

IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÉDIA HORÁRIA MENSAL (H_g^h) COM MODELOS EMPÍRICOS BASEADOS NA TEMPERATURA DO AR PARA MACEIÓ E CORURIFE/ALAGOAS – BRASIL

Cícero Manoel dos Santos – ciceromanoel2007@gmail.com

José Leonaldo de Souza – leonaldojs@yahoo.com.br

Ricardo Araújo Ferreira Junior – ricardo_ceca@hotmail.com

Guilherme Bastos Lyra – gbastoslyra@yahoo.com.br

Universidade Federal de Alagoas, Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar

Chigeru Tiba – tiba@ufpe.br

Rinaldo Oliveira de Melo – rinaldoom@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear – Grupo FAE

Resumo. Neste estudo quatro modelos empíricos, com a temperatura máxima e mínima do ar como variável de entrada, são ajustados para estimar a irradiação solar global média horária mensal (H_g^h) nas regiões de Maceió ($10^{\circ}01'29,1''S$; $36^{\circ}16'29,1''W$ e 127m) e Coruripe ($9^{\circ}28'29,1''S$; $35^{\circ}49'43,6''W$ e 108,7m). Na validação dos modelos foram utilizados dados meteorológicos (temperatura do ar) e solarimétricos (H_g^h) obtidos no período de 2007 à 2009. A irradiação solar global média horária mensal estimada (H_{ge}^h) a partir dos modelos foi comparada com valores de H_g^h utilizando os indicativos estatísticos: média dos desvios (med), desvio padrão da população de desvios (dpp), índice de concordância de Willmott (d) e o Teste-t estatístico. Os coeficientes ajustados mostraram ser dependentes da região e do mês em estudo. O coeficiente β_1 dos modelos 1 (Hargreaves & Samani, 1982) e 2 (Annandale et al., 2002) indicaram o mesmo padrão mensal, em ambas regiões. Os coeficientes β_1 e β_2 dos modelos 3 (Hargreaves et al., 1985) e 4 (Hunt et al., 1998) não apresentaram padrão mensal. Para região de Maceió a melhor estimativa foi obtida com o modelo 1, indicando “d” variando de 0,88 à 0,99, mostrando não existir diferença significativa a 1%. Na região de Coruripe o modelo 3 foi o melhor que estimou H_g^h , com dpp variando de 0,11 a 0,42 MJm⁻². Estes resultados mostram a eficiência dos modelos empíricos em estimar H_g^h .

Palavras-chave: Irradiação Solar Global Média Horária Mensal, Modelos Empíricos, Modelagem.

1. INTRODUÇÃO

A irradiância solar global (R_g) é variável de grande importância em diversas áreas do conhecimento, com destaque para Agricultura, Engenharia, Climatologia e Energia Renovável. A quantidade total de R_g que incide na superfície terrestre pode ser contabilizada diretamente ou indiretamente. Diretamente é obtida a partir de medidas realizadas com instrumentos operacionais denominados de piranômetros, instalados em estações (meteorológicas ou solarimétricas) de superfície. Indiretamente ocorre por estimativa, em geral utilizando-se modelos empíricos teoricamente ajustáveis em regiões com diferentes zonas climáticas. Estes modelos levam em considerações variáveis meteorológicas comumente medidas em estações meteorológicas – temperatura do ar, velocidade do vento, precipitação, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, duração do brilho solar. A disparidade entre as estações que observam as variáveis meteorológicas com a relação a R_g é ocasionada pelo elevado custo de aquisição, calibração e manutenção dos sensores solarimétricos (radiômetros). Segundo Thornton & Running (1999) globalmente a relação entre as estações de observações de R_g e as que observam a temperatura do ar, por exemplo, não pode ser tão baixa quanto 1:500. No Brasil Tiba et al., (2001) fizeram um levantamento das informações solarimétricas terrestres existentes, e identificaram para a maioria das localidades brasileira a escassez de informações solares, justificado tanto pelo custo de aquisição e manutenção dos equipamentos, quanto pela extensão territorial brasileira. Em algumas regiões do Estado de Alagoas – Brasil, modelos empíricos que fazem o uso de dados meteorológicos, como temperatura do ar, ainda não foram avaliados para quantificar e qualificar o grau de confiabilidade de estimativa horária ou se são aplicáveis. Na região de Maceió, Souza et al., (2005) analisaram em escala horária, diária e mensal a evolução da irradiação solar global incidente. Diante das considerações, o presente trabalho objetiva estimar a irradiação solar global média horária mensal (H_g^h) nas regiões de Maceió e Coruripe (localizadas no Litoral do Estado de Alagoas – Brasil) com o uso de modelos empíricos que utilizam a temperatura do ar (máxima e mínima) como variável de entrada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizaram-se dados meteorológicos de temperatura do ar e irradiância solar global (R_g), obtidos em estações solarimétricas automáticas localizadas na região de Maceió ($10^{\circ}01'29,1''S$;

36°16'29,1"W e 127m) e Coruripe (9°28'29,1"S; 35°49'43,6"W e 108,7m), no período de 2007 à 2009. A região de Maceió apresenta clima do tipo B1A'sw2, caracterizado por ser úmido (B1), Megatérmico (A') com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2), segundo a classificação de Thornthwaite-Mather. Possuindo uma precipitação e temperatura média anual de 1817.6 mm e 25.4 °C, respectivamente. No período de abril a agosto ocorrem 69,0% da chuva esperada para o ano inteiro. O clima da região de Coruripe é do tipo C2A'sw2, caracterizado por ser Subúmido (C2), Megatérmico (A') com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2), segundo a classificação de Thornthwaite-Mather. Possuindo uma precipitação e temperatura média anual de 1563.1 mm e 26.1°C, respectivamente (Santos, 2012). No período de abril a agosto ocorrem 66,0% da chuva esperada para o ano inteiro. Os dados de R_g foram medidos por piranômetros da Eppley, enquanto a temperatura do ar pelo sensor HMP45C – Vaisala Inc. A aquisição e armazenamento dos dados foram utilizando Datalogger da Campbell modelo CR1000, ajustado para guardar médias a cada minuto. Os dados observados são transferidos para um microcomputador e posteriormente armazenados em planilhas eletrônicas. Dados duvidosos ou com falhas foram removidos, na estação de Maceió foi verificado falhas para 3 dias. A estação de Coruripe mostrou dados duvidosos para 37 dias (4,34%) de todo total. Os dados de R_g obtidos foram integrados, para obter a irradiação solar global média horária mensal (H_g^h), conforme Eq. 1 e Eq. 2,

$$H_g^h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_g^h \quad (1)$$

$$h_g^h = \int_{t_0}^{t_f} I_g^h(t) dt \quad (2)$$

em que: N o número de dias do mês para a hora em análise, h_g^h a irradiação solar global horária, t_0 a hora inicial e t_f a hora final. A irradiação solar global média horária mensal (H_g^h) (MJm^{-2}) foi calculada a partir da média de todos os valores horários da irradiância solar global horária (I_g^h) (Wm^{-2}). Para um dia completo foi considerado onze valores horários integrados de I_g^h , ou seja, valores compreendidos entre 06h00min às 16h59min. Baseada na suposição de que a diferença entre a temperatura diária do ar máxima e mínima fornece indicação geral de nebulosidade, Hargreaves & Samani (1982) propuseram a estimativa da irradiação solar global diária (H_g^d) em função da irradiação solar global diária que chega ao topo da atmosfera (H_0^d) e da diferença entre a temperatura do ar máxima e mínima diária ($\Delta T(^{\circ}C)$) (Eq. 3 – modelo 1). Posteriormente o modelo foi modificado por outros autores Annandale *et al.*, (2002) (Eq. 4 – modelo 2), Hargreaves *et al.*, (1985) (Eq. 5 – modelo 3) e Hunt *et al.*, (1998) (Eq. 6 – modelo 4). Foi adicionado o índice h sobrescrito em H_g e H_0 , para indicar que os modelos serão avaliados em escala horária.

$$\frac{H_g^h}{H_0^h} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\frac{H_g^h}{H_0^h} = \beta_1 (1 + 2,7 \times 10^{-5} \times Altitude) (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\frac{H_g^h}{H_0^h} = \left(\beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \beta_2 \right) \quad (5)$$

$$\frac{H_g^h}{H_0^h} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \frac{\beta_2}{H_0^h} \quad (6)$$

em que β_1 e β_2 são coeficientes empíricos a serem ajustados com dados locais. Para obtenção dos coeficientes dos modelos ajustados, foram utilizados os dados de 2007 e 2008, e para validação foram usados os dados de 2009. No ajuste dos coeficientes foi elaborado um programa tendo os modelos e as condições de contornos necessárias nele inseridas. A irradiância solar global que chega ao topo da atmosfera (R_0) (Wm^{-2}) foi obtida em função da constante solar ($S_0 = 1367 Wm^{-2}$), da excentricidade do eixo da Terra (E_0), da latitude local (φ), da declinação (δ) e do ângulo horário solar (ω), de acordo com Iqbal (1983). A irradiação solar global média horária mensal que chega ao topo da atmosfera (H_0^h) (MJm^{-2}), foi obtida de R_0 , com integrações semelhantes as Eqs. 1 e 2. Os coeficientes gerados foram inseridos nos modelos, e em seguida realizou-se a estimativa. A estatística foi desenvolvida com a geração dos gráficos por intermédio do programa estatístico “SoftwareTM Microcal Origin 6.0[®]”. A amplitude térmica foi obtida da seguinte relação (Eq. 7).

$$\Delta T = T_{\max}(i) - T_{\min}(i) \quad (7)$$

em que, ΔT é a variação horária da temperatura do ar ($^{\circ}C$) da hora; $T_{\max}(i)$ e $T_{\min}(i)$ as temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}C$) da hora (i), respectivamente. Para a verificação do desempenho dos modelos foram utilizados alguns índices

estatísticos para medidas de erros e avaliação de variação, tais como: média dos desvios (med) (Eq. 8) (Ceballos *et al.*, 2010), desvio padrão da população de desvios (dpp) (Eq. 9) (Ceballos *et al.*, 2010), índice de concordância de Willmott (d) (Eq. 10) (Willmott, 1981) e o Teste-t estatístico (David *et al.*, 2008), descritos abaixo:

$$med = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (e_i - o_i) \quad (8)$$

$$dpp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P - \bar{P})^2}{(N' - 1)}} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (e_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^{N'} (|e_i - \bar{o}_i| + |o_i - \bar{o}_i|)^2} \quad (10)$$

em que: e_i representa os valores estimados, o_i os valores observados, \bar{e}_i a média dos valores estimados, \bar{o}_i a média dos valores observados, P é o desvio entre os valores observados e estimados, \bar{P} é a média dos desvios e N' o número de dados. O Teste - t permite que modelos sejam comparados e, ao mesmo tempo indica se a estimativa é significativa ou não. Para determinar se um modelo é estatisticamente significativo, o valor absoluto do t calculado deve ser menor que o valor t crítico, obtido a partir de padrão de quadros estatísticos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Coeficientes locais para estimativa da irradiação solar global média horária mensal

Os coeficientes gerados pelos modelos, com uso da média horária mensal da temperatura do ar (ΔT), são apresentados na Tab.1. O regime de temperatura adotado não teve efeito significativo sobre a calibração do modelo 1. Os valores encontrados para β_1 do modelo 1 para região de Maceió, gerou poucas variações no decorrer dos meses (18,18%), apresentando valor mínimo (0,45) para maio e máximo (0,55) em abril, não indicando padrão anual. Os coeficientes encontrados para modelo 2, que possuem a altitude como fator de correção, não diferiram dos obtidos com o modelo 1, tanto na região de Maceió quanto em Coruripe. Encontrou-se diferença de 45,35% entre máximo de 0,56 no mês de novembro para a região de Maceió e o mínimo de 0,31 no mês de fevereiro para a região de Coruripe. Os coeficientes dos modelos 1 e 2 indicaram ser significativos a 1%. Hargreaves & Samani (1982), Allen *et al.*, (1998) e Annandale *et al.*, (2002) propuseram para o modelo 1 valor fixo de $\beta_1 = 0,19$ para regiões costeiras. De acordo com Hargreaves & Samani (1982) regiões costeiras são locais próximos a um grande corpo de água. Os padrões dos coeficientes horários diferem do indicado pelos autores, justificado pelo uso diferente de escala de tempo para o estudo. Enquanto os autores propuseram o coeficiente para ser usado com dados diários, na calibração local utilizaram-se dados médios horários. Desse modo, a hipótese de utilizar β_1 fixo no modelo original de Hargreaves & Samani (1982) (modelo 1) tem que ser avaliada cuidadosamente, principalmente quando utiliza intervalos de tempos diferentes (horário, diário, mensal e anual).

Os coeficientes gerados pelos modelos 3 e 4 modificados do modelo original de Hargreaves & Samani (1982) não apresentaram um padrão específico. Os coeficientes β_1 e β_2 dos modelos 3 e 4 apresentaram valores com discrepâncias entre alguns regiões, em Coruripe β_1 e β_2 do modelo 4 foram positivos, enquanto verificou-se na região de Maceió, β_2 negativo em janeiro. Por sua vez, o coeficiente β_2 dos modelos 3 apresentou padrão negativo, principalmente para a estação seca na região de Maceió. Foram encontrados valores negativos de β_1 do modelo 3 nos meses de maio e julho, na região de Maceió. Enquanto valores negativos de β_2 , do modelo 3, foram observados nos meses de abril, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro. De maneira geral, todos os coeficientes gerados não apresentaram nenhum padrão anual para as regiões estudadas. Tais divergências podem ser explicadas pelas variações locais e sazonais da nebulosidade, que decorre das alterações periódicas da dinâmica atmosférica (Almorox *et al.*, 2005). Em geral, para as regiões de Maceió e Coruripe, os coeficientes β_1 e β_2 do modelo 3 indicaram não ser significativo. Observa-se existir significância nos coeficientes β_1 dos meses de outubro e dezembro em Maceió e outubro em Coruripe. Enquanto o coeficiente β_2 mostrou ser significativo a 1% no mês de março em Coruripe. Os coeficientes β_1 do modelo 4 nas regiões em estudo, indicaram não ser significativos, enquanto β_2 mostram ser significativos, exceto no mês de outubro para Coruripe. Chen *et al.*, (2004), em 48 estações na china, destacou que o coeficiente β_1 do modelo 3, em escala diária, variou de 0,10 a 0,29, com média de 0,19, enquanto o coeficiente β_2 variou de -0,41 até 0,24 com média de 0,13. Ajustando o modelo 3 para a região de Mossoró, Melo (2009) identificou que os coeficientes gerados variaram durante o ano, com máximo de ($\beta_1 = 0,214$) no mês de abril e mínimo de ($\beta_1 = 0,007$) para novembro, indicando que não houve nenhum padrão nos coeficientes ajustados. O modelo de Allen (1995), modificado do original de Hargreaves & Samani (1982), produziu em Mossoró valores de β_1 em um intervalo distinto dos encontrados para as regiões de Alagoas. O

coeficiente β_1 encontrados para o modelo 1 nas regiões de Maceió e Coruripe não apresentou nenhum padrão para a estação chuvosa (abril a agosto) nem para a estação seca (setembro a março).

Tabela 1 - Coeficientes mensais e médias dos desvios padrões (<DP>) dos modelos, para Maceió e Coruripe, com uso de ΔT_1 . *significativo a 1% **não significativo

Maceió						
Modelos	1	2	3		4	
Mês\ Coeficientes	β_1	β_1	β_1	β_2	β_1	β_2
Janeiro	0,52*	0,51*	0,50**	0,03**	0,52**	-0,01*
Fevereiro	0,49*	0,49*	0,47**	0,02**	0,49**	0,02*
Março	0,49*	0,49*	0,39**	0,12**	0,44**	0,15*
Abril	0,55*	0,55*	0,65**	-0,11**	0,41**	0,35*
Maio	0,45*	0,45*	-0,55**	1,09**	0,32**	0,26*
Junho	0,48*	0,48*	0,09**	0,44**	0,35**	0,24*
Julho	0,47*	0,47*	-0,13**	0,68**	0,38**	0,17*
Agosto	0,46*	0,46*	0,55**	-0,11**	0,36**	0,23*
Setembro	0,52*	0,52*	0,90**	-0,45**	0,41**	0,28*
Outubro	0,51*	0,51*	1,41*	-1,11**	0,38**	0,39*
Novembro	0,56*	0,56*	1,02**	-0,55**	0,47**	0,29*
Dezembro	0,53*	0,53*	0,95*	-0,51**	0,48**	0,17*
<DP> (\pm)	0,03	0,03	0,29	0,34	0,04	0,07
Coruripe						
Modelos	1	2	3		4	
Mês\ Coeficientes	β_1	β_1	β_1	β_2	β_1	β_2
Janeiro	0,42*	0,41*	0,35**	0,09**	0,40**	0,05*
Fevereiro	0,31*	0,31*	0,05**	0,46**	0,28**	0,12*
Março	0,43*	0,43*	-0,16**	0,77*	0,33**	0,33*
Abril	0,50*	0,50*	0,83**	-0,39**	0,40**	0,24*
Maio	0,44*	0,43*	0,54**	-0,12**	0,33**	0,20*
Junho	0,47*	0,47*	1,33**	-1,04**	0,35**	0,20*
Julho	0,43*	0,43*	0,66**	-0,30**	0,36**	0,12*
Agosto	--	--	--	--	--	--
Setembro	0,44*	0,44*	0,34**	0,13**	0,36**	0,22*
Outubro	0,40*	0,40*	0,64*	-0,30**	0,32**	0,25**
Novembro	0,48*	0,48*	0,60**	-0,17**	0,40**	0,29*
Dezembro	0,44*	0,44*	0,63**	-0,26**	0,39**	0,18*
<DP> (\pm)	0,03	0,03	0,25	0,31	0,03	0,08

3.2 Estimativa da irradiação solar global média horária mensal

As Figs. 1 (a, b, c, d, e, f) mostram a variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada (H_g^h) e estimada (H_{ge}^h) pelos modelos empíricos, que melhor estimaram nas regiões de Maceió e Coruripe. Observa-se uma grande semelhança entre a distribuição das curvas da variação anual de H_g^h e H_{ge}^h em todas as regiões. Menores picos de irradiação solar global são observados para os meses compreendidos entre maio e setembro, correspondente a estação chuvosa das regiões, período que ocorre aumento de dias nublados com maior frequência. O aumento de nuvens reduz significativamente a irradiação solar direta. Isto é ocasionado pela mudança de posição do sol durante o ano. Tanto no período seco quanto no período chuvoso nos locais de estudo, existe considerável simetria das curvas caracterizada pelo ciclo anual do sol, já identificada por Whillier [apud (Melo, 2009)]. Nas Figs. 1 (a, b, c, d, e, f) nota-se que a evolução diária de H_{ge}^h e H_g^h apresenta uma variação quase simétrica do nascer do sol até o meio dia e do meio

dia até ao pôr do sol. Segundo Spokas & Forcela (2006), este aspecto está ligado à variação diária da radiação com o ângulo de incidência.

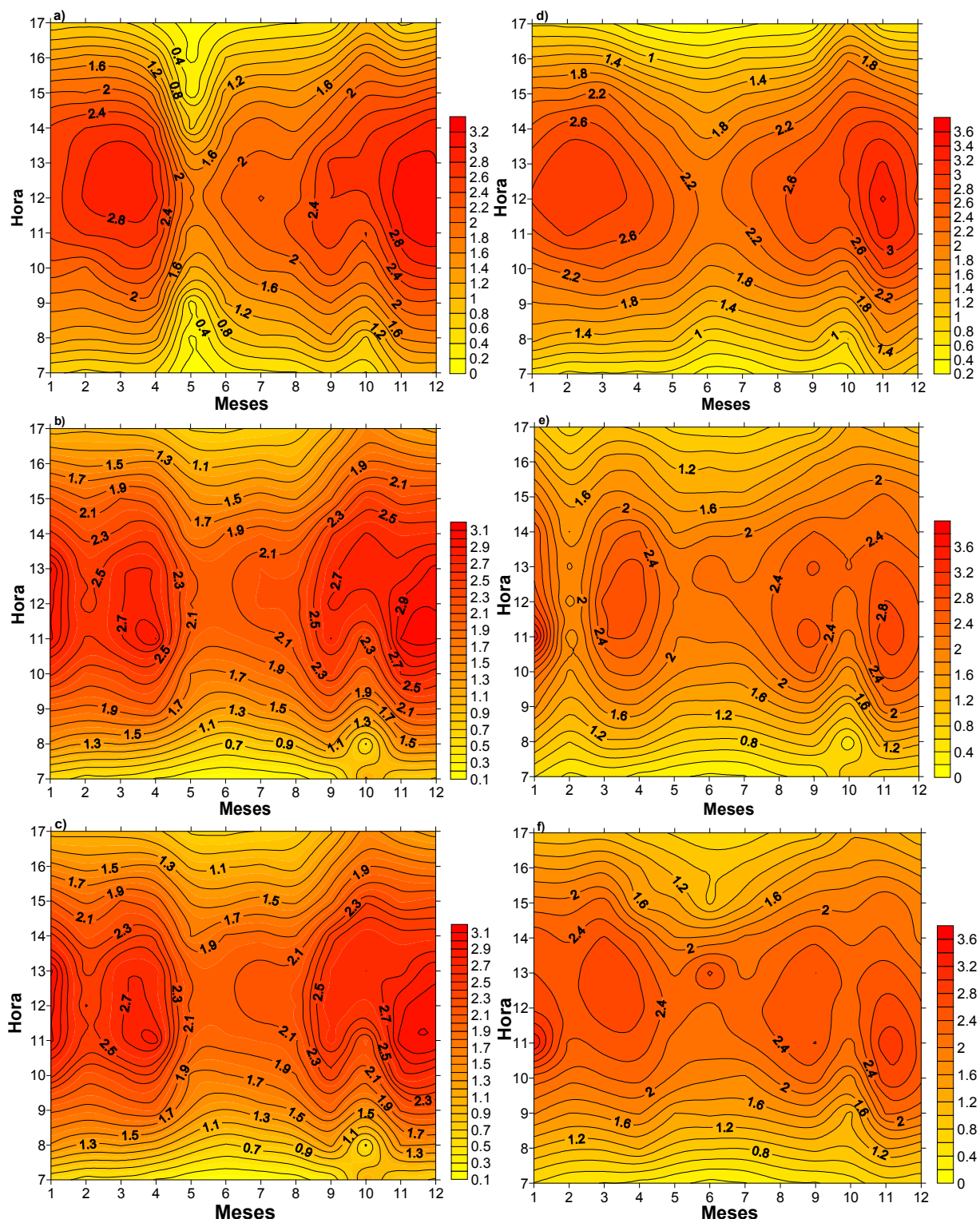


Figura 1. Variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada (H_g^h) e estimada (H_{ge}^h) pelos modelos que melhor estimaram nas regiões de Maceió e Coruripe. Sendo: a) H_g^h na região de Maceió, b) H_{ge}^h pelo modelo 1 na região de Maceió, c) H_{ge}^h pelo modelo 4 na região de Maceió, d) H_g^h na região de Palmeira dos Índios, e) H_g^h pelo modelo 1 na região de Palmeira dos Índios e f) H_{ge}^h pelo modelo 3 na região de Palmeira dos Índios.

O med, dpp e índice de Willmontt entre H_g^h e H_{ge}^h com os modelos empíricos que melhor estimaram são mostrados na Tab. 1. Em geral, menores valores de dpp são verificados para a estação chuvosa e picos maiores para o período seco, isto pode ser ocasionado pela menor incidência de irradiação solar neste período. Em média para região de Maceió o modelo 1 apresentou menor dpp ($0,24 \text{ MJm}^{-2}$) e o modelo 4 maiores ($0,24 \text{ MJm}^{-2}$). O mês de novembro

mostrou com maior frequência elevado valor de dpp médio de $(0,40 \text{ MJm}^{-2})$ com o modelo 4, junho $(0,16 \text{ a } 0,21 \text{ MJm}^{-2})$ e julho $(0,16 \text{ a } 0,20 \text{ MJm}^{-2})$ menores índices. Para região de Coruripe o modelo 1 indicou ddp médio de $0,26 \text{ MJm}^{-2}$, com máximo $(0,42 \text{ MJm}^{-2})$ em Fevereiro e mínimo $(0,10 \text{ MJm}^{-2})$ em Agosto. Enquanto o modelo 3 mostrou amplitude anual de $0,31 \text{ MJm}^{-2}$, oriundo da diferença entre o máximo $(0,42 \text{ MJm}^{-2})$ em e mínimo $(0,11 \text{ MJm}^{-2})$ no mês de agosto.

O modelo 1 melhor estimou H_g^h , para a região de Maceió. Observa-se superestimativa (ver med - Tab. 1) nos meses de janeiro $(0,28 \text{ MJm}^{-2})$, abril $(0,12 \text{ MJm}^{-2})$, maio $(0,71 \text{ MJm}^{-2})$, junho $(0,11 \text{ MJm}^{-2})$, julho $(0,06 \text{ MJm}^{-2})$, agosto $(0,07 \text{ MJm}^{-2})$, setembro $(0,17 \text{ MJm}^{-2})$, outubro $(0,17 \text{ MJm}^{-2})$ e novembro $(0,05 \text{ MJm}^{-2})$, e subestimativa nos demais. De acordo com Spokas & Forcela (2006) a superestimativa da H_g^d para dias secos e úmidos são afetadas através da influência na cobertura de nuvens. Isto se atribui aos dias parcialmente nublados sem precipitação, contaminação do ar (aerossóis e poeira). Os índices de concordância “d” entre a H_{gc}^h e H_g^h ficaram compreendidos entre 0,83 à 0,99 com o modelo 1 e 0,88 a 0,99 com o modelo 4. O modelo 1 mostrou elevada concordância entre os valores observados e medidos, representando a eficiência, deste em estimar valores de H_g^h com bons ajustes. O teste t avaliado para o nível de significância de 5% indicou que os dados estimados pelo modelo 1 para Maceió ($t = 1,24 < t_{0,05}$) não diferem estatisticamente dos observados.

Na região de Coruripe, o modelo 3, foi o que melhor estimou valores de H_g^h para o índice de concordância de Willmott foram encontrados elevados valores compreendidos entre 0,90 e 0,99, com média anual de 0,96. O modelo 1 indicou maiores flutuações para d, com mínima de 0,72 no mês de fevereiro e máxima de 0,99 nos meses de julho e agosto. Com o modelo 3 foi verificado valor média anual de dpp $0,26 \text{ MJm}^{-2}$, mostrando máximo $0,42 \text{ MJm}^{-2}$ no mês de outubro e mínimo de $0,11 \text{ MJm}^{-2}$ em agosto. Observa-se subestimativa (ver med Tab. 1) nos meses de fevereiro $(0,20 \text{ MJm}^{-2})$, março $(0,05 \text{ MJm}^{-2})$, maio $(0,11 \text{ MJm}^{-2})$, julho $(0,04 \text{ MJm}^{-2})$, outubro $(0,29 \text{ MJm}^{-2})$, novembro $(0,22 \text{ MJm}^{-2})$ e dezembro $(0,16 \text{ MJm}^{-2})$, e superestimativa nos demais.

Tabela 2. Indicativos estatísticos para os modelos que melhor estimaram H_g^h para Maceió e Coruripe.

MACEIÓ						
Mês	Modelo 1			Modelo 4		
	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d
Janeiro	0,28	0,21	0,95	0,31	0,22	0,94
Fevereiro	-0,06	0,26	0,97	-0,07	0,27	0,96
Março	-0,04	0,22	0,98	-0,08	0,26	0,97
Abril	0,12	0,26	0,97	-0,07	0,35	0,94
Maio	0,71	0,36	0,83	0,57	0,37	0,88
Junho	0,11	0,16	0,98	-0,03	0,21	0,98
Julho	0,06	0,16	0,99	-0,06	0,20	0,98
Agosto	0,07	0,16	0,99	-0,02	0,20	0,98
Setembro	0,17	0,24	0,96	0,00	0,29	0,96
Outubro	0,17	0,27	0,95	0,07	0,33	0,93
Novembro	0,05	0,34	0,96	-0,04	0,40	0,94
Dezembro	-0,05	0,26	0,98	-0,12	0,29	0,97
CORURIPE						
Mês	Modelo 1			Modelo 3		
	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d	med (MJm^{-2})	dpp (MJm^{-2})	d
Janeiro	0,13	0,35	0,94	0,10	0,30	0,96
Fevereiro	-0,71	0,42	0,72	-0,20	0,24	0,96
Março	-0,17	0,23	0,96	-0,05	0,22	0,98
Abril	0,06	0,23	0,98	0,01	0,23	0,98
Maio	-0,17	0,27	0,96	-0,11	0,25	0,97
Junho	0,11	0,20	0,98	0,09	0,28	0,97
Julho	-0,07	0,16	0,99	-0,04	0,16	0,99
Agosto	0,13	0,10	0,99	0,12	0,11	0,99
Setembro	0,04	0,21	0,98	0,00	0,23	0,98
Outubro	-0,25	0,32	0,92	-0,29	0,34	0,90
Novembro	-0,19	0,40	0,94	-0,22	0,42	0,92
Dezembro	-0,07	0,26	0,97	-0,16	0,31	0,94

A Fig. 2 mostra a variação da irradiação solar média horária mensal no topo da atmosfera (H_o^h), H_g^h e H_{ge}^h pelos modelos empíricos que melhor estimaram, em Maceió e Coruripe. Na região de Maceió, o modelo 1 superestimou para todos valores da H_g^h no mês de Maio. Enquanto o modelo 4 superestimou a irradiação durante o período matutino e vespertino (pontos com valores altos de irradiação) e subestimando perto do meio-dia (pontos com valores de irradiação baixos). Para região de Coruripe o modelo 1 subestimou os valores observados durante todo dia, superestimando no final da tarde. Comportamento similar foi observado com o modelo 3, subestimativa durante o dia, superestimando no final da tarde. Spokas & Forcela (2006) destacaram que quando há diferença significativa no desempenho de modelos em locais com elevadas atitudes, a explicação mais coerente é que a massa de ar, água precipitável e a turbidez em locais altos são relativamente pequenas em comparação com locais de baixa altitude e, portanto, a transmitância radiativa é relativamente alta. Isto indica que a dispersão atmosférica é uma incerteza nesses casos necessitando de melhorias da modelagem nos locais com a inclusão do fator elevação. Altitudes mais elevadas têm menos coluna atmosférica para a radiação solar atravessar (Spokas & Forcela, 2006).

Muito embora tenham sido propostos para estimar a irradiação solar diária ou mensal, alguns destes modelos foram capazes de estimar H_g^h . Observou-se que ao simularem a irradiação ocorreram subestimações e superestimações, principalmente no período chuvoso. A razão para a superestimativa é devido ao aumento da reflexão da radiação solar a partir de cobertura de nuvens ou um papel decrescente de dispersão atmosférica devido ao menor ângulo de declinação solar, verificado por Spokas & Forcela (2006). Os resultados de bons desempenhos dos modelos para H_g^h encontrada para Maceió e Coruripe se assemelham aos resultados de outros autores, como por exemplo, Kaplanis (2006) que utilizou apenas uma medida de manhã e Yang *et al.*, (2006) com o uso do fator de transmitância atmosférica.

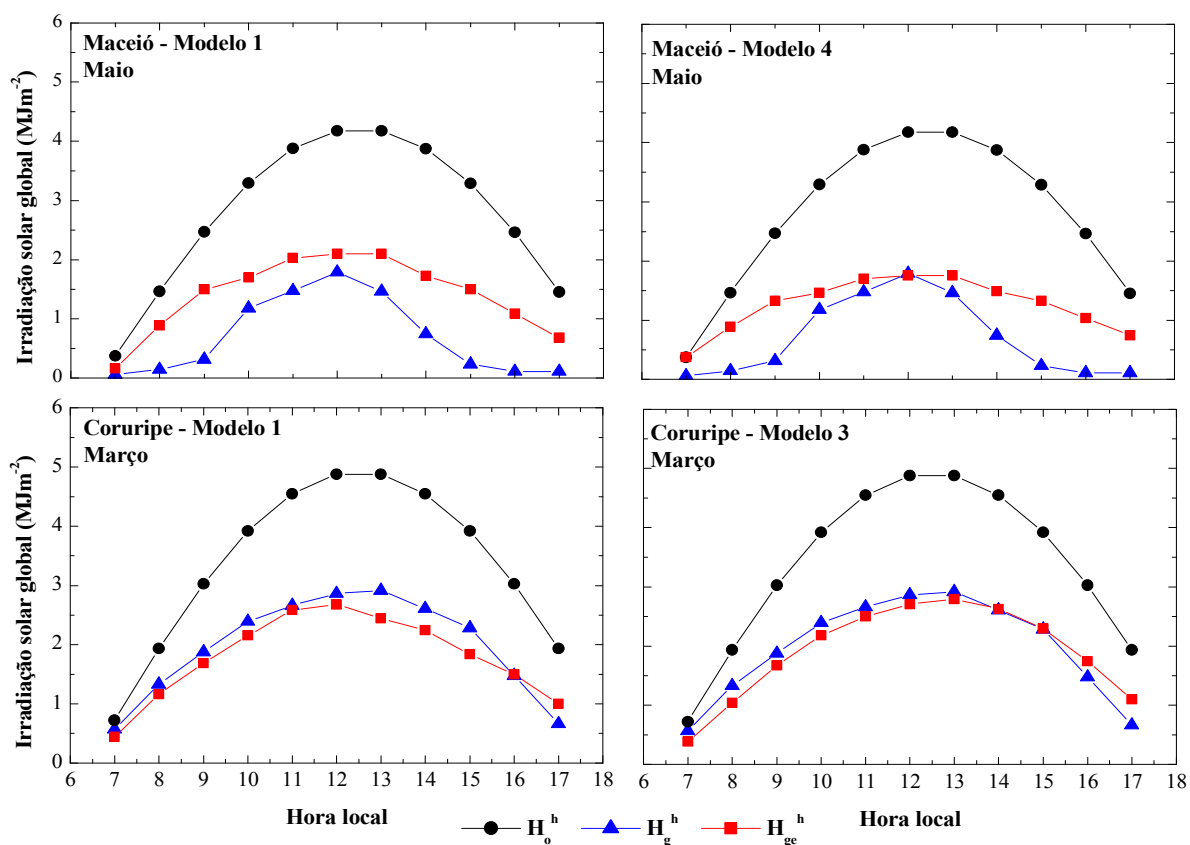


Figura 2 - Variação da irradiação solar média horária mensal no topo da atmosfera (H_o^h), observada (H_g^h) e estimada (H_{ge}^h) pelos modelos empíricos que melhor estimaram para região de Maceió e Coruripe.

4. CONCLUSÃO

Os valores de H_g^h estimados pelos modelos acompanharam bem a variabilidade sazonal dos dados observados. Para a região de Maceió a melhor estimativa foi obtida com o modelo 1, indicando dpp médio de 0,24 MJm⁻². Na região de Coruripe, o modelo 3 mostrou melhor estimativa, mostrando dpp e d médio de 0,26 MJm⁻² e 0,96, respectivamente. Apesar de terem sido propostos para estimar a irradiação solar global diária ou mensal, alguns destes modelos foram capazes de estimar H_g^h com bons ajustes.

Agradecimentos:

A CT-Hidro/CNPq 504068-03-2, CNPq-Universal 479143/2007-2, FAPEAL, CAPES, ELETROBRAS, INMET.

REFERÊNCIAS

- Allen, R., 1995. Evaluation of procedures of estimating mean solar radiation from air temperature, FAO, Rome.
- Allen, R.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO, Irrigation And Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 300p.
- Almorox, J; Benito, M.; Hontoria, C., 2005. Estimation of monthly Ångström – Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain, Renewable Energy, v. 30, p. 931 – 936.
- Annandale, J.G.; Jovanic, N. Z.; Benade, N.; Allen, R.G., 2002. Software for missing data error analysis of Penman–Monteith reference evapotranspiration, Irrigation Science, v.21, p.57–67.
- Ceballos, J. C.; Rodrigues, M. L.; Oliveira, L. M., 2010. Desempenho do modelo GL versão 1,2 época: Outubro 2010 – Dezembro 2010, Relatório Técnico 01/11 - RST-DSA.
- Chen, R.; Ersi, K.; Yang, J.; Lu, S.; Zhao, W., 2004. Validation of five models with measured daily data in China, Energy Conversion and Management, v.45, p.1759 – 1769.
- David, M. L.; Berenson, M. L.; Stephan, D., 2008. Estatística: Teoria e Aplicações, Editora LTC, 5 ° edição, Tradução Teresa Cristina Padilha de Souza, - [Reimpr.] – Rio de Janeiro, LTC, 2011, 752 páginas, + CD-ROM.
- Hargreaves, G.L.; Hargreaves, G.H; Riley, J.P., 1985. Irrigation water requirement for Senegal River Basin, Journal of Irrigation and Drain, Engineering, v.111, p.265-275.
- Hargreaves, G.L; Samani, Z. A., 1982. Estimating potential evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drain Engineering, v.108, p.225-230.
- Hunt, L.A.; Kucharb, L.; Swanton, C.J., 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modeling, Agricultural and Forest Meteorology. V.91, p. 293–300.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation, New York: Academic Press, 390p.
- Kaplanis, S. N., 2006. New methodologies to estimate the hourly global solar radiation: Comparisons with existing models, Renewable Energy, v.31, p.781–790.
- Melo, S. B. DE., 2009. Modelagem da irradiação solar global para a região de Mossoró – RN, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa.
- Santos, C., M., 2012. Irradiação solar global com diferentes modelos para Alagoas. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas.
- Souza, J. C.; Nicácio, R. M.; Moura, M. A. L., 2005. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil, Renewable Energy, v. 30, p. 1203-1220.
- Spokas, K.; Forcela, F., 2006. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data, Weed Science, v.54, p.184 – 189.
- Thorntwaite, C. W., Mather, J. R., 1955. The water balance, Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 104p, (Publications in Climatology, v.8, n.1).
- Thornton, P. E.; Running, S. W., 1999. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation, Agricultural and Forest Meteorology, v.93, p.211-228.
- Tiba, C.; Fraindenraich, N.; Grossi, H.; Lyra, F., 2001. Atlas solarimétrico para localidades brasileira, Editora Universitária, UFPE, Recife.
- Willmott, C. J., 1981. On the validation of models, Physical Geography, Delaware, v. 2, n. 2, p. 184-194.
- Yang, K.; Koike, T.; Ye, B., 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets, Agricultural and Forest Meteorology, v.137, p.43–55.

GLOBAL SOLAR IRRADIATION AVERAGE MONTHLY HOURS (H_g^h) WITH EMPIRICAL MODELS BASED ON AIR TEMPERATURE FOR MACEIÓ AND CORURIBE / ALAGOAS – BRAZIL

Abstract. In this study four empirical models, with the maximum and minimum air temperature as input variable, are adjusted to estimate the average hourly global solar irradiation monthly (H_g^h) in the regions of Maceió ($10^{\circ}01'29,1''S$, $36^{\circ}16'29,1''W$, 127m) and Coruribe ($9^{\circ}28'29,1''S$, $35^{\circ}49'43,6''W$ and 108.7 m). In the validation of the models were used meteorological data (air temperature) and solarimetric (H_g^h) obtained in the period 2007 to 2009. The average hourly global solar irradiation estimated monthly (H_{ge}^h) from the models were compared with values H_g^h using statistical indicators: average deviations (med), population standard deviation of deviations (dpp), index of agreement of Willmott (d) and t-test statistic. The adjusted coefficients were shown to be dependent on the region and the month in study. The coefficient β_1 the models 1 (Hargreaves & Samani, 1982) and 2 (Annandale et al., 2002) showed the same pattern monthly in both regions. The coefficients β_1 and β_2 of the models 3 (Hargreaves et al., 1985) and 4 (Hunt et al., 1998) did not present month. For the Maceió's region best estimate was obtained with model 1, indicating "d" ranging from 0,88 to 0,99, showing no significant difference at 1%. In the Coruribe's region the model 3 was the best we estimated H_g^h , with dpp ranging from 0,11 to 0,42 MJm^{-2} . These results show the efficiency of empirical models to estimate H_g^h .

Key words: Global Solar irradiation hourly average monthly, Empirical Models, Modeling.