

# COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE INSOLAÇÃO: UMA APLICAÇÃO ÀS ESTAÇÕES DE PETROLINA E NATAL

Anthony Carlos Silva Porfirio<sup>1</sup>, Juan Carlos Ceballos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestrando em Meteorologia (DSA/CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP, anthony.carlos@cptec.inpe.br.

<sup>2</sup> Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA/CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, SP.

**RESUMO:** O presente estudo compara quatro diferentes métodos de estimativa da insolação, baseados no uso de pireliômetro, imagens de satélite, e registros heliográficos, no período 2007-2008. Os dados das componentes da radiação solar e insolação foram obtidos de sítios experimentais em Petrolina, Natal e Água Branca (redes solarimétricas SONDA e INMET). As estimativas de satélite foram fornecidas pela DSA/CPTEC/INPE. A insolação avaliada por pireliômetro segundo critério recomendado pela WMO mostra boa acurácia em relação às medidas heliográficas. As estimativas por satélite mostram bom ajuste linear com o valor efetivo (baseado em dados pireliométricos efetivos). Os desvios médios associados são da ordem de  $\pm 1\%$ . A estimativa por satélite e a efetiva exibem diferença significativa com os dados heliográficos. Entretanto, esta diferença pode ser corrigida por meio de uma função quadrática.

**ABSTRACT:** The present study compares a set of four different estimation methods for sunshine duration, based on the use of pyr heliometric and heliographic records and of satellite imagery, during 2007-2008. Data of solar radiation components and sunshine duration for Petrolina, Natal and Água Branca were obtained from SONDA and INMET networks. The satellite-based estimates for sunshine duration were provided by DSA/CPTEC/INPE. Sunshine duration assessed by pyr heliometer (WMO recommendation) shows good performance when compared with heliographic observations. Satellite-based estimates show good linear fit to effective sunshine (assessed using effective pyr heliometric data). Associated mean deviation is  $\pm 1\%$ . Sunshine duration assessed from satellite imagery as well as effective value show significant difference with heliographic data, which nevertheless can be corrected by a quadratic fitting expression.

## 1 – INTRODUÇÃO

O conhecimento acurado da radiação solar na superfície possui diversas implicações em hidrologia, climatologia, agricultura, engenharia, e em muitas outras atividades humanas. Em comparação com as séries temporais de precipitação pluviométrica, temperatura do ar e vento, medições de irradiância solar são relativamente escassas. Esta foi uma das razões para desenvolver métodos de estimativa de irradiância solar a partir de dados de insolação (duração do brilho solar ou *sunshine duration*), uma vez que estes últimos possuem longas séries temporais ao redor mundo. Por outro lado, a insolação pode ser utilizada para caracterizar o clima de uma região, e é uma informação essencial em diversos setores, por exemplo, no turismo. Ela é definida como o tempo em que o disco solar permanece sem obstrução por nuvens (ou seja, da percepção de tempo com feixe de radiação solar direta). Em geral é medida por um heliógrafo (modelo Campbell-Stokes) o qual se

baseia na observação da queima de uma faixa de papel por concentração dos raios solares. Contudo, a estimativa de insolação via heliógrafo apresenta diversas limitações. Algumas delas são discutidas por Painter (1981), Ceballos *et al.* (1992), e recentemente por Porfirio *et al.* (2011). A evolução da instrumentação meteorológica eletro-eletrônica automatizada impulsionou a necessidade de gerar uma definição física “precisa” que permitisse representar as usuais medições heliográficas através desses equipamentos. A Organização Meteorológica Mundial adotou o pireliômetro como instrumento de referência para avaliar insolação, propondo  $120 \text{ W m}^{-2}$  de irradiância direta normal DNI como patamar de queima de heliograma (WMO, 1985). Os resultados de comparações entre a insolação obtida por heliógrafo (*nhelio*) e a estimada por pireliômetro (*npir*) são variados: por um lado Chaves e Escobedo (2000) encontraram alta correlação para medidas em Botucatu, SP; por outro lado, em Maceió-AL, Porfirio *et al.* (2011) não observaram comportamento linear entre *nhelio* e *npir* (baseando-se em valores médios  $\langle \text{DNI} \rangle$  de 5 min). Assim, evidencia-se a necessidade de uma investigação mais detalhada da relação entre ambas. Complementarmente, técnicas de estimativa de insolação via satélite geostacionário, como o GOES, permitem sua avaliação e monitoramento em regiões extensas, com boa resolução espacial ( $\approx 4 \text{ km}$ ) e temporal (entre 15 e 30 min) (CEBALLOS e RODRIGUES, 2008). Este tipo de estimativa também deve ser validado por comparação com pireliômetro. Este trabalho teve por objetivo analisar a relação existente entre várias definições possíveis de insolação. A presente contribuição se concentra no período 2007-2008 em Petrolina-PE e Natal-RN.

## 2 – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE INSOLAÇÃO

São analisadas relações entre quatro definições:

**1) Insolação por heliógrafo (*nhelio*):** O princípio de medida do heliógrafo é a queima de uma faixa de papel por concentração dos raios solares e a observação do registro resultante (heliograma).

**2) Insolação por pireliômetro (*npir*):** Baseada na definição da WMO, mencionada na introdução, igual à soma de sub-períodos para os quais a DNI seja superior a  $120 \text{ W m}^{-2}$ .

**3) Insolação efetiva (*nef*):** Este método considera a hipótese de que as nuvens possuam espessura óptica elevada, de forma que a  $\langle \text{DNI} \rangle$  num intervalo de tempo  $\delta t$  é representativa da fração de tempo  $f$  com raios solares diretos nesse intervalo, definindo assim uma insolação efetiva *nef* como

$$nef = \sum_i f_i \delta t_i = \sum_i \left( \frac{\langle \text{DNI} \rangle_i}{\text{DNI}_{cc_i}} \right) \delta t_i \quad (1)$$

ou seja a soma dos intervalos efetivos com céu claro, sendo  $DNI_{cc}$  a DNI esperada em condição de céu claro. O modelo REST elaborado por Gueymard (2003) apresenta boa acurácia e foi selecionado para avaliar  $DNI_{cc}$ . A equação 1 considera que a passagem de nuvens em  $\delta t$  inibe a queima do papel heliográfico (CEBALLOS *et al.*, 1992; PORFIRIO *et al.*, 2011). Esta definição é independente da sensibilidade da fita heliográfica e será adotada como referência.

**4) Insolação por satélite (*nsat*):** O método é descrito por Ceballos e Rodrigues (2008) e Porfirio *et al.* (2011). Um pixel no canal VIS do satélite GOES representa a média entre um valor mínimo  $Rmin$  de céu claro e um valor máximo  $Rmax$  de céu nublado (transição entre cobertura por nuvens  $Cu$  e por  $St$ ), ponderada com a cobertura parcial de nuvens  $C$ :  $RI = CRmax + (1-C)Rmin$ . A insolação diária corresponde à integração da informação de uma sequência de imagens, como segue

$$nsat = \sum_i (1 - C_i) \delta t_i \quad (2)$$

$C_i$  é a nebulosidade característica do intervalo de tempo  $\delta t_i$  entre duas imagens sucessivas. A insolação estimada com base em imagens do canal VIS do GOES Imager é disseminada pela DSA/CPTEC/INPE na página internet <http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>.

### 3 – DADOS

As medidas de insolação diária (em horas) foram fornecidas pelo INMET/3°DISME, obtidas de registros de heliógrafos em Natal - RN (5°55'S, 35°12'W, 48,6m), Petrolina - PE (9°22'S, 40°28'W, 370,4m) para o período 2007-2008 e Água Branca - AL (9°17'S, 37°54'W, 605,3m) para o ano de 2008. Estimativas de insolação por satélite foram fornecidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do INPE (DSA/CPTEC/INPE). A irradiância solar global ( $E_g$ ) e irradiância solar difusa ( $E_d$ ), mensuradas por piranômetros CM11 da Kipp & Zonen, foram obtidas das estações da rede SONDA (ver <http://sonda.ccst.inpe.br/>) em Petrolina e Natal (registros médios a cada minuto). A DNI é calculada segundo  $DNI = (E_g - E_d)/\cos Z$ , onde  $Z$  é o ângulo zenital solar. Para estimar  $DNI_{cc}$ , foram utilizados: i) dados médios mensais de pressão atmosférica (mensurados nos sítios), ii) valores médios de turbidez atmosférica  $\beta$  em Petrolina (= 0,026) e Natal (= 0,032), determinados por meio de fotômetro da AERONET, e profundidade óptica do aerossol em 0,55 $\mu$ m via Giovanni da NASA, respectivamente; adotando um expoente de Angstrom  $\alpha = 1,3$ ; iii) dados diários de água precipitável (modelo Global do CPTEC) e iv) dados médios mensais de ozônio obtido pelo sensor OMI da NASA.

### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 permite comparar os distintos métodos de avaliação de insolação (*nhelio*, *npir*, *nef* e *nsat*) nos sítios experimentais de Petrolina-PE e Natal-RN.

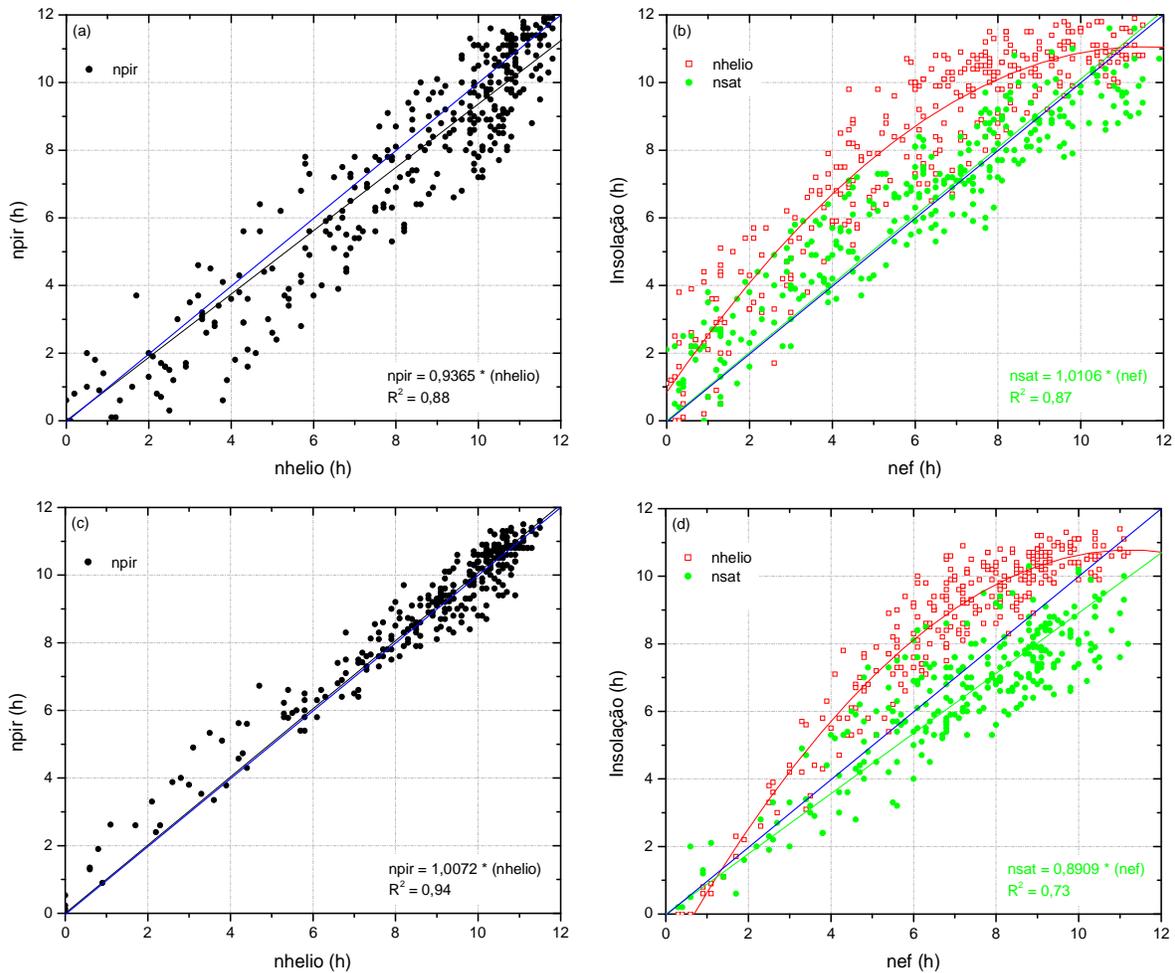


Figura 1 - Comparação da insolação diária obtida por diferentes métodos: (a) e (c) pireliômetro (*npir*) versus heliógrafo (*nhelio*) e (b) e (d) heliógrafo e satélite (*nsat*) versus efetivo (*nef*) para Petrolina e Natal, respectivamente. A linha azul representa a relação 1:1.

A insolação *npir* se aproxima linearmente da insolação por heliógrafo *nhelio* ( $R^2 = 0,88$ ), sendo modulada apenas pela dispersão dos pontos (Figura 1a). Notou-se uma subestimativa de  $\approx 6,3\%$  de *npir* em relação à *nhelio*. A medida *nhelio* excede *npir* em Petrolina, mas se ajusta adequadamente em Natal (Figura 1c), com  $R^2 = 0,94$  e o coeficiente de inclinação virtualmente unitário ( $b = 1,0072$ ). Percebe-se que a *npir* apresentou valores razoavelmente superiores (inferiores) em dias com baixo (alto) brilho solar. Resultado similar foi observado em Botucatu-SP por Chaves e Escobedo (2000), com superestimativas em dias nublados e subestimativas em dias de céu aberto. Kerr e Tabony (2004) encontraram resultados semelhantes para o Reino Unido. A estimativa *nsat* apresentou bom ajuste linear com *nef* ( $R^2 = 0,87$  e  $0,73$ ); porém, a dispersão no eixo das ordenadas evidencia certa imprecisão na estimativa diária de insolação (Figura 1b,d). Ao considerar médias decendiais e/ou mensais a dispersão tende a diminuir (CEBALLOS *et al.*, 1992; PORFIRIO *et al.*,

2011). Para Petrolina, a estimativa  $nsat$  (comportamento médio) superestima  $nef$  em apenas 1%. Entretanto, para Natal, subestima da ordem de 11%. As maiores diferenças foram presenciadas em valores de  $nef$  superiores a 8 h, sugerindo que o método por satélite indicava a presença (falsa) de nuvens no pixel. Na equação 2 a qualidade da integração é afetada por eventuais falhas na recepção de imagens e pelos valores assumidos para  $Rmin$  e  $Rmax$  (a DSA/CPTEC adota 0,09 e 0,465, respectivamente). Para testar os parâmetros mais adequados adotou-se  $Rmin = 0,05$  (baseado no produto MODIS MCD43B3 canal VIS). Encontrou-se uma melhoria considerável no ajuste  $nsat$  vs  $nef$  com  $R^2 = 0,75$  e  $b = 0,989$ .

A medida do heliógrafo superestima a  $nef$ , principalmente no intervalo  $4 < nef < 8$  h (Figura 1b,d). Além disso, percebe-se que a relação entre ambas pode ser descrita por uma função quadrática. A fim de transformar as estimativas via satélite para o equivalente medido por heliógrafo foi realizado um ajuste por mínimos quadrados entre  $nhelio$  e  $nsat$ . É válido ressaltar que o último sugere ser relativamente equivalente a  $nef$  (referência). O conjunto de dados em Petrolina e Natal forneceu a aproximação  $nhelio = -0,9521 + 2,0814nsat - 0,0899nsat^2$  ( $R^2 = 0,80$ ). A aplicação desta expressão para os dados heliográficos da estação de Água Branca é ilustrada na Figura 2. Evidencia-se que o uso desta expressão representou com acurácia a medida de insolação por heliógrafo.

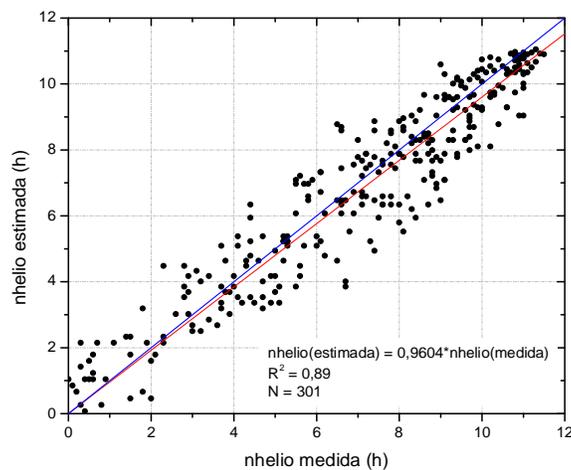


Figura 2 – Relação entre a insolação diária medida por heliógrafo e estimada ( $nhelio = -0,9521 + 2,0814nsat - 0,0899nsat^2$ ) em Água Branca, para o ano de 2008. A linha azul representa a relação 1:1.

## 5 – CONCLUSÕES

A insolação por pireliômetro  $npir$  em Petrolina e Natal (baseada em valores médios de  $\langle DNI \rangle$  em 1 min) apresenta relação linear acurada com a medida heliográfica  $nhelio$ , embora tenha sido

observada uma relativa dispersão (principalmente em Petrolina). A estimativa por satélite *nsat* mostra bom ajuste linear em relação à insolação efetiva *nef*, com diferenças médias de  $\pm 1\%$ . A insolação *nsat* e a *nef* apresentam uma diferença sistemática com os dados heliográficos, porque correspondem a conceitos físicos diferentes. Entretanto, estas diferenças podem ser corrigidas por meio de uma função quadrática entre *nhelio* e *nsat*. A aplicação desta função (baseada em duas estações, em PE e RN) conseguiu representar com propriedade os dados heliográficos de uma terceira (Água Branca - AL), com subestimativa de valores médios da ordem de 4%. Estes resultados indicam que os métodos baseados em imagens de satélite (neste caso o GOES, canal VIS) podem fornecer informações precisas para estudos de levantamento do potencial energético para uma região, bem como para estudos relacionadas à agrometeorologia.

**AGRADECIMENTOS:** À rede SONDA, ao INMET/3°DISME, à DSA/CPTEC/INPE, à PGMET/CPTEC/INPE, e à CAPES/MEC, que forneceram dados e deram apoio na participação no XVII CBMET. Este trabalho é parte do projeto CAPES Pró-Engenharias nº 871/2008.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CEBALLOS, J.C.; MOURA, G.B.A.; BEZERRA, V.F.; FARIAS, J.d'A.A. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 7(2), p. 563-581, 1992.
- CEBALLOS, J.C.; RODRIGUES, M.L. Estimativa de insolação mediante satélite geostacionário: resultados preliminares. *In*: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo, 2008.
- CHAVES, M. A.; ESCOBEDO, J. F. Correlação entre os valores de insolação e razão de insolação medidos com pireliômetro e heliógrafo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 15, n.3, p. 47-54, 2000.
- GUEYMARD, C.A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: Detailed theoretical performance assessment. **Solar Energy**, v. 74, p. 355-379, 2003.
- KERR, A.; TABONY, R. Comparison of sunshine recorded by Campbell-Stokes and automatic sensors. **Weather**, v. 59(2), p. 90-95, 2004.
- PAINTER, H.E. The performance of a Campbell-Stokes sunshine recorder compared with a simultaneous record of normal incidence irradiance. **Meteorol. Mag.**, v. 110, p. 102-109, 1981.
- PORFIRIO, A.C.S.; CEBALLOS, J.C.; SOUZA, J.L.; RODRIGUES, M.L. Uma análise da insolação diária estimada por heliógrafo, pireliômetro equivalente e satélite em Maceió, AL. *In*: XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Guarapari, 2011.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Dependence on threshold solar irradiance of measured sunshine duration (K. Dehne). Papers Presented at the Third WMO Technical Conference on Instruments and Methods of Observation (TECIMO III). **Instruments and Observing Methods Report No. 22**, WMO/TD-No. 50, Geneva, p. 263-271, 1985.