

EVOLUÇÃO DIURNA E ANUAL DA FREQUÊNCIA DAS COBERTURAS DE CÉU EM BOTUCATU/SP

ÉRICO TADAO TERAMOTO¹ & JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO²

RESUMO: Neste trabalho foi apresentada uma análise do padrão de variação da cobertura de céu em Botucatu/SP. A classificação foi realizada com base no índice de claridade K_T . Utilizou-se na classificação uma base de dados de irradiação solar global na horizontal, medida na Estação Radiométrica da UNESP em Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,43°W, altitude 786m) entre os anos de 1996 a 2005. Foram analisadas as variações na frequência, ao longo do fotoperíodo e do ano, das coberturas de céu: I - nebuloso ($K_T < 0,35$); II - parcialmente nebuloso com dominância para o difuso ($0,35 < K_T \leq 0,55$); III - parcialmente nebuloso com dominância para o claro ($0,55 < K_T \leq 0,65$) e IV - claro ($K_T > 0,65$). A frequência das coberturas de céu I e II é maior ao longo do período chuvoso do ano e nos horários próximos ao nascer e pôr-do-sol. E é menor durante o período seco do ano e nos horários próximos ao meio dia, nos quais há predominância das coberturas de céu III e IV. A frequência horária mensal da cobertura de céu I variou de 46,91% do fotoperíodo em janeiro a 25,27% em agosto. E a frequência diária mensal variou de 9 dias em janeiro a 3 dias em agosto. Para a cobertura de céu IV, a frequência horária mensal variou de 38,81% do fotoperíodo em agosto a 18,17% em janeiro. E a frequência diária mensal variou de 17 dias em agosto a 3 dias em janeiro.

Palavras-chave: Índice de claridade, nebulosidade, radiação solar.

¹ UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, Departamento de Ciências Ambientais, Fazenda Experimental Lageado, Rua José de Barbosa de Barros, n. 1780 – Botucatu, São Paulo, CEP 18610-307, caixa postal 237, ericoengineer@fca.unesp.br

² UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, Departamento de Ciências Ambientais, Fazenda Experimental Lageado, Rua José de Barbosa de Barros, n. 1780 – Botucatu, São Paulo, CEP 18610-307, caixa postal 237, escobedo@fca.unesp.br

DIURNAL AND ANNUAL EVOLUTIONS OF THE FREQUENCY OF THE SKY CONDITIONS IN BOTUCATU/SP

SUMMARY: *This work presents an analysis of the pattern variation of the sky conditions in Botucatu/SP. The classification was based on the clearness index KT . It was used in the classification a database of global solar irradiance in the horizontal, measured at Radiometric Station of UNESP in Botucatu (latitude 22.85°S , longitude 48.43°W , altitude 786 m) from 1996 to 2005. We analyzed the variations in frequency, during the photoperiod and over the year, of the sky conditions: I - Cloudy ($KT < 0.35$); II - partly cloudy with dominance for the diffuse ($0.35 < 0.55 \leq KT$) III - partly cloudy with dominance for the clear ($0.55 < KT \leq 0.65$) and IV – clear ($KT > 0.65$). The frequency of sky conditions I and II are higher during the rainy season of the year and in hours close to sunrise and sunset. And it is lower during the dry season and in hours near noon, in which there is a predominance of sky conditions III and IV. The monthly hourly frequency of sky condition I ranged from 46.91% of the photoperiod in January to 25.27% in August. And the frequency monthly daily ranged from nine days in January to three days in August. To the sky condition IV, the frequency monthly hourly ranged from 38.81% of the photoperiod in August to 18.17% in January. And the frequency monthly daily ranged from 17 days in August to three days in January.*

Keywords: *Clearness index, cloudiness, solar radiation.*

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do ano, as variações nos níveis de radiação solar incidente em qualquer ponto sobre a superfície terrestre dependem basicamente das variações na posição do Sol em relação à latitude local e de variações climáticas. O primeiro é facilmente determinado a partir da geometria solar. Porém o segundo, relacionado principalmente as variações nas concentrações de vapor de água, de aerossóis e de nuvens presentes na atmosfera, é de difícil previsão e determinante na transmissividade atmosférica da radiação solar. As nuvens reduzem a componente direta dentro da radiação solar por difusão e reflexão e, junto do vapor de água, são as principais atenuadoras da radiação solar por absorver grande parcela da radiação na faixa espectral do infravermelho. Essa faixa espectral representa 50% da radiação solar global (BOL-SENGA, 1997; ALI ROHAMA, 2001; MOSALAM SHALTOUT et al., 2001; ESCOBEDO et al., 2009).

Os aerossóis afetam diretamente o balanço de radiação solar através da absorção da radiação no comprimento do ultravioleta ou da difusão e reflexão da radiação solar direta. A radiação no comprimento do ultravioleta corresponde a aproximadamente 4% da radiação solar global (ELHADIDY et al., 1990; KHOGALI & AL-BAR, 1992; ALI RAHOMA, 2001; MOSALEM SHALTOUT et al., 2001; ROOBA, 2004; ESCOBEDO et al., 2008). Indiretamente, os aerossóis influenciam o balanço de radiação alterando as propriedades físicas e o tempo de vida das nuvens (ROSENFELD, 2000; RAMANATHAN et al. 2001; ACKERMAN et al., 2000; WIELICKI et al., 2005; KAUFMAN & KOREN, 2006).

Em função da considerável influência das nuvens sobre a radiação solar, o estudo das condições de cobertura do céu por nuvens, em qualquer localidade no globo terrestre, permite conhecer a dinâmica da variação dos níveis de energia solar. Serve também como parâmetro na estimativa da radiação solar incidente sobre a superfície terrestre, a partir de modelos estatísticos. Ambos os estudos citados são úteis em projetos de sistemas que utilizam energia solar ou que sejam influenciados por ela, em estudos voltados ao planejamento e desenvolvimento do turismo, na secagem de produtos agrícolas, entre outros (PEREZ et al., 1990; AL-LAWATI, 2003; PATTANASETHANON et al., 2007).

A maioria dos trabalhos presentes em literatura classifica a cobertura de céu em nebuloso, parcialmente nebuloso e claro. Essa classificação é normalmente feita com base em índices calculados a partir de dados medidos ou estimados de radiação solar, como o índice de claridade K_T (razão entre a radiação global e a extraterrestre) (KUDISH & IANETZ, 1996; LI & LAM, 2001; OKOBUE et al., 2009). O K_T é amplamente utilizado, pois depende da medição de apenas um parâmetro (radiação solar global). Ele serve como um indicativo das condições atmosféricas locais, mostrando com maior clareza as variações da radiação solar em função do clima. Expressa quanto da radiação solar extraterrestre incide sobre a superfície terrestre após interagir com nuvens, vapor de água e aerossóis presentes na atmosfera. Baixos valores de K_T normalmente indicam cobertura de céu nebuloso e predominância da componente difusa dentro da radiação global. Ao contrário, valores elevados de K_T indicam cobertura de céu claro e predominância da componente direta dentro da radiação global.

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma análise dos padrões de variação na cobertura de céu em Botucatu, SP, Brasil. A classificação da cobertura de céu foi realizada em função do índice de claridade K_T , utilizando uma base de dados de 10 anos de medições de irradiação solar global na horizontal. Foram estudados os padrões de variação da cobertura de céu ao longo das horas do dia em cada mês do ano (evolução diurna) e ao longo dos meses do ano (evolução anual).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e clima

Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,43°W, altitude 786m), distante 221 km do Oceano Atlântico, está inserida em uma região caracterizada pela produção de cana-de-açúcar e de eucalipto. Dentre os meses de junho a setembro, com o início da colheita de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, há um aumento na concentração de aerossóis em suspensão na atmosfera local. Estes aerossóis são provenientes das queimadas feitas em lavouras de cana-de-açúcar localizadas em varias cidades adjacentes. Segundo Codato et al. (2008), a maior concentração de aerossóis na atmosfera sobre a região de Botucatu é observada no mês de setembro ($PM_{10} = 68,94 \mu\text{g m}^{-3}$), conforme Figura 1.

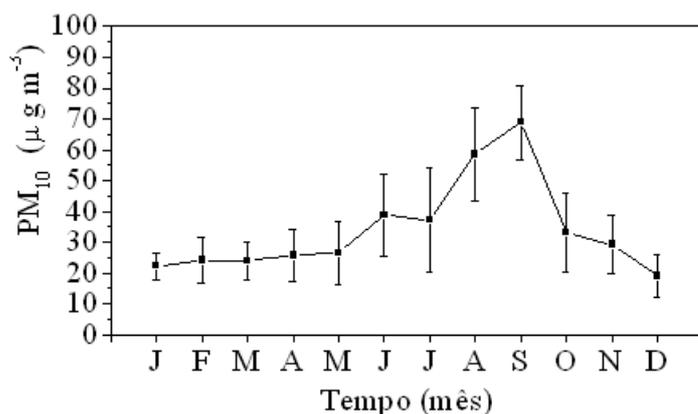


Figura 1 - Evolução sazonal da média mensal diária de material particulado PM_{10} em Botucatu no ano de 2004. Fonte: Codato et al. (2008).

Com o início do período chuvoso e final da colheita de cana-de-açúcar, as concentrações de aerossóis diminuem gradativamente a partir de outubro. Entre os meses de dezembro a maio, a concentração de aerossóis permanece mais ou menos constante, próximo de $25 \mu\text{g m}^{-3}$, resultante basicamente da emissão feita por indústrias e veículos automotores. Porém, desde 2007 a prática das queimadas em lavouras de cana-de-açúcar segue tendência de redução em São Paulo, pois o governo estadual e a ÚNICA (União das Agroindústrias de Cana-de-açúcar de São Paulo) assinaram um protocolo em 2007 com a intenção de acelerar a eliminação da prática da queima de cana-de-açúcar no estado. Os produtores e as agroindústrias sucroalcooleiras que aderiram a este protocolo deverão eliminar gradativamente essa prática agrícola até 2017. Segundo Aguiar et al. (2009), em 2006 mais de 60% das áreas cultivadas no estado ainda eram colhidas após as queimadas.

O clima do município é Cwa pela classificação de Köppen (temperado com verão quente e úmido e inverno seco). Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e o mais frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,26°C e 17,14°C (Figura 2a), enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e menos úmidos, com percentuais de 78,87% e 63,78% respectivamente (Figura 2b).

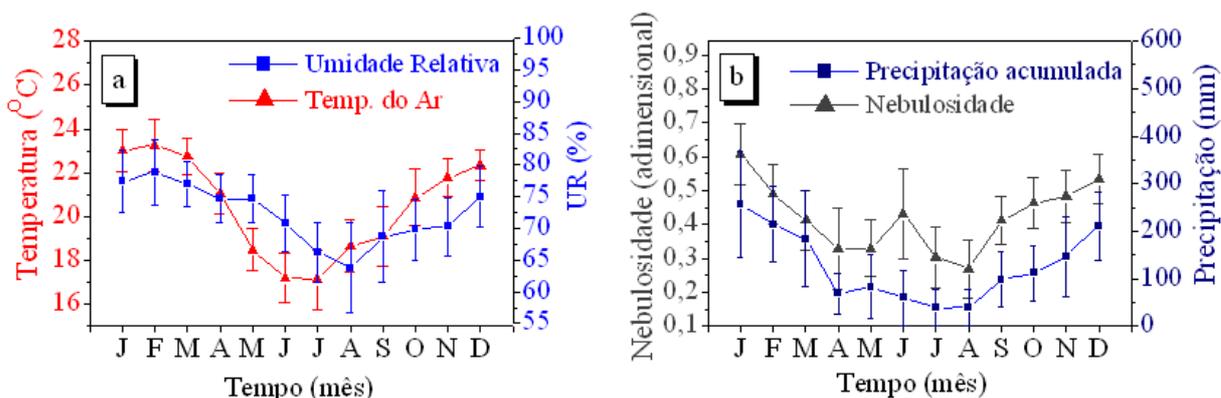


Figura 2 - Médias mensais diárias dos parâmetros meteorológicos (a) temperatura do ar, umidade relativa do ar, (b) razão de nebulosidade e precipitação pluviométrica acumulada em Botucatu/SP, período de 1971 a 2000.

O ciclo anual da chuva é constituído de dois períodos bem distintos. Há um período chuvoso (primavera e verão austrais), onde ocorre de 75 a 90% do total anual de precipitação pluviométrica acumulada; e um período seco (outono e inverno austrais), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100 mm. No primeiro, a ocorrência de chuvas e a elevada nebulosidade são resultantes da formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul e dos Sistemas Frontais (Liebmann et al., 2001; Carvalho et al., 2002). No segundo, há baixa nebulosidade e as chuvas que ocorrem são de média a pequena intensidade e resultantes da passagem de frentes frias (Cavalcanti et al., 1996). O maior valor de precipitação acumulada ocorre no mês de janeiro (288,22 mm), onde a razão de nebulosidade é 0,61, e o menor em agosto (40,69 mm), onde a razão de nebulosidade é 0,27. A razão de nebulosidade citada aqui é definida pela equação $\varphi = 1 - (n/N)$ e expressa o número de horas que o sol ficou encoberto por nuvens numa razão de insolação n/N , onde n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo.

2.2 Instrumentação e obtenção dos dados

Os dados de irradiação solar global na horizontal, expressos em W/m^2 , referentes ao período de janeiro de 1996 a dezembro de 2005, foram medidos na Estação de Radiometria Solar da Faculdade de

Ciências Agrônômicas da UNESP em Botucatu/SP (latitude 22,85°S, longitude 48,43°W, altitude 786m). O sensor utilizado na medição foi um piranômetro PSP da Eppley Laboratory. Esse sensor foi ligado a um sistema de aquisição de dados modelo CR23X da Campbell Scientific, sendo as medições feitas a cada segundo e as médias armazenadas a cada 5 minutos em um módulo de memória SM192 da Campbell Scientific. Os dados armazenados no módulo de memória foram transferidos diariamente para um microcomputador através de uma interface SC532 e do software PC208w da Campbell Scientific.

Os dados de irradiação solar no topo da atmosfera (I_0), expressos em $W m^{-2}$, foram estimados através da Equação 1, conforme Iqbal (1983),

$$I_0 = I_{SC} \cdot E_0 \cdot (\text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\omega) \quad (1)$$

onde: I_{SC} é a constante solar, equivalente a $1367 W m^{-2}$; E_0 o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, expressa em u.a.; δ a declinação solar, expressa em graus; ϕ a latitude local, expressa em graus; e ω o ângulo horário, expresso em graus. O fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, a declinação solar e o ângulo horário solar foram calculados, respectivamente, a partir das Eq. 2, 3 e 4:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221\cos\Gamma + 0,00128\text{sen}\Gamma + 0000719\cos 2\Gamma \quad (2)$$

$$\delta = 23,45 \text{ sen } [(360/365)(DJ + 284)] \quad (3)$$

$$\omega = \arccos(-\text{tg}\phi \cdot \text{tg}\delta) \quad (4)$$

onde: DJ é o dia Juliano; e $\Gamma = 2\pi(DJ - 1)/366$.

Os dados das radiações solar global na horizontal (H_G) e no topo da atmosfera (H_0), nas escalas de tempo horária e diária, foram calculados através da integração das irradiações solar global e no topo da atmosfera nos respectivos intervalos de tempo. A partir dos dados de radiação solar global na horizontal e de radiação solar no topo da atmosfera, foram calculados o dados de índice de claridade (K_T) nas escalas de tempo horária e diária, adimensionais, através da Equação 5 (LIU & JORDAN, 1960):

$$K_T = \frac{H_G}{H_0} \quad (5)$$

onde: H_G é radiação solar global na horizontal, diária ou horária, expresso em $MJ m^{-2}$; e H_0 é a radiação solar no topo da atmosfera, expresso em $MJ m^{-2}$.

Para o tratamento dos dados, cálculos estatísticos e para a confecção dos gráficos, utilizou-se o software ORIGIN 6.0 da Microcal.

2.3 Classificação da cobertura de céu

O critério usado neste trabalho para classificar a cobertura de céu foi o desenvolvido por Escobedo et al. (2009) para Botucatu, SP, Brasil. Essa metodologia classifica a cobertura de céu em quatro tipos em função de K_T . Esta metodologia dispensa o uso de dados de radiação direta e/ou difusa, que são medidas como rotina em poucas estações meteorológicas brasileiras, e considera os seguintes tipos de condição de céu (Figura 3):

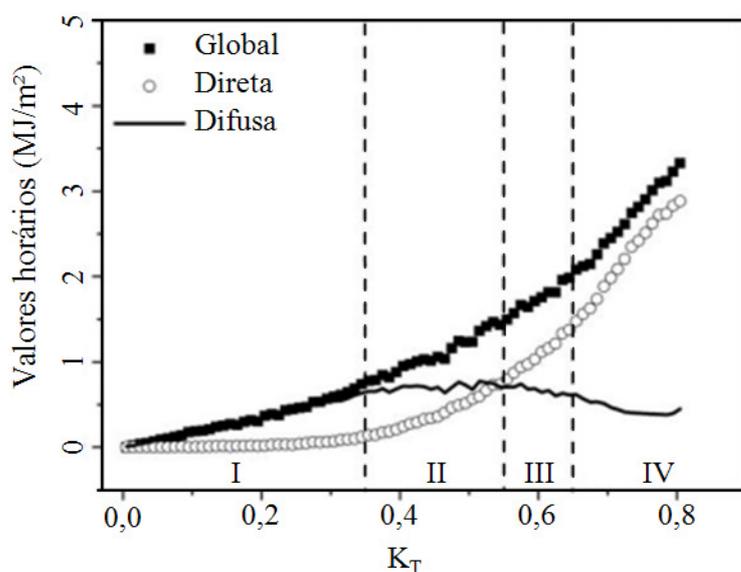


Figura 3 - Evoluções das irradiações global, difusa e direta na horizontal em função de intervalos infinitesimais de K_T . Fonte: Escobedo et al. (2009).

- Condição de céu I, nebuloso: $K_T \leq 0,35$, a radiação direta é praticamente igual a zero, ou seja, a radiação global é composta somente pela radiação difusa;
- Condição de céu II, parcialmente nebuloso com dominância para o difuso: $0,35 < K_T \leq 0,55$, a radiação global é composta de uma maior parcela da radiação difusa que decresce variando gradativamente entre 88 a 50% da radiação global;
- Condição de céu III, parcialmente nebuloso com dominância para o claro: $0,55 < K_T \leq 0,65$, a radiação global é composta de uma maior parcela da radiação direta, que aumenta gradativamente enquanto a radiação difusa diminui variando entre 50 a 30% da radiação global;
- Condição de céu IV, claro: $K_T > 0,65$, a radiação global é composta predominantemente pela radiação direta.

No estudo da evolução diurna, a partir dos dados horários de K_T calculados, classificou-se a base total de dados em com cobertura de céu I, II, III ou IV. Em seguida, fez-se a distribuição de frequência da base total de dados para cada uma das coberturas de céu, horas do fotoperíodo e meses do ano. As frequências horárias mensais de cada uma das coberturas de céu foram determinadas a partir da distribuição de frequência da base total de dados para cada uma das coberturas de céu e meses do ano. A base de dados horária possuía medições completas de 96% do período entre 1996 a 2005. E no estudo da evolução anual, para determinação das frequências mensais das coberturas de céu, classificaram-se os dias da base total de dados em com cobertura de céu I, II, III ou IV. Em seguida, fez-se a distribuição de frequência da base total de dados para cada uma das coberturas de céu e meses do ano. A base de dados dos valores diários de K_T possui medições completas de 95% do período entre janeiro de 1996 a dezembro de 2005.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução diurna das frequências horárias mensais das coberturas de céu

Na Figura 4 abaixo, é apresentada a evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu I (ou céu nebuloso) entre os meses de janeiro a dezembro.

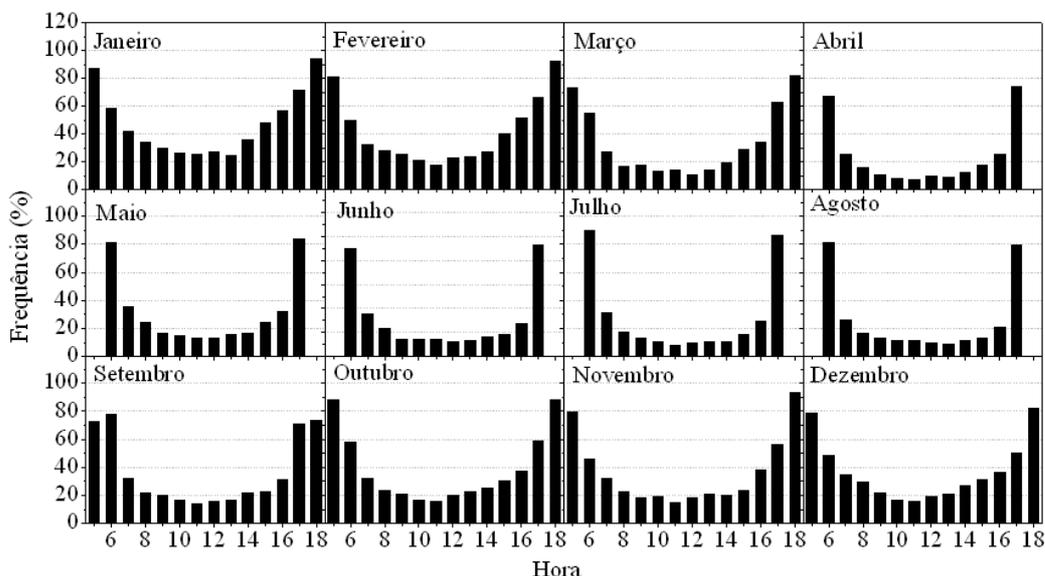


Figura 4 - Evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu I (ou céu nebuloso).

A evolução diurna da frequência horária mensal para a cobertura de céu I, em todos os meses, possui um comportamento similar. Os valores de frequência decrescem a partir dos intervalos horários do

nascer e pôr-do-sol, onde a massa ótica é maior, para os intervalos horários de maior ângulo de elevação solar, quando é menor massa ótica. Ou seja, o comportamento das curvas dos valores de frequência é resultado da maior atenuação da radiação solar nos horários próximos ao nascer e pôr-do-sol. Nesses horários o trajeto percorrido ao longo da atmosfera pelo feixe de radiação é maior em relação aos demais horários. A atenuação ocorre pela interação da radiação solar com os constituintes atmosféricos (gases, aerossóis e nuvens) nos processos físicos de espalhamento, absorção e reflexão (IQBAL, 1983; LIOU, 2002). Observa-se também que os valores de frequência da cobertura de céu I, ao longo de todo o fotoperíodo, são maiores durante o verão austral, quando a concentração de nuvens e vapor de água na atmosfera são as maiores do ano. O contrário ocorre durante o inverno austral, quando os valores de frequência são menores em relação aos demais meses, pois é normalmente o período mais seco e menos nebuloso do ano. O mês de janeiro apresentou a maior frequência da cobertura de céu I, ao longo da evolução diurna, e agosto a menor. Conforme Figura 5a abaixo, em janeiro ocorre a cobertura de céu nebuloso em aproximadamente 46,91% do fotoperíodo, enquanto em agosto a frequência foi de 25,27%.

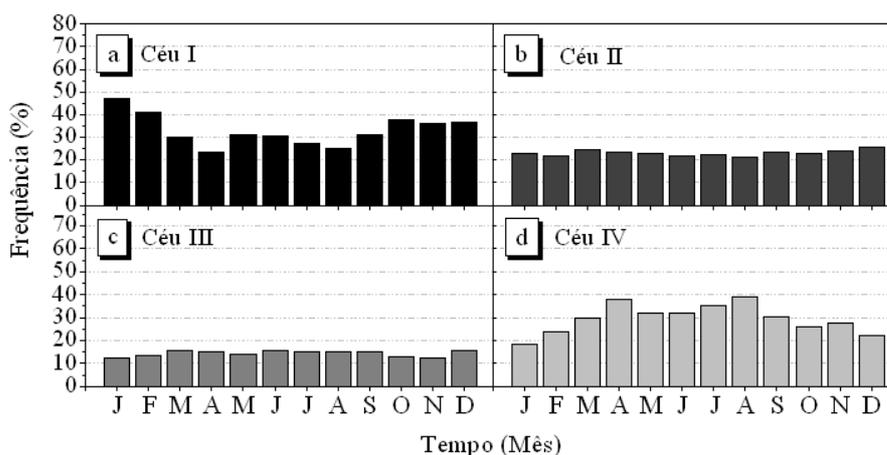


Figura 5 - Evolução anual da frequência horária mensal das coberturas de céu (a) I, (b) II, (c) III e (d) IV.

Na Figura 6 abaixo, é apresentada a evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu II (ou céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso) entre os meses de janeiro a dezembro.

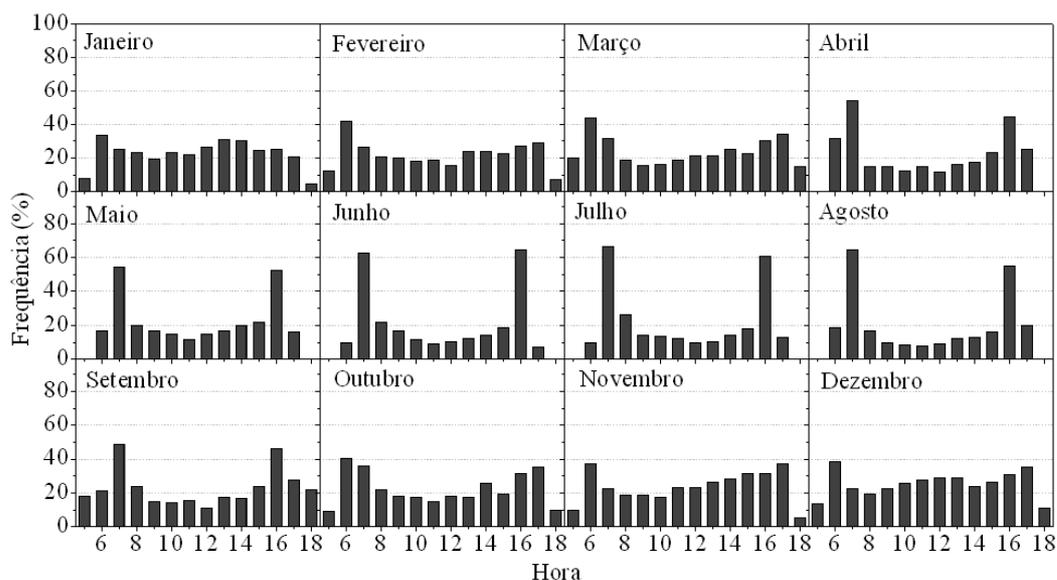


Figura 6 - Evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu II, período de 1996 a 2005.

Conforme Figura 6, a cobertura de céu II apresenta em todos os meses os menores valores de frequência nos horários do nascer e pôr-do-sol, onde predomina a cobertura de céu I. As maiores frequências ocorrem no sentido do segundo e penúltimo intervalo horário para os próximos do meio dia local. Similar a cobertura de céu I, os valores de frequência da condição de céu II são maiores durante o período chuvoso do ano e menores durante o seco. Observa-se também que, durante o período chuvoso, as frequências das coberturas de céu I e II são maiores no período vespertino. Na evolução diurna, o mês de janeiro apresentou a maior frequência da cobertura de céu II e agosto a menor. Em janeiro a frequência foi de 25,43% do fotoperíodo e em agosto 20,96% (Figura 5b), apresentando uma baixa amplitude de variação (4,47%).

Em relação à cobertura de céu III, conforme Figura 7 abaixo, os valores de frequência são maiores na terceira e na antepenúltima hora do fotoperíodo e decrescem a partir destes intervalos horários no sentido do meio dia local. No período chuvoso do ano, quando há maior concentração de nuvens e vapor de água na atmosfera, os valores de frequência são menores e relativamente uniformes. Essa redução nos valores de frequência da cobertura de céu III é resultante do aumento na atenuação da radiação solar por nuvens e vapor de água, sendo acompanhados de aumento nas frequências das coberturas de céu I e II. O mês de dezembro apresentou a maior frequência da cobertura de céu III, ao longo da evolução diurna, e novembro a menor. No mês de dezembro, em 15,8% do fotoperíodo ocorreram cobertura de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro e em janeiro 12,21% (Figura 5c). Similar a cobertura de céu II, a cobertura de céu III também apresentou baixa amplitude de variação nos valores de frequência horária mensal (3,59%), mantendo uma curva com comportamento próximo do linear (Figura 5c).

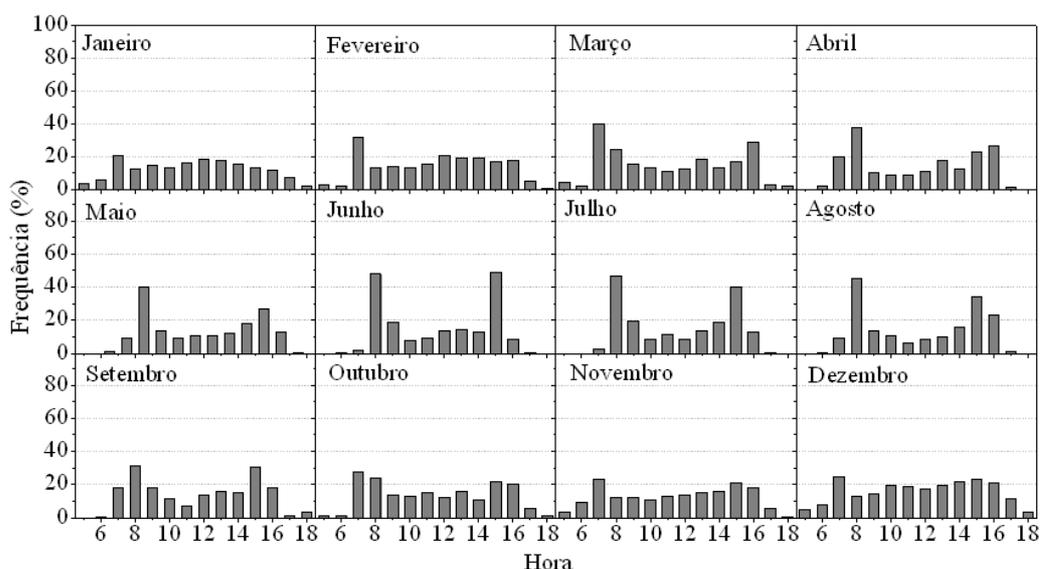


Figura 7 - Evolução diurna da média horária mensal da cobertura de céu III, período de 1996 a 2005.

Na Figura 8 é apresentada a evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu IV. Verifica-se que as curvas dos valores de frequência apresentam comportamento similar em todos os meses. Como uma função parabólica, os valores de frequência aumentam a partir do nascer-do-sol, passam por um valor máximo no intervalo horário de maior ângulo de elevação solar ou em intervalos próximos dele, e decrescem posteriormente até o pôr-do-sol.

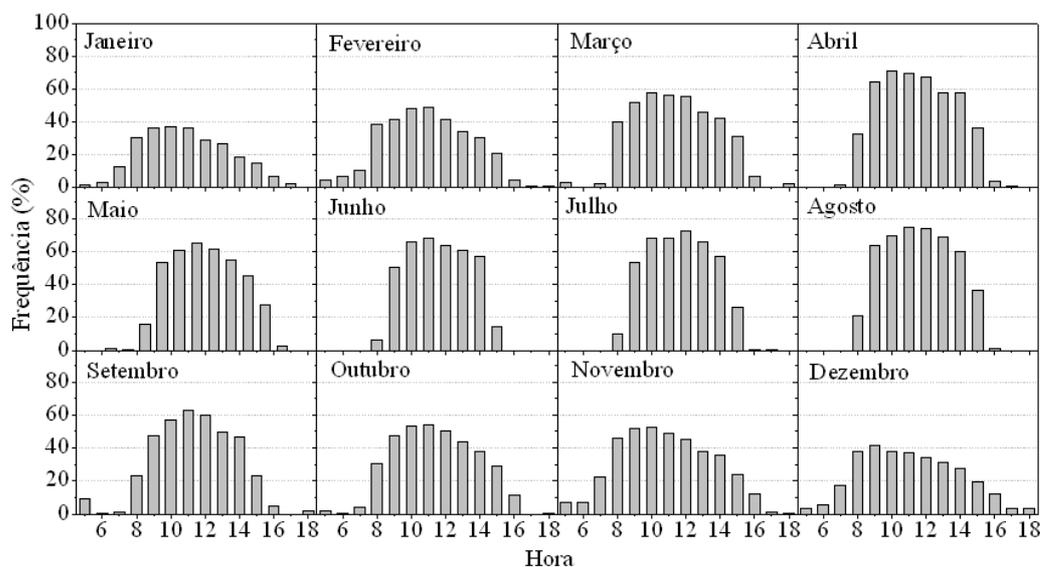


Figura 7 – Evolução diurna da frequência horária mensal da cobertura de céu IV, período de 1996 a 2005.

A frequência da cobertura de céu IV, ao longo do fotoperíodo, é maior nos meses secos do ano. Este padrão de variação é resultante da predominância de condições atmosféricas de baixa nebulosidade e concentração de vapor de água. O mês de agosto apresentou a maior frequência da condição de céu IV ao longo do fotoperíodo e janeiro a menor. Em agosto 38,81% do fotoperíodo apresentou atmosfera com cobertura de céu claro e em janeiro 18,17%.

3.2 Evolução anual das frequências diárias mensais

Na Figura 8 é apresentada a evolução anual da frequência diária mensal das coberturas de céu em Botucatu.

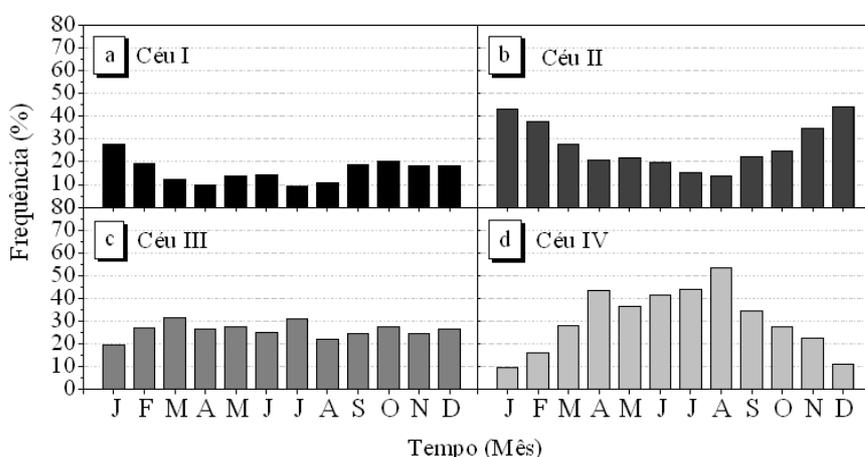


Figura 8 – Evolução anual da frequência diária mensal, período de 1996 a 2005, das coberturas de céu: (a) I; (b) II; (c) III e (d) IV.

As curvas de valores de frequência das coberturas de céu I e IV (Figuras 8a e 8d) seguem o mesmo padrão de comportamento observado nas curvas de frequência horária mensal (Figuras 5a e 5d). A frequência de dias com condição de céu I é maior durante o período chuvoso do ano e menores durante o período seco. As exceções são os meses de maio e junho, nos quais há um aumento na frequência da cobertura de céu I resultante das entradas de frentes frias. O mês de janeiro apresentou a maior frequência de dias com cobertura de céu I (27,74%) e julho a menor (9,42%). O oposto é observado para a cobertura de céu claro, para o qual a frequência é maior durante o período seco do ano e menores durante o período chuvoso. A maior frequência de dias com cobertura de céu IV foi observada em agosto (53,55%) e a menor em janeiro (9,68%).

Em relação à cobertura de céu II, diferente da curva de valores de frequência horária mensal (Figura 5b), a curva de valores de frequência diária mensal apresentou elevada amplitude de variação

(31,46%). Os valores de frequência são maiores durante o período chuvoso do ano e menores durante o período seco. Esse padrão de variação é similar ao observado para a cobertura de céu I (Figura 8a), sendo em ambos os casos resultado principalmente da formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e dos Sistemas Frontais (SF). Juntos, estes sistemas sinóticos são os principais determinantes do padrão de variação das coberturas de céu em grande parte do estado de São Paulo (Cavalcanti, 1996). Respondem pela redução da condição de céu IV para a de céu I ou II, através do aumento da nebulosidade e da concentração de vapor de água na atmosfera. A ZCAS é caracterizada como uma banda persistente de nebulosidade, que se estende desde o sul da Amazônia até o Atlântico Sul-Central e gera a ocorrência de chuvas intensas e persistentes durante o verão austral (Liebmann et al., 2001; Carvalho et al., 2002). Os SF são resultantes principalmente da passagem de frentes frias, e geram aumento da nebulosidade e/ou ocorrência de chuvas de baixa à média intensidade durante todo o ano, porém com maior frequência durante o outono e primavera austrais (Cavalcanti, 1996).

Para a cobertura de céu III, os valores de frequência diária mensal variaram de 31,60% em abril a 19,68% em janeiro.

4 CONCLUSÕES

As frequências das coberturas de céu claro e de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro são maiores durante o período seco do ano e nos horários próximos ao meio dia, quando a atenuação da radiação solar ao longo da atmosfera é menor. A baixa concentração de vapor de água na atmosfera entre os meses de abril a setembro e a menor massa óptica durante os horários próximos ao meio dia determinam esse padrão de variação. E a frequência é menor durante o período chuvoso do ano e nos horários próximos ao nascer e pôr-do-sol, quando há predominância das coberturas de céu I e II.

Observa-se também que, ao longo do ano em Botucatu, há predominância de dias com condições atmosféricas de baixa nebulosidade, nos quais a radiação global é composta por uma maior parcela de radiação direta em relação à difusa. Em aproximadamente 114 dias do ano ocorrem cobertura de céu claro, sendo janeiro o mês com menor frequência (3 dias) e agosto o de maior (17 dias). Essa frequência é superior a encontrada por Codato et al. (2008), para a cidade São Paulo (latitude 23,55°S, longitude 46,73°W, altitude 742), Brasil, onde ocorre em média 17 dias do ano com cobertura de céu claro. São Paulo é uma cidade urbana de clima subtropical úmido (Cfa pela classificação de Köppen). E a frequência está próxima a encontrada por Ogunjobi et al. (2002) para Ile-Ife (latitude 7,14°N, longitude 4,56°E, altitude 244 m), na Nigéria, com 117 dias do ano, e por Kudish & Ianetz (1996) para Beer Sheva (latitude 31,25°N, longitude 34,75°E, altitude 315 m), em Israel, com 142 dias do ano. Ile-Ifé é uma cidade rural de clima tropical com

inverno seco (Aw pela classificação de Köppen) e Beer Sheva é urbana de clima semiárido (BSh pela classificação de Köppen).

5 REFERÊNCIAS

ACKERMAN, A. S. et al. Reduction of Tropical Cloudiness by Soot. **Science**, New York, v. 288, p. 1042-1047, 2000.

AGUIAR, D. A. et al. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p. 440-451, 2009.

ALI RAHOMA, U. Clearness index estimation for spectral composition of direct and global solar radiations. **Applied Energy**, Stockholm, v. 68, p. 337-346, 2001.

AL-LAWATI, A. et al. Monthly average daily solar radiation and clearness index contour maps over Oman. **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 44, p. 691-705, 2003.

BOLSENGA, S. J. Near infrared radiation in Northern Greenland. **Jornal Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 6, p. 449-451, 1997.

CARVALHO, L. M. V. et al. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Jornal of Climate**, v. 15, p. 2377-2394, 2002.

CAVALCANTI, I. F. A. Previsão climática no CPTEC. **Revista Climanálise**, Cachoeira Paulista, Edição comemorativa de 10 anos, p.229-235, 1996.

CODATO, G. et al. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theory and Applied Climatology**, Hamburg, v. 93, p. 57-73, 2008.

ELHADIDY, M. A. et al. Ultraviolet solar radiation at Dhahram (Saudi Arabia). **Solar Energy**, Oxford, v. 44, p. 315-324, 1990.

ESCOBEDO, J. et al. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, Stockholm, v. 86, p. 299-309, 2009.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. London: Academic Press., 1983. 390 p.

LIEBMANN, B. et al. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, p. 1877-1891, 1999.

LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. San Diego: Elsevier Science, 2002. 584 p.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, Oxford, v. 3, n. 4, p. 1-19, 1960.

LI, D. H. W; LAM, J. C. An analysis of climatic parameters and sky condition classification. **Building and Environment**, West Lafayette, v. 36, n. 4, p. 435-450, 2000.

KAUFMAN, Y. J.; KOREN, I. Smoke and pollution aerosol effect on cloud cover. **Science**, Washington, v. 313, p. 655-658, 2006.

KHOGALI, A.; AL-BAR, O. F. Study of solar ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. **Solar Energy**, Oxford, v. 48, p. 79-87, 1992

KUDISH, A. I.; IANETZ, A. Analysis of daily clearness index, global and beam radiation for beer sheva, Israel: partition according to day type and statistical analysis. **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 37, n. 4, p. 405-416, 1996.

MOSALAM SHALTOUT, M. A. et al. Total suspended particles and solar radiation over Cairo and Aswan. **Renewable Energy**, Brighton, v. 23, p. 605-619, 2001.

PATTANASETHANON, S. et al. All sky modeling daylight availability and illuminance/irradiance on horizontal plane for Mahasarakham, Thailand. **Energy Conversion & Management**, Belton, v. 48, p. 1601-1614, 2007.

PEREZ, R. et al. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, Oxford, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990.

OKOGBUE, E. C. et al. Hourly and daily clearness index and diffuse fraction at a tropical station, Ile-Ife, Nigéria. **International Journal of Climatology**, Hoboken, v. 29, p. 1035-1047, 2009.

RAMANATHAN, V. et al. Atmosphere - Aerosols, climate, and the hydrological cycle. **Science**, Washington, v. 294, p. 2119-2124, 2001.

ROBAA, S.M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban área, Egypt. **Solar Energy**, Oxford, v. 77, p. 251-259, 2004.

ROSENFELD, D. Suppression of rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. **Science**, New York, v. 287, 2000.

WIELICKI, B. A. et al. Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite. **Science**, New York, v. 308, p. 825, 2005.