Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Modelos sazonais para radiação solar incidente na área rural de Dourados-MS

Seasonal models for net solar radiation in the countryside streat at Dourados-MS

Robson Leal da Silva [1], Marcelo Mendes Vieira [2]

[1] Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), Faculdade de Engenharia (FAEN) / Engenharia Mecânica & Engenharia de Energia, Rodovia MS-270 (Dourados-Itahum), km 12, Cidade Universitária, CEP: 79.804-970, Dourados-MS, Brasil. E-mail: robsonsilva@ufgd.edu.br. Fone: +55 (67) 8118-5763.
[2] Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)

Recebido em: 17/08/2015 Aceito em:24/04/2016

Resumo. Um modelo matemático contínuo pode auxiliar na previsão das características da radiação solar ($W.m^{-2}$) em determinada região, reduzindo a necessidade de medidas experimentais. Este trabalho tem como objetivo propor uma modelagem representativa e preditiva, para a radiação solar líquida em Dourados-MS, avaliando a sua intensidade, comportamento e mudanças sazonais. Dados brutos referentes ao período 2008-2011 foram obtidos por estação meteorológica localizada no campus da UFGD. A metodologia foi desenvolvida como parte do projeto de pesquisa para prospecção do potencial solar em Dourados e região, e utiliza funções polinomiais como modelo matemático para representação mensal e trimentral (sazonal) da radiação solar líquida. Os resultados representam o perfil de um dia típico para a variável meteorológica modelada, em diversos períodos de tempo. Destacaram-se as seguintes conclusões: i) Modelo apresenta desvio padrão reduzido no período de maiores valores para Rn (12h – 15h) e possui características de distribuição estatística de Gauss; ii) A modelagem matemática por meio de funções contínuas é capaz de representar as características de intensidade e comportamento da radiação solar líquida (R_n), para períodos mensais e trimestrais (sazonais), além de ser capaz boa previsão de comportamento futuro (2011); iii) A metodologia proposta, associada à análise estatística de R_n, mostra-se eficiente na parametrização das características locais da radiação solar incidente; iv) As características sazonais R_n indicam que os valores máximos são razoavelmente estáveis nos meses do 1º e 4º trimestres, porém são decrescentes nos meses do 2º e 3º trimestres e culminam em valores mínimos no mês de Julho.

Palavras-chave: modelagem matemática, distribuição estatística, variáveis meteorológicas

Abstract. The continuous mathematical model can assist in predicting the characteristics of solar radiation ($W.m^{-2}$) in a particular region, by reducing the need for experimental measurements. This paper aims to propose a representative, and predictive modeling, to the net solar radiation in Dourados-MS, assessing its intensity, behavior and seasonal changes. Raw data for the period 2008-2011 were obtained by meteorological wheater station located at UFGD campus. The methodology was developed as part of a research project for prospection of solar potential in Dourados and nearby cities, and uses polynomial functions as mathematical model to represent and polynomial trimentral (seasonal) of the net solar radiation. The results represent the profile of a typical day for the meteorological variable modeled in various periods of time. The main conclusions are: i) model features standard deviation reduced in the period of highest values for R_n (12h – 15h) and also features for Gauss statistical distribution; ii) the mathematical modelling by means of continuous functions is able to represent the intensity and behavior characteristics of net solar radiation (R_n), for monthly and quarterly periods (seasonal), besides being able of good forecast for future behavior (2011); iii) the methodology proposed, together with the statistical analysis of R_n, is efficient in the parameterization of local features for net solar radiation; iv) R_n seasonal features indicate that the maximum values are fairly stable in the months of the 1st and 4th quarter, but are decreasing in the 2nd and 3rd quarter and culminate in minimum values in July.

Key words: mathematical modeling, statistical distributions, weather variables

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Introdução

A energia solar medida por unidade de tempo (W = J/s) e de área é de aproximadamente 1000 W.m^{-2} (radiação solar líquida), ao nível do solo e num dia claro sem cobertura de nuvens. O potencial solar do Brasil é cerca de cinco vezes maior que o dos Estados Unidos e também superior ao da maioria dos países do primeiro mundo, localizados no hemisfério norte acima da linha do equador (Farret, 2010). Portanto, no Brasil existem condições ambientais bastante favoráveis ao melhor aproveitamento da energia solar, em especial em sistemas de aquecimento de água, seja em residências urbanas ou rurais, bem com higienização de alimentos e na criação de animais (ELETROBRÁS PROCEL, 2012). Em residências rurais, a viabilidade técnica no uso energia solar para fins de aquecimento de água, com temperatura mínima para banho de 35ºC, foi relatada por Basso et al. (2010) em condições de radiação solar superior a 3500 W.h/m² na região Oeste do Paraná.

Vale destacar ainda a importância da energia solar em aplicações rurais, a exemplo dos modelos de estimativa para radiação solar global e em solo e relações com variáveis meteorológicas, parte do trabalho de Simon e Angelocci (2014), aplicáveis a cafeeiros e limeiras. Porém, além de serem relações específicas ocorreu grande dispersão de dados no verão o que não permitiu um bom ajuste neste período, para este trabalho supracitado. Ferreira Jr. et al. (2014) mediram as componentes da radiação solar (incidente e transmitida) em dossel de milho, visando determinar a eficiência do uso da radiação e obtiveram correlações significantes para os tipos de cobertura do solo estudadas. No tocante ao uso da energia solar no meio rural, Sasaki et al. (2014) destacam equipamentos rurais do tipo pulverizador costal, cujo funcionamento tem como fonte de energia renovável a energia solar.

Os modelos para estimar o fluxo de radiação solar na superfície da terra (W/m^2) podem ser físicos ou estatísticos. Os modelos físicos são de abrangência mais geral e utilizam parâmetros que levam em consideração as propriedades óticas da atmosfera, tais como a cobertura de nuvens. Embora estes modelos possam ser aplicados a qualquer localidade, do ponto de vista teórico, seu uso efetivo é limitado devido à dificuldade de obtenção de dados para a parametrização das interações entre a radiação solar e os componentes atmosféricos. Os modelos estatísticos se baseiam em dados empíricos de medidas de radiação incidente e condições atmosféricas locais (Pereira et al., 2006), os quais apresentam caracterização restrita à região onde são realizads as medidas.

No período de um ano, o sol irradia cerca dez mil vezes a quantidade de energia consumida pela população mundial, sendo que parte deixa de ser aproveitada, pois a energia irradiada é emitida em várias direções (Pereira, 2009). Dá-se o nome de irradiação, à radiação eletromagnética originada da superfície do sol que alcança a superfície terrestre. A irradiação pode ser classificada em dois componentes: radiação solar líquida (R_n), que representa a parcela de irradiação que de fato atinge a superfície da terra; e radiação solar difusa (R_d), que representa a parcela de irradiação difundida pelas partículas e gases atmosféricos. A soma dessas duas componentes é a chamada radiação solar global (Rs), de acordo com Pereira e Colle (1998). Tais componentes podem ser medidos com sensores na superfície (usualmente instalados em estações meteorológicas), como no caso da componente líquida, ou estimada através de modelos matemáticos que levam em consideração a radiação solar global.

Existem modelos para estimativa da radiação solar global (R_s) com base na temperatura do ar, quando da ausência de dados registrados por instrumentação adequada, visto que esta é uma das mais importantes variáveis meteorológicas utilizadas, por exemplo, em modelos para produtividade e evapotranspiração. Borges et al. (2010) avaliaram os modelos de Hargreaves-Samani, Thornton-Running e o de Weiss, para o período de três anos em região da Bahia. Em regiões de Minas Gerais, Silva et al. (2012) avaliaram nove modelos empíricos a partir da temperatura mínima e máxima do ar, identificando o modelo de Hargreaves como o mais simples e de melhor desempenho para a região estudada.

A respeito da radiação solar líquida e disponibilidade de energia solar, poucos estudos estão registrados na literatura para o estado de Mato Grosso do Sul e/ou para a região Centro-Oeste do Brasil. Um exemplo da análise de modelos para radiação solar é apresentado por Oliveira et al. (2014), para o município de Aquidauana-MS, cujos resultados para radiação

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

solar foram tipicamente abaixo dos valores reais/medidos. Com relação a aplicações da energia solar em engenharia rural, ressalta-se também a importância da radiação solar conjuntamente à temperatura e fotoperíodo, para o desenvolvimento e crescimento de plantas na agricultura (Oliveira et al., 2014, *apud* Kunz et al., 2007).

Dado o exposto, o estudo apresentado neste trabalho tem como objetivo avaliar via estação meteorológica, a intensidade e comportamento da radiação solar líquida (*"net solar radiation"*, do inglês) que incide na superfície terrestre sobre o município de Dourados-MS, área situada no cerrado brasileiro. Com os resultados das características quantitativas e qualitativas na escala temporal que abrange o período de três anos (2008-2010, disponibilidade de dados completos), um modelo matemático para o perfil típico da radiação solar líquida é apresentado e comparado com os valores de outros períodos de tempo (i.e., 2011) para validação do modelo. Ressalta-se a importância no processo de evapotranspiração e consequente uso da água para irrigação rural, os quais são diretamente dependentes do estudo da radiação solar na região.

Material e Métodos

A metodologia foi desenvolvida durante execução de projeto de pesquisa, elaborado a partir da prospecção do potencial energético solar no município de Dourados, que apontou no período 2006-2008, média diárias anual entre 3,44 e 4,81 kW.h/m².dia (Leal da Silva, 2008), sendo na maior parte do Brasil entre 4 a 5 kW.h/m².dia. Posteriormente, a partir de dados brutos da estação meteorológica, resultados preliminares foram analisados pelo grupo de pesquisa ARENA/CNPq (Leal da Silva & Miyakawa, 2010; Leal da Silva et al., 2011), explorando modelos matemáticos e aplicação do mesmo em diversas condições locais no campus da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD) visando aprimoramento e verificação de consistência.

Estação meteorológica para aquisição de dados

Os dados brutos foram obtidos pela estação meteorológica semiautomática localizada no campus II da UFGD (localização: 22° 11'S, 54° 55'O, com altitude de 454 m em relação ao nível do mar). Altura de instalação do painel solar é de aproximadamente 1,5 m acima do nível do solo. A base de dados registrou informações desde 03/10/2002 até ~2010 (quando foi retirada do local), sendo que o período de interesse refere-se à série histórica entre Janeiro/2008 a Dezembro/2011, ou seja, 4 anos.

Utilizou-se o valor médio de cada parâmetro registrado a cada hora, totalizando 24 medidas diárias e 8760 medidas para cada ano (12 meses). A estação registrou de maneira pré-programada, parâmetros instantâneos (medidas horárias) e diários (máxima, mínima e média simples de 24 medidas horárias) para as seguintes variáveis meteorológicas: temperatura, umidade relativa, precipitação total, evapotranspiração, velocidade do vento e radiação solar total e líquida. São de interesse ao presente trabalho apenas R_s (W/m²) e R_n (W/m²), respectivamente a irradiação total (ou global) e a irradiação líquida. Ou seja, R_n é uma parcela de R_s, considerando a influência dos parâmetros atmosféricos que reduzem significativamente a intensidade da irradiação que efetivamente chega à superfície terrestre onde estão os sistemas coletores de dados.

As Figuras 1a e 1b mostram detalhes do piranômetro, instrumento utilizado para medição da radiação solar incidente e global (conforme manual, via modelagem atmosférica). O sensor do piranômetro mede a densidade de fluxo da radiação solar (W/m²) de um campo de visão de 180°.

O piranômetro tem como princípio de funcionamento, fornecer uma corrente elétrica proporcional à radiação solar recebida do hemisfério, centrado na direção perpendicular ao eixo de montagem do dispositivo sensor. O sensor é um fotodiodo de silício que responde á absorção de energia, gerando uma corrente elétrica proporcional à irradiância global (Dias, 2007). Algumas especificações técnicas do sensor piranômetro modelo SP-LITE (Campbell Scientific (2004) são apresentados a seguir, as quais podem ser utilizadas em trabalhos futuros de instrumentação meteorológica: impedância nominal, < 50 Ω; tempo de resposta, sensibilidade, < 1 segundo, 10 V/(W/m²); dependência da temperatura de sensibilidade, < ± 0,15%/°C; temperatura de trabalho de -30 a +70°C; e dimensões físicas, Vide Figura 1d.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

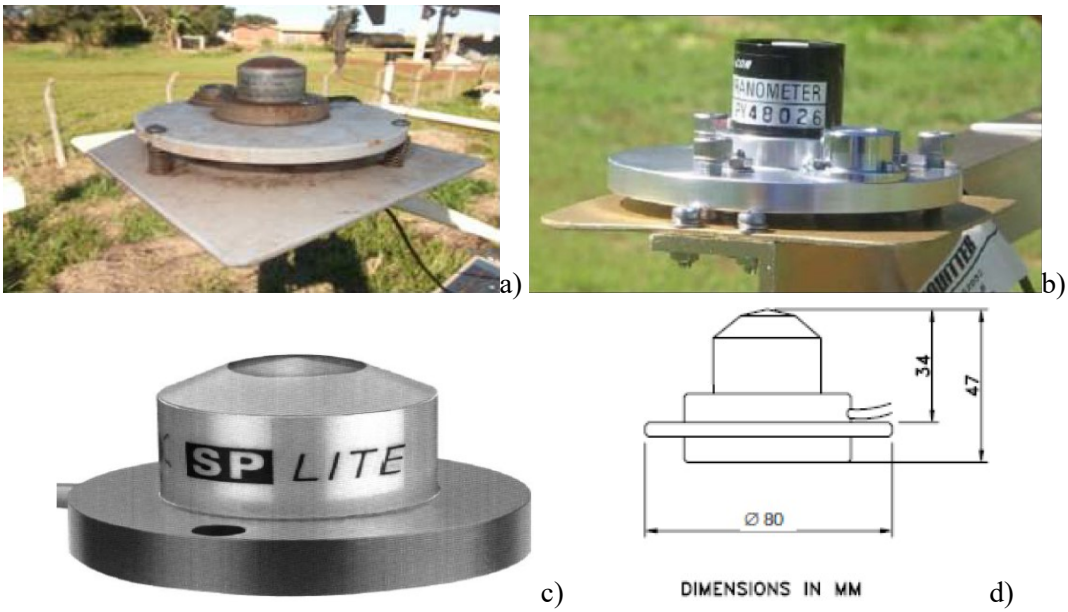


Figura 1. (a) Piranômetro no campus da UFGD. Fonte: Autores (2008-13); (b) Piranômetro. Fonte: Biscaro (2007); (c) Piranômetro modelo SP-LITE e (d) Dimensões do sensor. (Fonte: Campbell Scientific, 2004)

Região de estudo: aspectos geográficos e climatológicos

O estado de Mato Grosso do Sul, conforme classificação da literatura (IBGE, 2010; Portella & Bulhões, 1990) é subdividido em 4 mesorregiões (Pantanais, Centro-Norte, Leste e Sudoeste de Mato Grosso do Sul) ou 11 microrregiões. A microrregião de "Dourados" é composta de treze municípios (Amambai, Antônio João, Aral Moreira, Caarapó, Douradina, Dourados, Fátima do Sul, Itaporã, Juti, Maracaju, Ponta Porã, Rio Brilhante e Vicentina). A classificação climática do município de Dourados, segundo Köppen é Cwa (clima mesotérmico úmido com verões quentes e invernos secos), com temperaturas inferiores a 18°C (Junho e Julho, ambos os mêses mais frios) e superiores a 22°C (Janeiro, mês mais quente) e precipitação de verão dez vezes ou mais, superior à de Julho (Fietz & Fish, 2008).

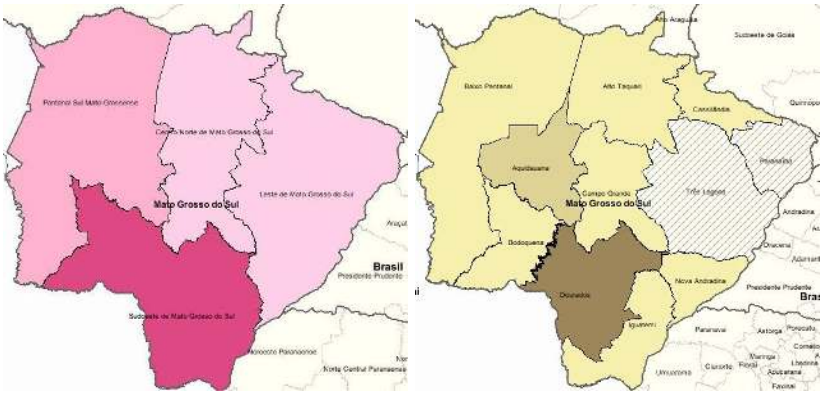


Figura 2. Meso (esquerda) e microrregiões (direita) do estado de Mato Grosso do Sul. Fonte: IBGE (2010).

Modelagem da radiação solar para um dia típico

Após a coleta foram analisados os dados referentes aos anos de 2008, 2009, 2010 e 2011, este último para fins de validação do modelo. Para cada mês, os registros foram separados em faixas horárias do fotoperíodo (6h – 20h), desconsiderando a faixa horária em que as medidas eram nulas ou desprezíveis (21h – 5h).

Na etapa seguinte, de acordo com a Equação (1), calculou-se o valor médio para todos os dias do mês para cada hora do fotoperíodo.

$$\overline{R_n} = \frac{\sum R_{n-h}}{n} \quad (1)$$

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Onde: $R_{n\text{-}h}$ (W/m^2) é a radiação solar líquida da hora (h) considerada e n é o número de dias do mês analisado.

A partir das análises realizadas para o período de estudo, foram construídos através de médias das medidas de cada período dos três anos, "dias-típicos". Ao aplicar a metodologia proposta pelo grupo de pesquisa ARENA – Aproveitamento de Recursos Energéticos, define-se dia típico como sendo o modelo matemático (função polinomial) capaz de representar o comportamento diário padrão de R_n para o período de um mês, trimestre ou ano. Utilizando a ferramenta EXCEL foi ajustado um polinômio a partir da curva de médias que descreve através de uma função horária de quarta ordem o comportamento e a intensidade de R_n ao longo do dia. Para o cálculo do desvio padrão (σ) e do coeficiente de variação (CV), conforme Equações (2) e (3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(R_{n,i} - \overline{R_n})^2}{N}} \quad (2)$$

$$CV = \sigma / \overline{R_n} \quad (3)$$

Onde: $R_{n,i}$ (W/m^2) é a radiação solar liquida, $\overline{R_n}$ (W/m^2) é a radiação solar liquida média, e N é o número de medidas no período (30 dias, para um mês de referência).

O modelo para o comportamento de R_n (valores médios para dias/meses típicos) foi ajustado com base em funções matemáticas contínuas, do tipo polinomial de 2ª ordem (y= a.x^2 + b.x + c), 3ª ordem (y= d.x^3+ e.x^2 + f.x + g), 4ª ordem (y= h.x^4 +i.x^3+ j.x^2 + k.x + l) ou graus superiores.

Foi levada em consideração a escolha dos meses para escolha dos trimestres típicos, iníciando no mês imediatamente subsequente ao do início da estação. Assim, tem-se o trimenstre Janeiro-Fevereiro-Março representando o período de verão, que normalmente se inicia em 21 de Dezembro, ~10 dias antes do período adotado pelos autores neste trabalho. Em outras palavras, os modelos aqui apresentados representam períodos de 3 meses sem considerar a data exata da mudança oficial das estações do ano, mas podem ser readequados em trabalhos futuros.

Resultados e Discussão

A Figura 3 mostra o comportamento dos dados brutos de R_n (marcadores triangulares, com linha de ajuste/suavização/"spline) no campus da UFGD, para um dia escolhido no qual não houve sombreamento ao nível do solo por presença de nuvens ou chuvas, registrando o comportamento de R_n mais próximo da radiação solar global (R_s). Percebe-se que a intensidade de R_n é desprezível (R_n ~0 W/m²) fora do fotoperíodo entre 6h-20h, portanto, os dados brutos registrados pelo piranômetro da estação meteorológica no período noturno (21h-5h) não interferem nos resultados aqui obtidos. A média simples (diária ou mensal) é capaz apenas de quantificar a intensidade média de R_n, porém elimina o comportamento característico do fenômeno físico que é a disponibilidade temporal irregular da radiação solar.

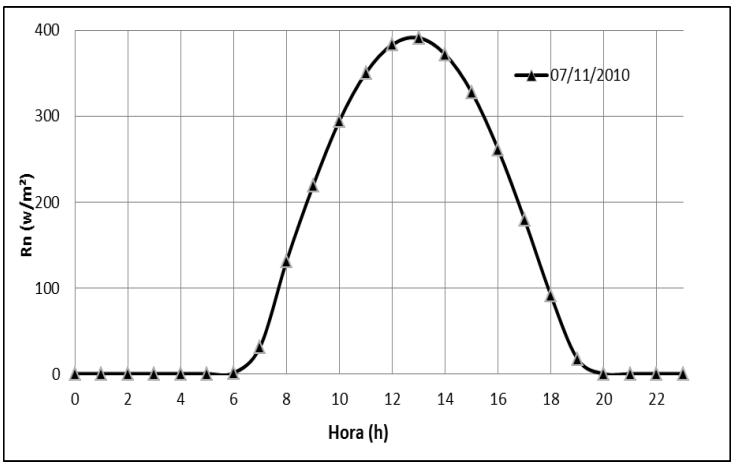
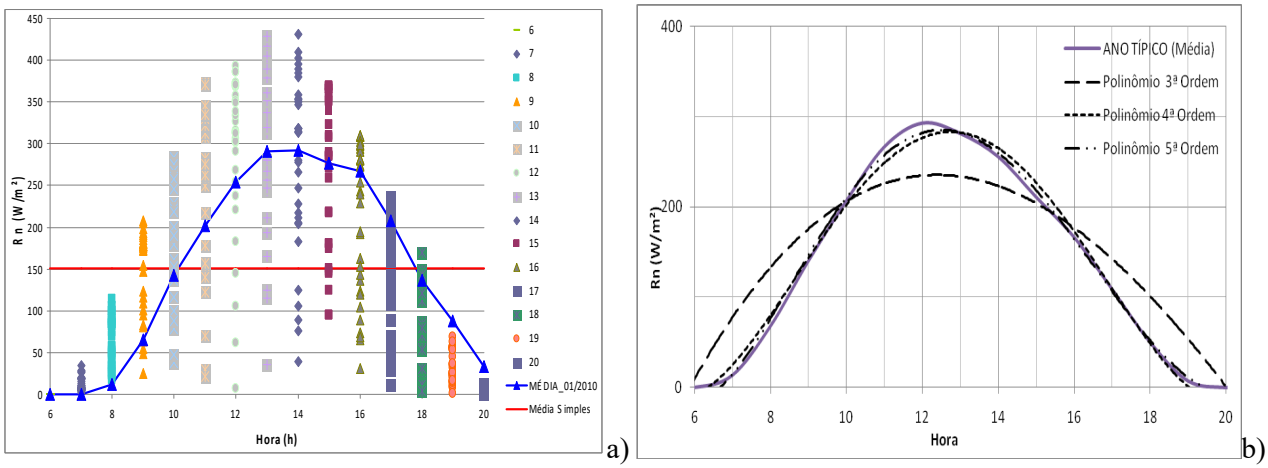


Figura 3. Comportamento de R_n para os dados brutos no período de 24 horas.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

A Figura 4a refere-se ao período de um mês (Janeiro/2010, ~450 valores =30 dias x 15h), e apresenta os dados brutos para R_n de todos os dias no foto período (6h-20h), a média simples de R_n e o valor médio horário de R_n conforme metodologia desenvolvida e Equação (1). Os resultados da Figura 4b referem-se ao ajuste do modelo desenvolvido que melhor representa o comportamento de R_n em determinado mês/ano.



a) b)

Figura 4. Comportamento de R_n: a) modelo desenvolvido *versus* média simples *versus* dados brutos, fotoperíodo de 1 mês; b) Ajuste do modelo para representação do comportamento de R_n.

Ainda em relação à Figura 4a, seja qual for o horário observado, existe variação significativa dos valores de R_n ao longo de um período de tempo maior, como é a situação em 1 mês, 1 trimestre (estações do ano) ou 1 ano (365 dias), ou mesmo devido à cobertura de nuvens e ocorrência de precipitação. O resultado do modelo proposto é dado pelos marcadores triangulares (ligados ponto-a-ponto), capaz de delinear o comportamento temporal de R_n por períodos médios (dias-semanas) e longos (meses-anos), conforme demais resultados apresentados neste trabalho. Vale esclarecer que a série de dados brutos de R_n apresenta valores máximos e mínimos, os quais correspondem, respectivamente, aos períodos sem e com cobertura de nuvens e/ou ocorrência de chuvas.

Quanto à Figura 4b, o modelo ajustado para 3ª ordem subestima a intensidade de R_n nas regiões de valores máximos, porém no fotoperíodo como um todo é capaz de representar a quantidade total de energia solar disponível (Joule = W x s), portanto um resultado de anteprojeto caso se queira alguma agilidade na estimativa de resultados para determinadas aplicações rurais (por exemplo, necessidade de integração numérica dos resultados). A melhor representação, do ponto de vista de intensidade e comportamento é o modelo ajustado para 4ª ordem, sendo que o de 5ª ordem não acrescenta informações adicionais para fins das diversas aplicações práticas que o modelo proporciona.

Com o objetivo de explorar variações do modelo para representar a intensidade e o comportamento de R_n, elaborou-se a Tabela 1 que descreve o grau de ajuste do modelo e sua respectiva correlação. O coeficiente de variação (R^2) é o parâmetro de qualidade do modelo. Foi identificado que polinômios de 4ª ordem têm qualidade estatística suficiente para representar o comportamento dos valores médios horários de R_n ($\overline{R_n}$), visto que $R^2 \geq 95\%$. Para alguns resultados, não apresentados neste trabalho, polinômios de 3ª ordem obtém $R^2 \geq 90\%$ e podem ser, eventualmente, considerados como modelos representativos do comportamento de R_n. Vale destacar que, quanto maior o período desejado para representação do modelo desenvolvido (ex: trimestre, ano, etc), maior deverá ser o grau do polinômio. Sendo assim, dentre todos os resultados obtidos no projeto de pesquisa, o modelo ajustado para 4ª ordem atende a quase totalidade das situações e períodos temporais analisados.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Tabela 1. Modelo de R_n com diferentes graus de ajuste para o mês de Outubro/2010.

Grau de ajuste	Modelo (função matemática)	R^2
3	0,1074.x3 - 8,8466.x2 + 169,6800.x - 713,3100	0,8396
4	0,1127.x4 - 5,7516.x3 + 98,5320.x2 - 641,8000.x + 1391,9000	0,9909
5	-0,0049.x5 + 0,4343.x4 - 13,7250.x3 + 192,1100.x2 - 1157,7000.x + 2453,1000	0,9958

Visto que o comportamento de alguns fenômenos são sazonais, a exemplo destes de natureza meteorológica (radiação solar, velocidade/direção do vento, pluviosidade, temperatura, umidade, etc), é de interesse que o modelo desenvolvido seja capaz de representar o comportamento de R_n nas diferentes estações do ano (verão, outono, inverno e primavera). Assim, o próximo conjunto de resultados explora períodos de tempo representativos das quatro estações típicas de um ano calendário, ressaltando as características sazonais dos dados brutos e os modelos obtidos para cada estação. Embora a transição entre as estações sejam diferentes do fim do mês/ano calendário, os autores escolheram apresentar os resultados considerando a disponibilidade de dados brutos mensal da estação meteorológica.

Na Figura 5a são apresentados os resultados para um dia típico representativo do 1º trimestre (linha cheia, sem marcadores), com o objetivo de verificar o ajuste entre o modelo e os dados brutos. Os marcadores triangular, quadrado e circular representam, respectivamente, o dia típico para cada mês do período temporal de disponibilidade dos dados brutos (2008-2010). A Figura 5b representa o modelo de um dia típico para o 2º trimestre do ano (linha cheia, sem marcadores). Nota-se que o modelo de dia típico para o mês de Abril têm valores pouco acima (ver R_n às 13h) do que o modelo para dia típico do 2º trimestre, possivelmente vinculado ao efeito sazonal de transição verão-outono (21/Abril). Nada se observou de destaque para a transição primavera-verão (21/Dezembro). De qualquer maneira, estes resultados mostram-se qualitativamente próximos, garantindo boa representação do comportamento e intensidade de R_n de um dia típico qualquer no verão (Janeiro-Fevereiro-Março) ou no outono (Abril-Maio-Junho), que pode ser utilizado para aplicações e estudos de interesse de engenharia rural e afins.

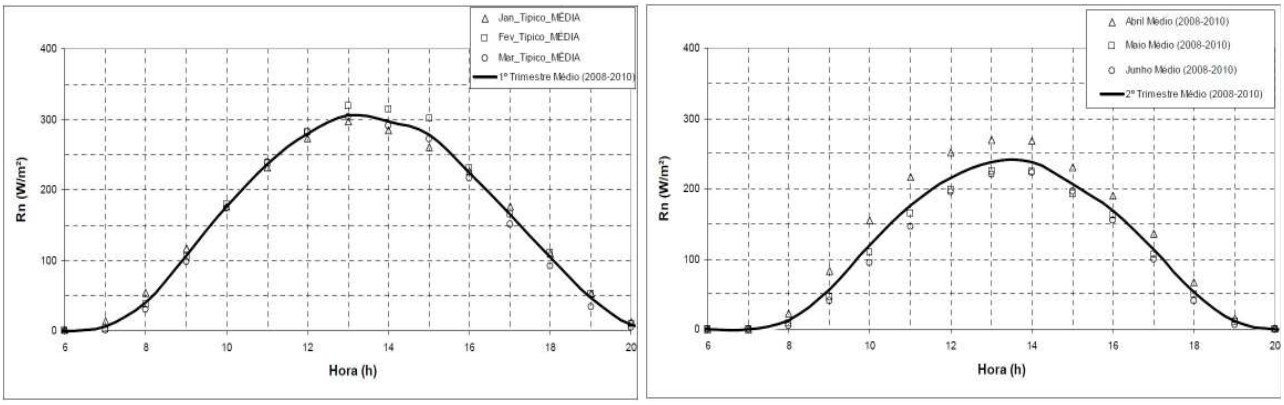


Figura 5. Modelos trimestrais para R_n em dia típico (Dourados-MS): 1° trimestre (esquerda); 2° trimestre (direita).

Resultados para os modelos do 3º e 4º trimestres são apresentados na Figuras 6a e 6b, de maneira análoga aos resultados apresentados na Figuras 5a e 5b para o 1º e 2º trimestres. Na Figura 6a, tem-se o modelo representando um dia típico para o 3º trimestre do ano (linha cheia, sem marcadores). Percebe-se que o modelo de dia típico para o mês de julho tem valores nitidamente abaixo (ver R_n às 13h) do modelo de dia típico para o 3º trimestre, possivelmente vinculado ao efeito sazonal de transição outono-inverno (21/Junho). A Figura 6b representa o modelo de um dia típico para o 4º trimestre do ano (linha cheia, sem marcadores), também perceptível para o mês de Outubro valores pouco abaixo do modelo de dia típico para o 3º trimestre (ver R_n às 13h). De maneira similar aos resultados em períodos de transição sazonal apresentados neste

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

trabalho, possivelmente vinculado à transição inverno-primavera (21/Setembro).

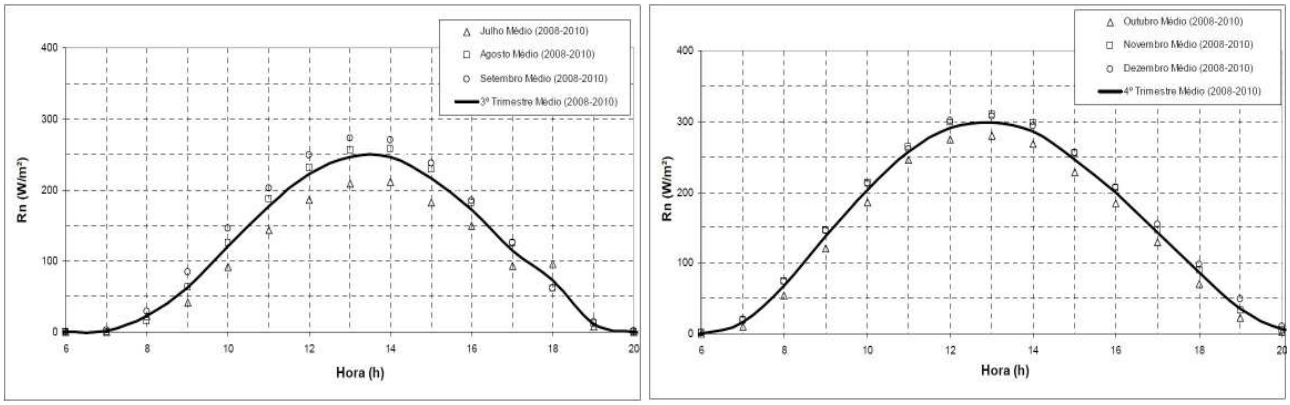


Figura 6. Modelos trimestrais para R_n em dia típico (Dourados-MS): 3° trimestre (esquerda); 4° trimestre (direita).

Na Tabela 2 são mostradas as características do modelo desenvolvido para cada mês e um modelo para o trimestre típico da primavera (Outubro-Novembro-Dezembro), também apresentados visualmente na Figura 6b. Assim, mesmo para períodos típicos mais longos (trimestres), o modelo mostrou-se robusto e capaz de representar a intensidade e comportamento com $R^2 \geq 95\%$, bem como para outros conjuntos de dados (meses do ano).

Tabela 2. Modelo de R_n para período típico mensal e trimestral.

Período típico	Modelo (função matemática)	R^2
Outubro	0,1127.x4 - 5,7516.x3 + 98,5320.x2 - 641,8000.x + 1391,9000	0,991
Novembro	0,1094.x4 - 5,5899.x3 + 95,2520.x2 - 609,0900.x + 1290,2000	0,997
Dezembro	0,1043.x4 - 5,3359.x3 + 90,8290.x2 - 577,2500.x + 1211,6000	0,996
4° Trimestre	0,1088.x4 - 5,5591.x3 + 94,8710.x2 - 609,3800.x + 1297,9000	0,996

O modelo é sempre elaborado a partir de um conjunto de dados brutos de determinado ano, que para os resultados apresentados anteriormente referem-se a 2008-2010. Por fim, a seguir será analisada a robustez do modelo proposto (mensal e/ou trimestral) para outros períodos anuais, a título de previsão de adequação do modelo com dados futuros. A Figura 7 compara o modelo elaborado a partir de dados brutos anteriores (2008-2010), para o dia típico do 1º trimestre do ano válido para Dourados, com dados brutos obtidos para o ano de 2011.

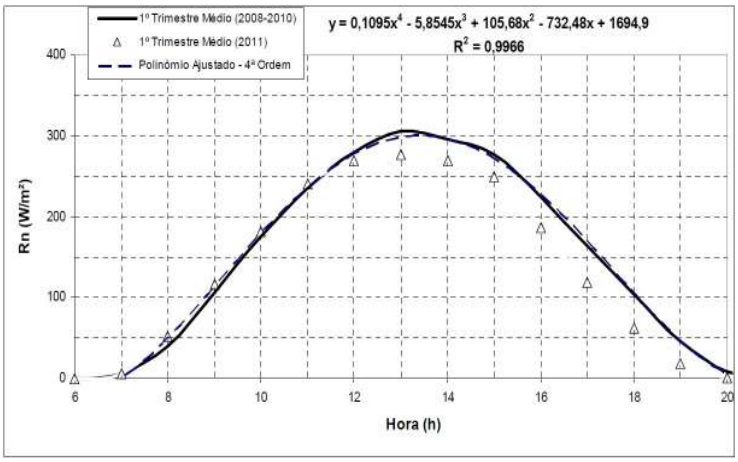


Figura 7. Modelo do dia típico para 1° trimestre (a) e 2° trimestre do ano, válido para Dourados-MS.

O objetivo deste conjunto de resultados é avaliar a confiabilidade do modelo obtido (2008-2010) quando comparado com o modelo de um período posterior (2011). De certa maneira, é o indicador de qualidade no que diz respeito à capacidade do modelo/metodologia desenvolvido/proposto em representar o comportamento e intensidade de R_n ao longo de um dia qualquer, em determinada estação/trimestre do ano. O que se constata é que o dia típico do 1º trimestre do ano (2008-2010) é bem representativo, pois consegue representar/prever com bom grau de qualidade as características quantitativas e qualitativas de R_n.

Conclusões

Em relação aos resultados apresentados e discutidos neste artigo, destacam-se as seguintes conclusões:

i) O valor médio da Rn referente a uma mesma hora do dia, considerando todos os dias de um mesmo mês, apresenta desvio padrão reduzido no período de valores máximos (12h – 15h). Fica explicita o comportamento da função matemática ao longo do fotoperíodo ser fortemente associada à distribuição estatística de Gauss (ou normal), cuja característica é ser igualmente distribuída à esquerda e à direita do valor máximo;

ii) A modelagem matemática por meio de funções contínuas é capaz de representar as características de intensidade e comportamento da radiação solar líquida (R_n), para períodos mensais e trimenstrais (sazonais). Também é capaz de modelar uma previsão de comportamento futuro (2011) a partir de comportamento anterior (2008-2010);

iii) A metodologia proposta pelo grupo de pesquisa ARENA/CNPq, associada à análise estatística de R_n, mostra-se eficiente na parametrização das características locais da radiação solar incidente. Nestas condições, o modelo apresenta maior confiabilidade na estimativa do potencial solar disponível ao nível do solo, pois foi construído a partir de medidas que passaram pelas mesmas influências atmosféricas e sazonais daquelas que se pretendem estimar;

iv) As características sazonais R_n indicam que os valores máximos são razoavelmente estáveis nos meses do 1º e 4º trimestre, porém são descrescentes nos meses do 2º e 3º trimestre e culminam em valores mínimos no mês de julho. Em outras palavras, os resultados para os 1º e 4º trimestres, ocorreu pouca variação de R_n de um mês para outro, enquanto que no 2º e 3º trimestres há uma significativa variação de R_n. Possivelmente isto aconteceu devido ao comportamento sazonal de transição entre as estações do Outono, Inverno, Primavera e Verão, que ocorrem respectivamente nos dias 21 de Março, 21 de Junho, 21 de Setembro e 21 de Dezembro.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos recursos obtidos para a realização do projeto de pesquisa intitulado "*Avaliação do potencial para aproveitamento de energia solar e eólica na região da Grande Dourados*", via FUNDECT edital 09/2008 – Universal (Termo de Outorga N° 0122/09). À UFGD / FAEN / Engenharia de Energia, pelos equipamentos e espaço físico cedidos para realização do trabalho, bem como à UFGD/FCA – Faculdade de Ciências Agrárias, pelos dados fornecidos da estação meteorológica semi-automática. Aos alunos PIBIC/PIBITI e técnicos de laboratório que participaram da execução do referido projeto de pesquisa e demais atividades no grupo de pesquisa ARENA/CNPq no período 2009-2012.

Referências

BASSO, L. H.; SOUZA, S. N. M.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; SANTOS, R. F. Análise de um sistema de aquecimento de água para residências rurais, utilizando energia solar. **Engenharia Agrícola (Jaboticabal)**, v.30, n.1, p.14-21, jan./fev. 2010.

BISCARO, G. A. Meteorologia Agrícola Básica. 1. ed. Cassilândia: UNI-GRAF Gráfica e Editora União Ltda., 2007. 86 p.

BORGES, V. P.; de OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; da SILVA, TIBÉRIO S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.1, p.74-80, 2010.

CAMPBELL SCIENTIFIC. Instruction Manual SP-LITE Silicon Pyranometer**.** Logan: Copyright, 2004. 20p.

DIAS, C. A. A. **Procedimentos de medição e aquisição de dados de uma torre micrometeorológica em Sinop-MT**. Ano de Obtenção: 2007. 89 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2007.

ELETROBRÁS PROCEL, VASCONCELLOS, L.E.M. e LIMBERGER, M.A.C. (Organizadores). **Energia solar para aquecimento de água no Brasil: contribuições da Eletrobrás Procel e parceiros.** 1. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2012. 240 p.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica.** 2. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2010. 244 p.

FERREIRA Jr., R.A. et al. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.322-328, 2014.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. F. O clima da região de Dourados, MS. 1. ed. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 32 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *PAM - Pesquisa Agropecuária Municipal*, 2010. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 10/04/2011.

LEAL DA SILVA, R. Avaliação preliminar para aproveitamento de energia solar na região de Dourados-MS. In: II Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2008, Florianópolis-SC. **Anais...**. Dados Meteorológicos / Energia Solar, v.CD-ROM. p.1-9.

LEAL DA SILVA, R.; MIYAKAWA, S. K. S. Modelagem matemática do comportamento e intensidade da radiação solar líquida incidente no campus da UFGD. In: 8º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, 2010, Campinas-SP. **Anais...**. Energia Solar e Eólica, v.CD-ROM. p.1-8.

LEAL DA SILVA, R.; OLIVEIRA, I. P.; CACHUTÉ, L. O. Energia solar térmica e disponibilidade local no campus da UFGD. In: 6º Congresso Internacional de Bioenergia, 2011, Curitiba-PR. **Anais...**. Tema 2: Geração de Energia Elétrica Alternativa, v.CD-ROM. p.1-10.

OLIVEIRA, G. Q. et al. Comparison between global solar radiation models in Aquidauana, Alto Pantanal region, Brazil. **Comunicata Scientiae (Online)**, v.5, n.3, p.222-228, 2014.

PEREIRA, M. J. **Energia: eficiência e alternativas.** 1. ed. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna Ltda., 2009. 197 p.

PEREIRA, E. B.; COLLE, S. **Atlas de irradiação solar no Brasil.** 1. ed. Brasília-DF: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 1998. 58 p.

PEREIRA, E. B.; et al. **Atlas brasileiro de energia solar.** 1. ed. São José dos Campos-SP: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. 60 p.

PORTELLA, J.R.; BULHÕES, M.G. **Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas.** 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE / Diretoria de Geociências, 1990. 135 p.

SASAKI et al. Development of a solar photovoltaic backpack sprayer. **Comunicata Scientiae (Online)**, v.5, n.4, p. 395-401, 2014.

SILVA, C. R. da; SILVA, V. J. da; ALVES JÚNIOR, J.; CARVALHO, H. P.. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.3, p.281-288, 2012.

SIMON, J.; ANGELOCCI, L.R. Saldo de radiação em cafeeiros e limeiras: relações com saldo de radiação de gramado e radiação global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.12, p.1218-1227, 2014.