maioria entre 7 e 17 horas (UTC), pois os dados brutos possuem valores negativos no horário noturno que devem ser desconsiderados.

$$H_{diaria} = \int_{-ts}^{ts} H_{horaria} \cdot dt = \sum_7^{17} H_{horaria}(t) \quad (1)$$

Como resultado deste tratamento e da aplicação dos critérios de qualificação, foram descartadas 3 estações do INMET: Piranhas-AL, Salgueiro e Paulo Afonso-AL, pelo 1º critério de qualificação. E pelo 3º, foram excluídas estações que apresentaram médias com diferença maior que 5% do valor do INPE.

Com a aplicação dos critérios, foram excluídas 13 estações do INMET, restando 12 que foram consideradas para a elaboração do mapa.

## APAC

Foram feitas duas solicitações à APAC dos dados horários da radiação solar global dos três anos que foram considerados neste trabalho (2015, 2016 e 2017) das 12 estações que possuem dados de radiação, pois nem toda estação de dados da APAC possui sensores de radiação solar. Uma tabela padrão nos mesmos moldes da Figura 2 foi elaborada para cada estações da APAC.

Como os dados da radiação horária fornecidos pela APAC são valores a cada minuto acumulados da irradiância em  $W/m^2$ , foi necessário dividir por 60, como forma de realizar a integração deles para obter a energia horária ( $Wh/m^2$ ), (Eq. 2) adaptada de (Rabl, 1985)

$$H_{diaria} = \int_{-ts}^{ts} I_{minuto} \cdot dt = \frac{1}{60} \sum_7^{17} I_{minuto}(t) \quad (2)$$

Após, foi necessário calcular a energia diária, que é a soma dos valores horários em  $Wh/m^2$ . Para tanto, foram selecionados os valores de irradiação contidos em um dia e somados apenas os valores que estão concentrados entre 5 e 17 horas (hora local).

Utilizando os mesmos critérios de qualidade do INMET, foram excluídas 2 estações: Recife e Goiana, pelo 3º critério.

## IFPE

Os dados do IFPE como estavam disponíveis e organizados em um banco de dados, não foi necessário nenhum tratamento e nem organização deles.

Após a utilização dos mesmos critérios listados, foram excluídas 6 estações pelo 1º critério, devido à falta de dados dentro do período considerado, pois estas foram ativadas recentemente. Neste caso apenas os dados da estação de Pesqueira foram utilizados para o mapa.

## 2.2 Elaboração do mapa solarimétrico

Para a elaboração do mapa solarimétrico com os dados das 33 estações restantes, foi utilizado o programa Qgis, disponível no endereço ([https://www.qgis.org/pt\\_BR/site/](https://www.qgis.org/pt_BR/site/)), por ser um programa livre e de código aberto.

Para a entrada dos dados para o Qgis foram utilizadas as médias diárias da irradiação solar do período considerado (2015 a 2017), para tanto uma tabela em formato CSV (Coluna Separada por Vírgula) foi organizada utilizando o modelo apresentado na Tab. 1.

Tabela 1: modelo de tabela de dados para importação no Qgis.

id	Longitude	Latitude	Nome	Rad
1	-9,29	-35,57	São Luiz do Quintude	4448,354
2	-9,39	-40,52	Petrolina	4561,155
3	-7,85	-35,24	Carpina Apac	4866,345
4	-8,67	-35,57	Palmares	4919,563

Para o processamento do programa, também é necessário fornecer o arquivo SHP (Shape) contendo os limites do Estado de Pernambuco e definir o método de interpolação pelo inverso da distância (IDW), baseado no algoritmo de Kriging (Landim, 2003).

A produção final do mapa pelo Qgis (Fig. 3) envolve diversos passos como: interpolação, recorte, rampa de cores, rotulagem e legenda.

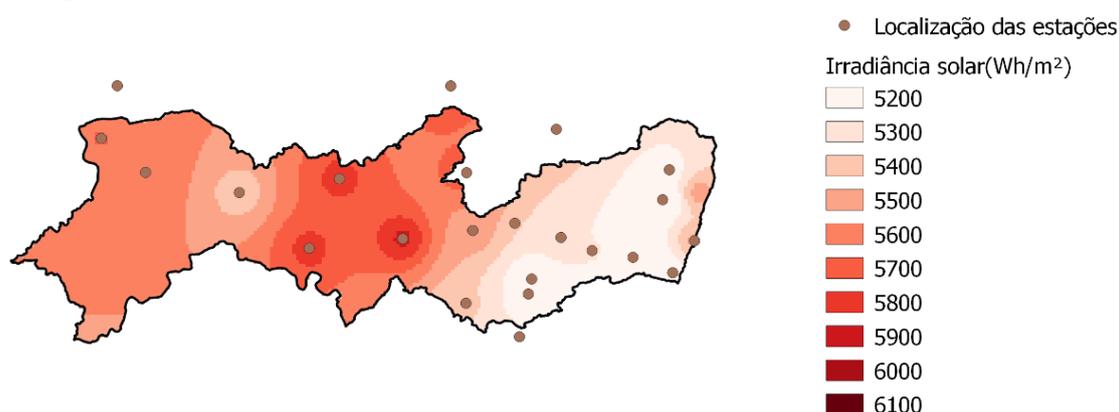


Figura 3: Mapa solarimétrico produzido pelo Qgis.

O mapa apresentado na Fig. 3 apresenta uma rampa de cores semelhante à rampa do mapa elaborado por (Pereira et al., 2017) para que seja possível uma comparação com este (Fig. 4).

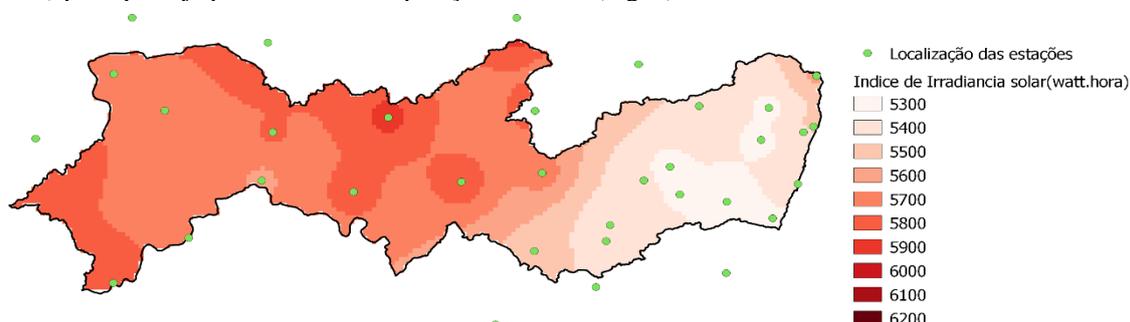


Figura 4: Mapa solarimétrico elaborado com dados de irradiação fornecidos pelo INPE.

O mapa apresentado na Fig. 3 foi elaborado utilizando-se a média diária da irradiação apenas dos locais onde as estações solarimétricas estão instaladas. É possível notar a semelhança da distribuição espacial da irradiação na região central (agreste), zona da mata e litoral do Estado. Já na região do sertão, percebe-se que existe uma região destacada na área mais à esquerda do mapa (região de Petrolina e Afrânio), devido à presença de dados do INPE em duas estações que foram descartadas na etapa de qualificação.

### 2.3 Validação do mapa

Como forma de qualificação do mapa elaborado, foram definidos aleatoriamente 52 pontos no Estado, para comparação dos valores fornecidos pelo Qgis e pelo mapa do INPE (Pereira et al., 2017). A partir destes pontos, dois procedimentos foram realizados:

1 – Obtenção da diferença percentual entre os dois mapas, tomando-se como referência o mapa do INPE. Como resultado, foi elaborado o mapa do erro percentual apresentado na Fig. 5.

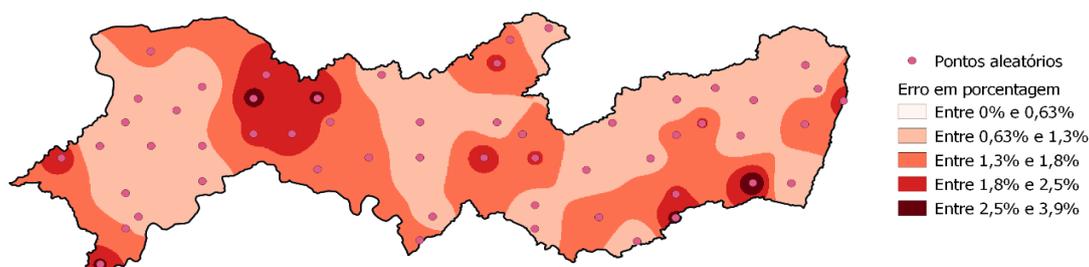


Figura 5: Mapa do erro percentual entre o mapa elaborado e o mapa do INPE.

Observa-se, na Fig. 5, que o erro máximo obtido foi de 3,9% (faixa mais escura do gráfico). As regiões em que este erro está mais evidente é na região central, nas proximidades do Município de Salgueiro, na zona da mata Sul, próximo ao Município de Palmares, e na região onde estão localizados os Municípios de Petrolina e Afrânio, neste último caso, justifica-se, pois nenhuma estação solarimétrica pertencente a esta área foi utilizada para a elaboração do mapa.

2 – Tratamento estatístico dos valores comparativos entre a referência (INPE) e o mapa obtido. Neste caso, foram empregados quatro indicadores estatísticos (RMSE, MSE, SMSN e MSE) seguindo o mesmo procedimento adotado por (Soares et al., 2018).

O erro médio quadrático (RMSE) representa o desvio padrão dos erros e é calculado pela Eq. 3.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (3)$$

Na Eq. 3,  $n$  é o número de pontos amostrados,  $P_i$  representa o valor previsto (mapa INPE) e  $O_i$  o valor obtido (mapa deste trabalho).

O MBE, ou desvio padrão das médias é calculado pela Eq. 4.

$$MSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} / \sqrt{n} \quad (4)$$

O Erro médio quadrático normalizado (SMSN) é calculado pela Eq. 5.

$$SMSN = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \times \left(\frac{100}{\bar{d}}\right) \quad (5)$$

E por último, para o cálculo do Erro Padrão Médio (MSE) foi utilizada a Eq. 6.

$$\overline{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O}_1)^2} / \sqrt{n} \quad (6)$$

A Tab. 2 apresenta os valores dos indicadores estatísticos obtidos com os 52 pontos aleatórios da Fig. 5, em comparação com os valores obtidos por (Soares et al., 2018).

Tabela 2: Comparação dos indicadores estatísticos calculados deste trabalho.

Indicador	(Soares et al., 2018)	Este trabalho
RMSE	0,167	0,107
MBE	-0,036	14,5
RMSN	0,989	1,943
MSE	0,165	29,85

Analisando a Tab. 2, observa-se que os indicadores estatísticos obtidos neste trabalho estão bem próximos aos de (Soares et al., 2018), com exceção do MSE e o MBE. Nestes casos, aponta-se que foram estimados valores em áreas extensas do mapa sem estações com dados válidos dentro do período utilizado.

### 3. CONCLUSÕES

Consideramos que para a elaboração de mapas de radiação solar, se faz necessário possuir dados de qualidade e com distribuição mais uniforme possível na área de estudo. Este trabalho, embora tenha obtido resultados comparáveis aos da literatura, ainda carece de ser continuado mais à frente para que as estações recentes acumulem períodos mais longos de dados.

Observa-se que para a realização desta atividade é imprescindível o domínio de uma ferramenta de geoprocessamento, considera-se que a contribuição deste trabalho está no sentido demonstrar que é possível elaborar um mapa temático solarimétrico utilizando programas gratuitos e livres como o Qgis.

Finalmente, em posse do estudo dos erros associados às estimativas feitas por meio da krigagem simples no software Qgis, foi possível concluir que os mapas gerados ilustraram de maneira satisfatória a distribuição da irradiação solar no Estado de Pernambuco e que, apesar dos eventuais desafios com as estações, conseguimos nos aproximar consideravelmente da realidade.

#### Agradecimentos

Ao IFPE pelo estímulo para a realização deste trabalho por meio da concessão de bolsa, à APAC, INMET e ao INPE por terem disponibilizado os dados de radiação solar das estações e à FACEPE pelo fomento à pesquisa.

#### REFERÊNCIAS

- INMET. 2018. “Temperatura média anual”. Recuperado 27 de junho de 2019 (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomaliaTempMediaAnual>).
- Landim, P. M. B. 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. 2a ed. organizado por UNESP. São Paulo.
- Pereira, E. B., F. R. Martins, S. L. Abreu, e R. Rüther. 2006. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. São José dos Campos: INPE.
- Pereira, E. B., F. R. Martins, A. R. Gonçalves, R. S. Costa, F. J. L. Lima, R. Rüther, S. L. Abreu, G. M. Teipolo, S. V. Pereira, e J. G. Souza. 2017. “Atlas Brasileiro de Energia Solar” organizado por INPE.
- QGIS. 2019. “Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)”. Recuperado 2 de agosto de 2019 ([https://www.qgis.org/pt\\_BR/site/about/index.html](https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html)).
- Rabl, A. 1985. *Active Solar Collectors and Their Applications*. New York: Oxford University Press.
- Silva, Carlos F. dos S. 2018. *Qualificação de dados para geração de mapas de radiação solar*.
- Soares, Raiana S., Geórgia A. Tomaszewski, e Rafael Haag. 2018. “Elaboração de mapas solarimétricos para o estado do Rio Grande do Sul através do tratamento e interpolação de dados oriundos de estações meteorológicas.” in *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado Brasil.
- Tiba, C. 2000. “Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres.”
- Teipolo, Gerson M., E. B. Pereira, Jair U. Junior, S. V. Pereira, A. R. Gonçalves, F. J. L. Lima, R. S. Costa, e Alisson R. Alves. 2018. “Atlas de energia solar do Estado do Paraná - resultados”. in *VII Congresso Brasileiro de Energia Solar*. Gramado.

## **DEVELOPPING A GLOBAL SOLAR RADIATION MAP FOR PERNAMBUCO STATE**

**Abstract.** *The presentation of solar radiation data in map format permits visualizing how this variable is geographically distributed and which areas have interesting levels of irradiation to developing solar power plants. In this work, a map development methodology of daily global solar irradiation is presented to Pernambuco State. It was used initially 44 ground stations belonging to IFPE, INMET and APAC, during 2015 to 2017. Quality filters were applied that took in consideration the lack of data during time intervals and a comparison to a reference for detecting inconsistent data. Qgis software was used to elaborate the map. As result, a spatial distribution of daily solar irradiation was obtained for the period. This map was confronted to a reference, the database of INPE solarimetric atlas of 2017. The statistical indicators presented values comparable to those from literature.*

**Key words:** *Solarimetric map, Solar radiation, Qgis.*