

Universidade do Estado do Amazonas-UEA
Centro de Estudos Superiores de Tefé-CEST

José Wexson Goes Pereira¹

Israel Torres²

Avaliação de modelos para estimativa de radiação solar na cidade de Tefé.

Resumo: A radiação solar é um fator determinante sobre o comportamento climático global e os fenômenos meteorológicos, sendo os dados exigidos em muitas aplicações e nas diferentes áreas de estudos. A radiação solar representa a quantidade de energia que está disponível para os processos de evapotranspiração, fotossíntese e de aquecimento do ar e do solo, sendo um dos fatores que mais afeta a evapotranspiração e a produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho é avaliar a estimativa de radiação solar incidente na cidade de Tefé, através dos modelos de Donatelli & Campbell (1998) e Chen et al. (2004), que usam dados de temperatura máxima e mínima, radiação solar incidente na superfície (R_s) e radiação solar incidente no topo da atmosfera (R_o).

Palavras chave: radiação solar, fenômenos meteorológicos e modelos empíricos.

¹Acadêmico do curso de Licenciatura em Física pela Universidade do Estado do Amazonas UEA/CEST.
E-mail: zewexson@gmail.com

²Professor MSc do colegiado de Física da Universidade do Estado do Amazonas e Orientador do trabalho
– Estrada do Bexiga nº 1085, Jerusalém Tefé-AM: itorres@uea.edu.br

1. Introdução

O Sol, nossa fonte de luz e de vida, é a estrela mais próxima de nós e a que melhor conhecemos, sem ele a vida no planeta seria afetada de forma catastrófica e talvez não seria possível haver vida nele, nosso planeta diferente dos demais está em uma posição privilegiada no sistema solar para que a vida possa evoluir graças a energia que nos é fornecida pelo Sol. É devido a energia fornecida por ele que as plantas, os animais e os outros seres vivos sobrevivem e se multiplicam na Terra.

Desse modo é fácil perceber que o ser humano, assim como os outros seres vivos têm uma grande dependência com relação à energia, por esse motivo é que vários estudos são feitos com base nesse potencial energético quase “infinito” para aproveitar ao máximo esse recurso, além disso, essa energia oriunda do Sol facilita os processos fisiológicos dos seres vivos.

A radiação solar global (R_g) é uma das variáveis meteorológica mais importantes para se fazer diversos estudos, tais como: agrometeorologia, agricultura, mudanças climáticas, entre outros. Esta por sua vez, é a principal fonte de energia responsável pelos processos físicos e biológicos que acontecem na Terra, sendo elemento primordial para o processo de fotossíntese e, conseqüentemente, pela vida de todos os seres vivos no planeta. “Além disso, influência outros processos ecológicos e ambientais relacionados à temperatura do ar e do solo, afetando a transferência de calor por meio da evaporação e transpiração”. (SPOKAS & FORCELLA,2006).

Ao adentrar na atmosfera, a radiação solar encontra-se com outras partículas que se interagem, a partir desta interação grande parte desta radiação é espalhada em outras direções, ao modo que fica dividida em radiação solar difusa e radiação solar direta e a soma destas radiações dá como resultado a radiação solar global. Silva et al, 2012 afirma que:

A radiação solar global é considerada um fator meteorológico por que condiciona outras variáveis meteorológicas, notadamente a temperatura do ar e do solo, dos processos de evapotranspiração e dos modelos de simulação de crescimento e produtividade de uma cultura.

Com a facilidade que temos hoje em se obter diversos elementos meteorológicos, pois todos os dados são disponibilizados para diversos interesses e na busca por alternativas viáveis para solucionar dificuldades que surgem em tentar medir a radiação solar, pesquisadores como Hargreaves (1981) e Bristow & Campbell (1984) fizeram estudos nesta área afim de desenvolver modelos que usassem grandezas simples, que poderiam facilitar os cálculos.

De uma forma simples, a temperatura foi uma das grandezas que mais mostrou eficácia nos estudos dos modelos e com isso conseguiram fazer estimativas de radiação solar global usando apenas a temperatura, esses modelos por sua vez apresentavam boas estimativas, mas com algumas lacunas e por esse motivo esses modelos foram ao longo do tempo sendo modificados por outros autores na tentativa de melhorar os resultados.

No intuito de resolver a limitação da disponibilidade de dados de insolação, Hargreaves (1981) propôs um modelo simples para estimar R_s a partir da temperatura, o referido modelo serviu de base para novos modelos já propostos ao longo do tempo. Os modelos empíricos são as ferramentas mais adequadas para se estimar a radiação solar (Almorox 2009), e o uso destes modelos nos dão vantagem, pois usam dados meteorológicos que são de fácil obtenção.

Todavia, por mais simples que seja esse modelo proposto por Hargreaves (1981) tem-se algumas limitações, deste derivam outros modelos que são o foco deste trabalho.

2. Descrição dos Modelos

É notável que a radiação solar é de grande importância para diversos estudos, Trnka et al., 2007; Abraha & Savage, 2008 afirmam que:

Por se tratar do principal fator meteorológico, a radiação solar diária incidente em uma superfície horizontal (R_s) é de grande relevância em estudos ecológicos e ambientais, constituindo-se como principal fator condicionante da temperatura do ar, do solo, dos processos de evapotranspiração e dos modelos que simulam o crescimento e a produtividade de uma cultura.

Em razão da sua simplicidade, o modelo de (Ha) -HARGREAVES (1981) é bastante usado quando se tem dúvidas ou falta de dados na medição de radiação, por essa simplicidade e por ser um dos primeiros modelos propostos é de bom grado utilizá-lo ainda que pra fins comparativos.

A radiação solar incidente no modelo de Ha ($R_s = a \cdot \sqrt{\Delta T_1} \cdot R_a$) relaciona a raiz quadrada da diferença (ΔT_1) entre a temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e mínima do ar ($T_{m\acute{i}n}$) uma vez que o modelo referido apresenta apenas um coeficiente (a); modelos posteriores, como o de Chen et al. (2004) apresentam mais coeficientes.

Outras modificações foram feitas a partir do modelo inicial de (Ha), Chen et al (2004) propôs que a relação da radiação solar incidente poderia ser relacionada de maneira logarítmica com a diferença ente a temperatura máxima e mínima do dia (ΔT_l); já (D-C) DONATELLI & CAMPBELL (1998) propuseram uma equação na qual a radiação solar incidente é função

exponencial da razão entre ΔT_2 e ΔT_m . Onde ΔT_2 e ΔT_m são parâmetros associados à redução do efeito de sazonalidade da radiação solar incidente.

A Tabela1, abaixo, apresenta as equações empíricas utilizadas neste estudo: Donatelli & Campbell (1998) e Chen et al. (2004).

Tabela1- Resumo dos modelos avaliados para estimativa de radiação

| Modelo | Equação | Coefficientes | Fonte |
|--------|--|---------------|-----------------------------|
| D-C | $R_s = a. \left(1 - e^{-b \frac{\Delta T_2^c}{\Delta t_m}} \right) . R_o$ | a, b, c | DONATELLI & CAMPBELL (1998) |
| Ch-2 | $R_s = (a. \ln \Delta T_1 + b) . R_o$ | a, b | CHEN et al. (2004) |

Em que: R_s , radiação solar incidente na superfície (MJ m⁻² d⁻¹); R_o , radiação solar incidente no topo da atmosfera (MJ m⁻²d⁻¹); ΔT_1 , diferença entre a temperatura máxima e mínima do dia (°C); ΔT_2 , diferença entre a temperatura máxima e a média da mínima de dois dias consecutivos (°C); Δt_m , média mensal de ΔT_2 ; a, b e c, Coeficientes de calibração dos modelos empíricos (adimensionais).

Tais modelos já foram objetos de estudo em diversos locais e os coeficientes de cada modelo podem variar consideravelmente (ALMOROX et al., 2011; LIU et al., 2009).

Com base no exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar dois modelos empíricos de estimativa de radiação solar em cada mês dos anos 2017, 2018 e 2019, a partir de dados de temperatura do ar para a cidade de Tefé, localizada no interior do estado do Amazonas.

3. Material e Método

Para a realização deste estudo, utilizaram-se dados de temperatura máxima e mínima do dia e radiação solar no período de 2017 a 2019, obtidos em estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A coleta dos dados de radiação foi feita através de medidas diretas e também através dos modelos empíricos, esses modelos usam coeficientes que variam em cada região. Os dados foram inicialmente obtidos em intervalos diários, obtendo-se valores máximos ($T_{máx}$) e mínimos ($T_{mín}$) de temperatura e radiação solar incidente no topo da atmosfera (R_o).

Foram obtidos dados de latitude e longitude do município de Tefé a fim de melhor ajustar as estimativas da radiação solar na cidade. Para estimar a radiação solar extraterrestre R_o nos modelos, utilizou-se a seguinte expressão:

$$R_o = 37,6 \left(\frac{D}{d}\right)^2 [H(\text{sen}\phi)(\text{sen}\delta) + (\text{cos}\phi)(\text{cos}\delta)(\text{sen}H)] \quad \text{equação (1)}$$

Em que:

- ✚ D/d- distância relativa Terra-Sol, sendo d a distância média e D a distância real
- ✚ H- ângulo horário do nascer do Sol
- ✚ ϕ - latitude local
- ✚ δ - declinação solar

Para entender esse parâmetro H da equação, devemos entender o que é o fotoperíodo (N). Este é o intervalo de tempo entre o nascer e o pôr do Sol em um determinado dia, “devido a simetria da trajetória do Sol ao meio dia o fotoperíodo caracteriza a duração em horas de um dado dia”. (PEREIRA et al., 2002).

O fotoperíodo é calculado em função do dobro do horário do nascer do Sol:

$$N = \frac{2H}{15^\circ} \quad \text{equação(2)}$$

O valor de H está associado ao ângulo de incidência dos raios solares, que é chamado de ângulo zenital Z_n . Pode ser calculado como:

$$\text{cos}Z_n = \text{sen}\phi\text{sen}\delta + \text{cos}\delta\text{cos}\phi\text{cos}h \quad \text{equação (3)}$$

Em que h é o ângulo relacionado ao instante do dia para qual deseja conhecer o ângulo zenital, pode ser calculado da seguinte forma:

$$h = (\text{hora de interesse} - 12)(15^\circ) \quad \text{equação (4)}$$

Como é possível observar na equação 2, o fotoperíodo é dependente do ângulo horário do nascer do Sol, que por sua vez depende do ângulo zenital, no instante do nascer do Sol o ângulo zenital vale 90 graus e conseqüentemente $\text{cos}Z_n = 0$, assim a equação 3 pode ser reduzida a seguinte forma:

$$\text{cos}H = -\frac{(\text{sen}\phi\text{sen}\delta)}{(\text{cos}\phi\text{cos}\delta)} = -\text{tag}\phi\text{tag}\delta$$

Por fim, chegamos à conclusão que o ângulo horário do nascer do Sol pode ser calculado da seguinte forma:

$$H = \text{arcos}(-\text{tag}\phi.\text{tag}\delta)$$

✚ \emptyset - latitude local (-3,83°).

✚ δ - Esse parâmetro pode ser definido como sendo a posição angular do Sol, ao meio dia, em relação ao plano do equador.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[360 \frac{(NDA - 80)}{365} \right] \quad \text{equação (5)}$$

✚ $\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1 + 0,033 \cos (NDA 360/365)$ equação (6)

✚ NDA- número do dia do ano, varia de 1 a 366 com ano bissexto;

4. Resultados e Discursões

Com base nos modelos avaliados a fim de se medir a radiação solar no município de Tefé, percebe-se uma tendência de flutuações mensais ano após ano, tal comportamento parece refletir as tão conhecidas dinâmicas de enchente e vazante da região.

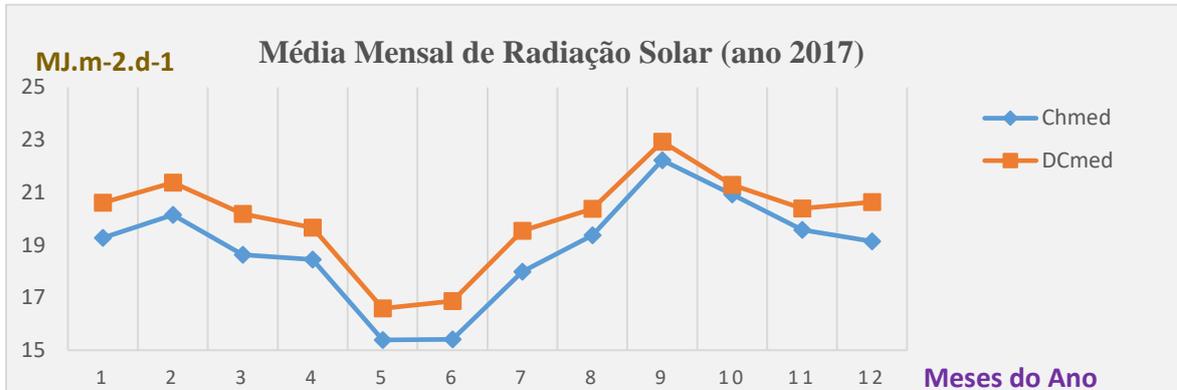
Durante o início do ano, por meados de fevereiro, começa a ocorrer um declínio da média de radiação solar com o ponto mínimo situado bem próximo aos meses de maio e junho – note aqui que este ponto mínimo coincide com o período de enchente, fenômeno conhecido de longa data dos habitantes da região, por vezes chamado de “cheia” no linguajar local. O que aparenta ser bem lógico, considerando que se a “incidência” solar diminui – é previsto que a evaporação também diminuirá; aumentado assim o nível das águas da região, daí: enchente.

Por outro lado, do início de julho até meados setembro, percebe-se uma grande ascendente nos gráficos, com ponto máximo em meados de setembro – note aqui que este ponto de máximo coincide com o período da vazante, fenômeno também conhecido de longa data pelos habitantes da região, a chamada “seca” no linguajar popular local. Mais uma vez, a lógica aqui parece apontar que com o aumento da radiação solar a evaporação também aumenta e com isso uma grande diminuição no nível das águas da região.

Podemos ainda apontar alguns indícios do fenômeno de “repiquete” - que é uma pequena alta (ou baixa) do nível das águas da região a depender da pluviometria local ao longo do rio Amazonas - entre os meses de outubro a janeiro; mas como tal fenômeno aparenta ser dependente de muitas outras variáveis não abordadas neste estudo, tais como: índices pluviométricos, umidade relativa, etc. Quando a incidência de radiação solar apresenta uma queda que pode levar a uma diminuição da evaporação das águas de rios e lagos da região.

Os gráficos a seguir mostram a média mensal de radiação estimada pelos modelos

Gráfico 1



Em geral, os meses de maio e junho coincidem com as estações chuvosas da região que colaboram com o fenômeno da cheia. Por outro lado, os meses de agosto, setembro e outubro correspondem ao período menos chuvoso da região, e conforme o gráfico acima os meses mais quentes do ano também (incidência de radiação é máxima).

Gráfico 2

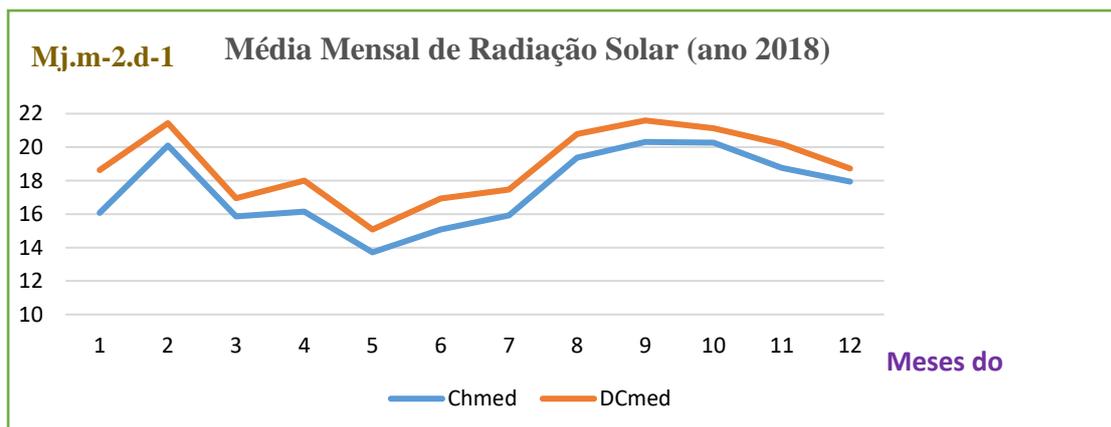
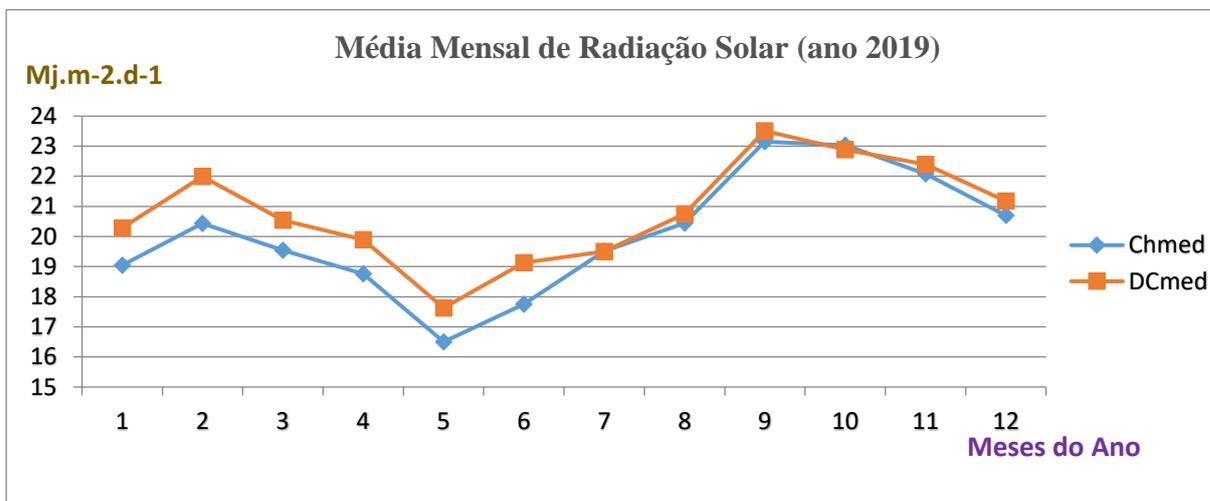


Gráfico 3



Os dados completos para o ano de 2020 se encontram indisponíveis no site do INMET até a escrita do presente trabalho monográfico. Os dados para alguns meses já se encontram disponibilizados, mas os modelos abordados parecem ser mais bem descritos com um número grande de dados, o modelo chegou ainda a ser aplicado para os seis primeiros meses do presente ano e aparentemente apontam um ano atípico (o que não estaria longe da verdade) e que seria excelente a fim de trabalhos futuros; mas vários outros fatores podem aumentar o erro associado à tais estimativas - e por esse motivo foram descartados do presente trabalho.

5. Conclusão

Ambos os modelos empíricos, ainda que simplórios quando comparados com modelos da área, apresentam resultados convincentes e próximos da realidade conhecida da região. Sobretudo no que tange aos fenômenos de vazante e de cheia da região. Outros modelos podem adicionados a fim de se investigar novas frentes fenomenológicas, como previsão de índices pluviométricos, umidade relativa, etc. Mas a complexidade de tais modelos mais coincide com trabalhos monográficos a um nível de pós-graduação, e por conta disto, foram aqui descartados. Mas ficam em aberto para trabalhos futuros, já que parece haver uma correlação com os fenômenos pluviométricos da região.

6. Referências

Abraha, M. G., Savage, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.148, p.401-416, 2008.

ALMOROX, J. et al. Models for obtaining daily global solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain). **Applied Energy**, v.88, p.1703-1709, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910004666>>. Acesso em: 10 jun. 2011. doi:10.1016/j.apenergy.2010.11.003.

ALMOROX, J. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. *Tübitak*, v.35, p.53-64, 2009. Disponível em: <<http://journals.tubitak.gov.tr/physics/issues/fiz-11-35-1/fiz-35-1-7-0912-20.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2011. doi: 10.3906/fiz-0912-20.

Bristow, K. L.; Campbell, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.31, p.159-166, 1984.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P.C. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba: Agropecuária.

SILVA, V.J.; SILVA, C.R.; Finzi, R.R.; DIAS, N.S. Métodos para estimar radiação solar na região noroeste de Minas Gerais. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.2, p.276-282, 2012.

SPOKAS, K.; FORCELLA, F. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. **Weed Science**, v.54, n.1, p.182-189, 2006.

Trnka, M.; Eitzinger, J.; Kapler, P.; Dubrovský, M.; Semerádová, D.; Zalud, Z.; Formayer, H. Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models. *Sensor*, v.7, p.2330-2362, 2007.