

# ALGORITMO PARA CARACTERIZAÇÃO INSTANTÂNEA DAS CONDIÇÕES DO CÉU

Hildeu Ferreira da ASSUNÇÃO<sup>1</sup>, João Francisco ESCOBEDO<sup>2</sup>

## INTRODUÇÃO

A caracterização das condições do céu é essencial no estudo das irradiâncias solar direta e difusa; particularmente na correção da irradiância difusa devido ao efeito anisotrópico (Batlles et al., 1995), na eficácia luminosa (Robledo e Soler, 2001), em cálculos de períodos de insolação e sombreamento (Hiller et al., 2000) ou em sistemas de controle fotoelétrico.

Historicamente, a irradiância solar tem sido registrada como médias horárias, diárias ou mensais. Embora as médias horárias sejam comuns e adequadamente usadas em propósitos gerais, Gansler et al. (1995) concluíram que as funções de distribuição cumulativas para radiação de um minuto diferem daquelas adquiridas com dados horários. Suehrcke e McCormick (1988) demonstraram que a distribuição de frequência da irradiância média de 5 minutos ainda se mantém similar à da irradiância instantânea.

Tradicionalmente, as condições do céu são classificadas em três categorias: céu limpo, céu parcialmente nublado e céu nublado. Na condição de céu limpo, as amplitudes da irradiância solar sobre a superfície são atribuídas à concentração de agentes atenuantes na atmosfera como ozônio, vapor d'água e aerossóis. Na condição de céu nublado, os fatores atenuantes principais são as nuvens, que combinadas, em tipos, número de camadas e espessura, formam as mais complexas estruturas redutoras da radiação solar (Iqbal, 1983).

As condições do céu podem ser identificadas através do índice de claridade,  $k_t$  (razão entre a irradiância solar global,  $G$ , e a extraterrestre,  $G_0$ ) e/ou do índice de insolação,  $S$  (razão entre a insolação registrada na superfície,  $N$ , e a duração astronômica do dia,  $N_0$ ).

Neste trabalho é proposto um algoritmo com o objetivo de identificar a condição instantânea do céu, com 95% de probabilidade, em função do índice de claridade e da massa ótica, bem como calcular a duração efetiva do dia ( $N_e$ ) e a razão de insolação.

## MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foram usados os valores médios de 5 minutos, das irradiâncias global ( $W.m^{-2}$ ), medidos com um piranômetro Eppley, e as horas de insolação diária, registradas com um heliógrafo Campbell-Stocks, na Estação Radiométrica da FCA/UNESP, área rural de Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil (22°51'S; 48°26'W; 786 m), durante o período de 1996 a 2000.

Para construção do modelo foram isolados os dias de céu limpo, utilizando a razão de insolação diária ( $S_0,9$ ). As irradiâncias solar global e extraterrestre foram convertidas em  $k_t$ . Este conjunto de dados foi subdividido em 6 blocos de massa ótica, na forma:  $\bar{m}_a = [1,0 \pm 0,1 | 6,0]$ , conforme Suehrcke e McCormick (1988), cujos índices de claridade, de cada bloco, foram agrupados em 50 intervalos de classe,

$\bar{k}_t = [0,01 | \pm 0,01 | 0,99]$ , de acordo com Tovar et al. (1998). Cada distribuição de frequência acumulada (bloco) foi ajustada com uma função de distribuição logística, na forma:

$$F(k_t, m_a) = \frac{1}{1 + \exp[-(k_t - m_a)/d(m_a)]} \quad (1)$$

onde  $F(k_t, m_a)$  é a probabilidade esperada para os valores de índices de claridade igual ou inferior a  $k_t$ , em uma definida massa ótica. Os parâmetros

$$m_a(m_a) = 0,16175 + 0,71628 \exp(-m_a/5,74442) \quad (2)$$

e

$$d(m_a) = 0,04736 - 0,04128 \exp(-m_a/3,82816) \quad (3)$$

representam respectivamente, o centro e a escala da distribuição. A massa ótica, corrigida para a altitude ( $h$ ) da estação, foi estimada da seguinte forma:

$$m_a = \sec \theta_z \cdot e^{-0,0001184h} \quad (4)$$

Desse modo, a um dado instante ( $i$ ), o sol pode estar obscurecido (1); exposto (2) ou envolto por nuvens (3), ou seja:  $\mathbf{sol}_i = [sol_1 \ sol_2 \ sol_3]$ . Cada elemento do vetor  $\mathbf{sol}$  assume o valor 1 (verdadeiro) ou 0 (falso), obedecendo às seguintes regras:

$$\begin{aligned} sol_1 &= \begin{cases} 1; F(k_t, m_a) < 0,025 \\ 0; \text{caso contrário} \end{cases} \\ sol_2 &= \begin{cases} 1; 0,025 \leq F(k_t, m_a) \leq 0,975 \\ 0; \text{caso contrário} \end{cases} \\ sol_3 &= \begin{cases} 1; F(k_t, m_a) > 0,975 \\ 0; \text{caso contrário} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

A duração efetiva do dia ( $N_e$ ) pode ser aproximada com:

$$N_e = \frac{t}{60} \cdot \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n sol_{ij} \quad (6)$$

$t$  é o tempo, em minutos, de saída dos dados.

A razão de insolação ( $S$ ) ou fração de tempo com sol exposto entre o amanhecer e o pôr do sol:

$$S = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^n sol_{i2} \quad (7)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente modelo foi aplicado aos dados de 2001 e 2002, dentre os quais identificou as seguintes categorias:

Sol obscurecido ( $sol_1$ ) — predominância da irradiância difusa, com pouca ou total ausência da irradiância solar direta. A Figura 1 mostra que, em média, esta categoria é mais evidente no verão (61%) e menos freqüente no inverno (33%). Vale salientar que esta categoria mantém sazonalmente uma estreita associação com a categoria de sol exposto, ou seja, quando uma cresce a outra diminui.

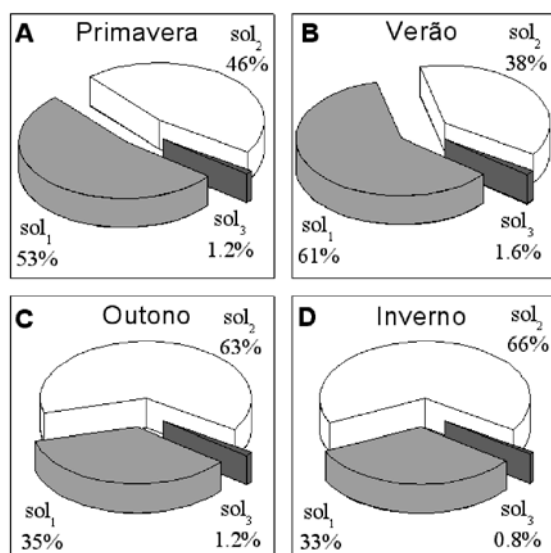
Sol exposto ( $sol_2$ ) — predominância da irradiância direta, cuja transmitância é regulada

<sup>1</sup>Prof. CAJ/UFG, 75800-000, Jataí/GO. Doutorando em Energia na Agricultura FCA/UNESP. E-Mail: [hildeu@yahoo.com.br](mailto:hildeu@yahoo.com.br).

<sup>2</sup>Dr. Prof. Departamento de Ciências Ambientais, FCA/UNESP, 18610-000 Botucatu, SP. E-Mail: [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br).

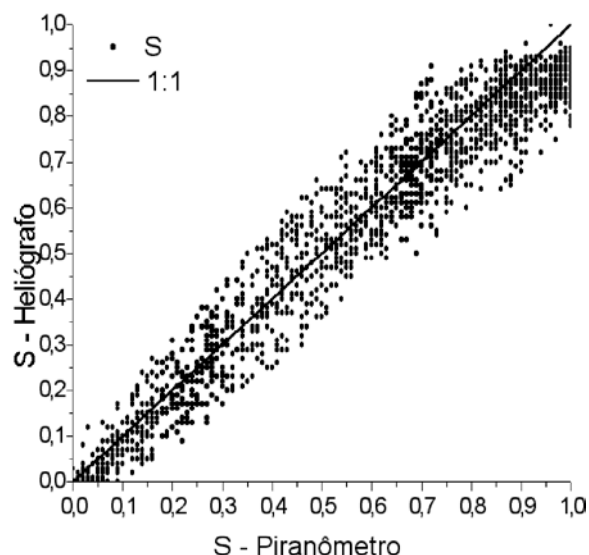
principalmente pela turbidez atmosférica e pela massa ótica. Segundo Skartveit e Olseth (1992) a redução da irradiância direta devido à extinção causada por aerossóis e/ou nuvens ralas é compensada pelo aumento parcial da irradiância difusa, deixando a irradiância global significativamente menos afetada. A Figura 1 mostra que, em média, durante o verão o sol permanece exposto em 38% do tempo, enquanto no inverno pode chegar a 66%. Esta estatística não implica que o valor percentual do tempo seja caracterizado por céu continuamente limpo, e sim por intercalações entre as 3 categorias. Mesmo porque, no verão os efeitos convectivos juntamente como a entrada de frentes frias, tornam raros os dias com céu totalmente limpo, nas regiões tropicais.

Sol envolto por nuvens ( $sol_3$ ) — irradiância global intensificada por efeitos de reflexões entre nuvens e/ou solo/nuvens. Ocorre sempre quando o céu encontra-se parcialmente nublado, cujo efeito pode produzir índices de claridade com valores acima de 1. Suehrcke e McCormick (1988) atestam que, neste caso, as nuvens refletem a radiação para um ponto onde o piranômetro tem uma clara “visão” do sol, deste modo a luz refletida pelas nuvens é registrada como radiação difusa, uma vez que o pireliômetro não detecta este efeito. A inspeção dos dados mostra que a freqüência desta, em média, é inferior a 2% (Figura 1).



**Figura 1.** Freqüências médias sazonais de sol obscurecido ( $sol_1$ ), sol exposto ( $sol_2$ ) e sol envolto por nuvens ( $sol_3$ ).

A Figura 2 apresenta a correlação linear entre as razões de insolação diária registrada obtida com o heliógrafo e estimada com o algoritmo. O coeficiente de determinação ( $r^2=0,9$ ) indica boa compatibilidade estatística entre os dois métodos. Aqui o modelo superestima os valores registrados em 6,4% com uma taxa de dispersão de  $\pm 9\%$  em torno das medidas. Benson et al. (1984) encontraram erros na ordem de  $\pm 15\%$  na base horária,  $\pm 8\%$  na base diária e  $\pm 4\%$  na base mensal, entre as insolações medidas com heliógrafo e pireliômetro. Estes autores notaram que o registrador Campbell-Stocks subestima a insolação nas massas óticas altas e superestima durante períodos de intenso brilho solar, além disso as medidas tomadas com o heliógrafo estão sujeitas a erros relacionados com a umidade do papel e com a interpretação do diagrama.



**Figura 2.** Correlação entre as razões de insolação diária (S) observada e modelada

Experimentalmente, este algoritmo pode ser adotado para outras localidades, alterando o intervalo de confiança do modelo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATTLES F.J., OLMO F.J. and ALADOS-ARBOLEDAS L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v.54, n.2, p.105-114, 1995.
- BENSON R.B., PARIS M.V., SHERRY J.E. and JUSTUS C.G. Estimation of daily and monthly direct, diffuse and global solar radiation measurements. **Solar Energy**, v.32, n.4, p.523-535, 1984.
- GANSLER R.A., KLEIN S.A. and BECKMAN W.A. Investigation of minute solar radiation data. **Solar Energy**, v.55, n.1, p.21-27, 1995.
- HILLER M.D.E., BECKMAN W.A. and MITCHELL J.W. TRNSHD – a program for shading and insolation calculations. **Building and Environment**, v.35, p.633-644, 2000.
- IQBAL M. **An introduction to solar radiation**. Toronto: Academic Press, 390p., 1983.
- ROBLEDO L. and SOLER A. On the luminous efficacy of diffuse solar radiation. **Energy Conversion and Management**, v. 41, p.1181-1190, 2001.
- SKARTVEIT A. and OLSETH J.A. The probability density and autocorrelation of short-term global and beam irradiance. **Solar Energy**, v.49, n.6, p.477-487, 1992.
- SUEHRCKE H. and MCCORMICK P.G. The frequency distribution of instantaneous insolation values. **Solar Energy**, v.40, n.5, p.413-422, 1988.
- TOVAR J., OLMO F.J. and ALADOS-ARBOLEDAS L. One-minute global irradiance probability density distributions conditioned to the optical air mass. **Solar Energy**, v.62, n.6, p.387-393, 1998.