

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CÉU EM  
FUNÇÃO DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS EM BOTUCATU-SP**

**ÉRICO TADAO TERAMOTO**

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. João Francisco Escobedo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP

AGOSTO – 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Teramoto, Érico Tadao, 1983-  
T315d Distribuição de frequência das condições de céu em função das variações climáticas em Botucatu-SP / Érico Tadao Teramoto. - Botucatu: [s.n.], 2010  
xii, 65 f.: il., color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu, 2010  
Orientador: João Francisco Escobedo  
Inclui bibliografia.

1. Radiação solar. 2. Condição de céu. 3. Nebulosidade. 4. Índice de claridade. I. Escobedo, João Francisco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: “DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE CÉU EM  
FUNÇÃO DAS VARIAÇÕES CLIMÁTICAS EM BOTUCATU-SP”**

**ALUNO: ÉRICO TADAO TERAMOTO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO**

Aprovado pela Comissão Examinadora



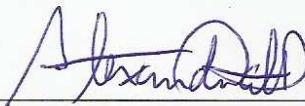
---

PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



---

PROF. DR. EDUARDO NARDINI GOMES



---

PROF. DR. ALEXANDRE DAL PAI

Data da Realização: 18 de junho de 2010.

Ao meu pai Elísio e minha mãe Tacaco, pelo carinho e atenção dados, por tudo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me permitir chegar até aqui.

À todos que estiveram ao meu lado durante estes dois anos de mestrado e que, mesmo sem perceberem, me ensinaram mais do que posso expressar em palavras, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

Ao orientador e amigo, Prof. Dr. João Francisco Escobedo, pela oportunidade e apoio na realização deste trabalho, sem o qual nada disto poderia ter-se realizado.

Ao Grupo de Radiometria Solar, os “Escobedos Rangers”, pela amizade, apoio técnico e pelos momentos e histórias engraçados vividos e compartilhados, sempre no caminho do bem.

À minha namorada, amiga e companheira Taiza que esteve ao meu lado, me apoiando e não me deixando desanimar.

Aos professores e funcionários do Departamento de Recursos Naturais, pelo apoio e serviços prestados ao longo do curso.

A todos os professores do curso de pós-graduação em Energia na Agricultura.

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por ter me proporcionado a oportunidade de realizar esta pesquisa, através do apoio financeiro.

## ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS .....	VI
ILISTA DE FIGURAS .....	VIII
ILISTA DE SIMBOLOS .....	X
RESUMO .....	1
SUMMARY .....	3
1 INTRODUÇÃO .....	5
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	7
2.1 Interação da radiação solar com a atmosfera .....	7
2.1.1 Influência da nebulosidade sobre a radiação solar .....	8
2.1,2 Influência dos aerossóis sobre a radiação solar .....	9
2.2 Caracterização da condição de céu .....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	14
3.1 Localização e clima .....	14
3.2 Instrumentação e obtenção dos dados .....	17
3.3 Avaliação dos dados e cálculos .....	19
3.4 Estatística .....	21
3.4.1 Cálculos das médias .....	21
3.4.2 Caracterização das condições de céu e distribuição de frequência .....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	24
4.1 Análise da radiação global e do índice de claridade no decênio 1996 a 2005 .....	24
4.2. Distribuição da frequência anual diária. ....	28
4.2.1 Influência de fenômenos climáticos de micro escala sobre as condições de céu .....	31
4.2.2 Influência de fenômenos climáticos de macro escala sobre as condições de céu .....	35
4.3 Distribuição das frequências relativas mensais diárias .....	36
4.3.1 Efeito dos aerossóis sobre a frequência das condições de céu .....	41
4.4 Distribuição de frequência diurna .....	43

4.4.1 Distribuição de frequência diurna média horária anual .....	43
4.4.2 Distribuição de frequência diurna média horária mensal .....	47
5 CONCLUSÕES .....	56
6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	61

.

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta .....	18
2 Valor da frequência entre os anos de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV .....	29
3 Valores de desvio relativo das frequências entre os anos de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV .....	33
4 Valores referentes à: nebulosidade média mensal, período de 1996 a 2005; precipitação acumulada mensal, período de 1996 a 2005; e profundidade ótica de aerossóis (AOD), período de 2000 a 2005 .....	37
5 Valor da frequência média diária mensal, período de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV.....	40
6 Evolução diurna da frequência anual horária, no período de 1996 a 2005, das condições de céu: I, II, III e IV .....	45
7 Frequência média mensal horária da condição de céu I, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005 .....	49
8 Frequência mensal horária da condição de céu II, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005 .....	51
9 Frequência média mensal horária da condição de céu III, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005 .....	53
10 Frequência de dias com condição de céu IV, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005 .....	55



## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Irradiância solar global (linha contínua na cor preta) e difusa (linha tracejada na cor vermelha) medidos em dois dias diferentes em Botucatu/SP: a) Céu totalmente coberto por nuvens, no dia 28/01/2005; b) Céu sem nuvens, no dia 03/06/2005 .....	9
2 Evolução anual da frequência das condições de céu nebuloso, parcialmente nebuloso e claro em Beer Sheva (Kudish e Ianetz,1996) .....	13
3 a) Evolução anual da temperatura média diária mensal (período de 1983 a 2005); b) Evolução anual da umidade média diária mensal (período de 1983 a 2005); c) Evolução anual da precipitação acumulada média diária mensal (período de 1983 a 2005) .....	15
4 Relação entre a evolução anual da Profundidade ótica de aerossóis AOD (dados obtidos do satélite TERRA) e do PM <sub>10</sub> (Codato et al., 2008) no ano de 2004 .....	16
5 Evoluções das radiações global, difusa e direta na horizontal, médias de 5 minutos, em função de intervalos infinitesimais de K <sub>T</sub> . Fonte: Escobedo et al. (2009) .....	22
6 Evolução da irradiação global (MJ/m <sup>2</sup> ) no período de 1996 a 2005.....	24
7 a) Nebulosidade média diária anual, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada anual, período de 1996 a 2005; c) Profundidade ótica de aerossóis média diária anual (AOD), período de 2000 a 2005 .....	25
8 Evolução do índice de claridade K <sub>T</sub> médio anual diário, período de 1996 a 2005.	27
9 Distribuição de frequência, entre os anos de 1996 a 2005, para as condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV .....	28

10	a) Nebulosidade média diária anual, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada anual, período de 1996 a 2005 .....	31
11	Desvio relativo da média da frequência entre os anos de 1996 a 2005 para as quatro condições de céu: a) I; b) II; c) III; d) IV .....	32
12	a) Desvio relativo da nebulosidade, período de 1996 a 2005; b) Desvio relativo da precipitação acumulada, período de 1996 a 2005 .....	34
13	a) Nebulosidade média diária mensal, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada média mensal, período de 1996 a 2005; c) Profundidade ótica de aerossóis (AOD) média diária mensal, período de 2000 a 2005 .....	37
14	Evolução anual da frequência média diária mensal, período de 1996 a 2005, das condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV .....	39
15	a) Frequência mensal diária, em setembro no período de 2000 a 2005, das quatro condições de céu; b) Média diária mensal da nebulosidade e AOD e frequência de dias com ocorrência de precipitação .....	42
16	Evolução diurna da frequência anual horária, no período de 1996 a 2005, das condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV .....	44
17	Evolução diurna do $K_T$ médio anual horário no período de 1996 a 2005 .....	45
18	Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu I, no período de 1996 a 2005 .....	48
19	Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu II, no período de 1996 a 2005 .....	50
20	Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu III, no período de 1996 a 2005 .....	52
21	Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu IV, no período de 1996 a 2005 .....	54

## LISTA DE SIMBOLOS

IV	Condição de céu claro.
I	Condição de céu nebuloso.
III	Condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro.
II	Condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso.
$I_{SC}$	Constante solar (1367 W/m <sup>2</sup> ).
$\delta$	Declinação solar (graus).
D	Desvio relativo (porcentagem).
$E_0$	Fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (u.a.).
N	Fotoperíodo (horas).
$F_a^d$	Frequência anual diária (percentual).
$F_a^h$	Frequência anual horária (percentual).
$\overline{F_a^d}$	Frequência média diária anual (percentual).
$\overline{F_a^h}$	Frequência média anual horária (percentual).
$\overline{F_m^d}$	Frequência média diária mensal (percentual).
$\overline{F_m^h}$	Frequência média mensal horária (percentual).
$F_m^d$	Frequência mensal diária (percentual).
$F_m^h$	Frequência mensal horária (percentual).
$\Delta$	Índice de brilho do céu.
$K_T$	Índice de claridade (adimensional)
$\varepsilon$	Índice de claridade de Perez et a. (1990).
$\left[ \overline{K_T^d} \right]$	Índice de claridade médio anual diário (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\left[ \overline{K_T^h} \right]$	Índice de claridade médio anual horário (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{K_T^d}$	Índice de claridade médio mensal diário (adimensional)
$\overline{K_T^h}$	Índice de claridade médio mensal horário (adimensional)

$\langle \overline{K_T^d} \rangle$	Índice de claridade médio mensal diário de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\langle \overline{K_T^h} \rangle$	Índice de claridade médio mensal horário de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{\{K_T^d\}}$	Índice de claridade médio anual diário de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{\{K_T^h\}}$	Índice de claridade médio anual horário de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$I_b$	Irradiância direta na incidência (W/m <sup>2</sup> ).
$I_G$	Irradiância global na superfície horizontal (W/m <sup>2</sup> ).
$I_o$	Irradiância no topo da atmosfera (W/m <sup>2</sup> ).
$\phi$	Latitude (graus).
$f$	Nebulosidade (adimensional).
$\overline{f_a^d}$	Nebulosidade média diária anual (adimensional).
$\overline{f_m^d}$	Nebulosidade média diária mensal (adimensional).
$\langle \overline{f_a^d} \rangle$	Nebulosidade média diária anual de 10 anos (adimensional).
$\langle \overline{f_m^d} \rangle$	Nebulosidade média diária mensal de 10 anos (adimensional).
$n$	Número de horas de brilho solar (horas).
$P$	Precipitação acumulada (mm).
$P_a$	Precipitação acumulada anual (mm).
$\overline{P_a}$	Precipitação acumulada média anual (mm).
$\overline{P_m}$	Precipitação acumulada média mensal (mm).
$P_m$	Precipitação acumulada mensal (mm).
AOD	Profundidade óptica de aerossóis.
$\overline{AOD_a^d}$	Profundidade óptica de aerossóis média diária anual.
$\overline{AOD_m^d}$	Profundidade óptica de aerossóis média diária mensal.
$\langle \overline{AOD_a^d} \rangle$	Profundidade óptica de aerossóis média diária anual de 5 anos (adimensional).
$\langle \overline{AOD_m^d} \rangle$	Profundidade óptica de aerossóis média diária mensal de 5 anos (adimensional).

$H_G^d$	Radiação global diária (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{[H_G^d]}$	Radiação global média diária anual (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{H_G^d}$	Radiação global média diária mensal (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{\langle H_G^d \rangle}$	Radiação global média diária mensal de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\{ \overline{H_G^d} \}$	Radiação global média diária anual de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$H_G^h$	Radiação global na superfície horizontal horária (MJ/m <sup>2</sup> /hora).
$H_o^d$	Radiação no topo da atmosfera diária (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$H_o^h$	Radiação no topo da atmosfera horária (MJ/m <sup>2</sup> /hora).
$\overline{[H_o^d]}$	Radiação no topo da atmosfera média diária anual (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\{ \overline{H_o^d} \}$	Radiação no topo da atmosfera média diária anual de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{H_o^d}$	Radiação no topo da atmosfera média diária mensal (MJ/m <sup>2</sup> /dia).
$\overline{\langle H_o^d \rangle}$	Radiação no topo da atmosfera média diária mensal de 10 anos (MJ/m <sup>2</sup> /dia).

## RESUMO.

O estudo das condições médias de céu de um determinado local permite conhecer a dinâmica da variação dos níveis de energia solar, além de servir como parâmetro na estimativa de radiações a partir de modelos estatísticos, ambos úteis em estudos e projetos de aproveitamento da energia solar nos processos térmico e fotovoltaico, de ambiência, no planejamento e desenvolvimento turístico, secagem de produtos agrícolas, entre outros. Este trabalho apresenta uma análise estatística e climática da variação das condições de céu em Botucatu/SP, com base no índice de claridade  $K_T$ , no período de 1995 a 2006. Foram determinadas as frequências diárias, anual média  $\overline{F_a^d}$  e mensal média  $\overline{F_m^d}$ , e as frequências horárias, anual média  $\overline{F_a^h}$  e mensal média  $\overline{F_m^h}$ , das condições de céu: nebuloso ( $K_T < 0,35$ ); parcialmente nebuloso com dominância para o difuso ( $0,35 < K_T \leq 0,55$ ); parcialmente nebuloso com dominância para o claro ( $0,55 < K_T \leq 0,65$ ) e claro ( $K_T > 0,65$ ). A evolução da frequência anual da  $F_a^d$  das quatro condições de céu mostrou não haver tendência sistemática de crescimento ou de decréscimo em nenhuma das condições de céu, em função das variações climáticas de micro e macro escala. A  $\overline{F_a^d}$  da condição de céu nebuloso foi de  $16,7\% \pm 2,41$ ; para parcialmente nebuloso com dominância para o difuso foi de  $25,6\% \pm 3,3$ ; para parcialmente nebuloso com dominância para o claro foi de  $26,4\% \pm 3,6$ ; e para claro foi de  $31,2\% \pm 6,7$ . Na evolução da frequência diária mensal média  $\overline{F_m^d}$ , a  $\overline{F_m^d}$  para nebuloso foi maior em janeiro ( $29,78\% \pm 12,82$ ) e menor em julho ( $9,50\% \pm 5,43$ ); para parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, foi maior em janeiro ( $41,23\% \pm 7,76$ ) e menor em agosto ( $13,57\% \pm 7,08$ ); para parcialmente nebuloso com dominância para o claro, foi maior em julho ( $30,60\% \pm 12,80$ ) e menor em janeiro ( $21,29\% \pm 10,59\%$ ); e para claro, maior em

agosto ( $53,80\% \pm 20,20$ ) e menor em janeiro ( $7,70\% \pm 5,08$ ). A evolução da frequência horária anual média  $F_a^h$  mostrou que, para as condições de céu nebuloso, parcialmente nebuloso com dominância para o difuso e parcialmente nebuloso com dominância para o claro, em função da massa ótica, os valores de  $F_a^h$  dessas condições em todos os meses decresce dos intervalos horários do início e fim do dia no sentido dos intervalos horários no meio do dia; e para a condição de céu claro, a  $F_a^h$  evoluiu inversamente proporcional à evolução diurna da massa ótica.

Palavra-chave: Radiação solar, condição de céu, nebulosidade, índice de claridade.

DISTRIBUTION OF FREQUENCY OF SKY CONDITIONS AS FUNCTION OF CLIMATE VARIATIONS IN BOTUCATU/SP. Botucatu, 2010. 65p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ÉRICO TADAO TERAMOTO

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

## SUMMARY

The study of the average sky conditions in a particular location give informations about the dynamics of variation in levels of solar energy, besides serving as a parameter in the estimation of radiations from statistical models, both working on studies and projects in solar energy thermal and photovoltaic processes, ambience, planning and tourism development, drying agricultural products, among others. This paper present a statistical analysis and climatical of the variations in sky conditions in Botucatu/SP, based on the clearness index  $K_T$  for the period 1995 to 2006. Were determined the daily frequency of, monthly average  $\overline{F_a^d}$  and annual average  $\overline{F_m^d}$ , and the hourly frequencies, annual average  $\overline{F_m^d}$  and monthly average  $\overline{F_m^h}$  of the sky conditions: cloudy ( $K_T < 0.35$ ), partly cloudy with dominance for the diffuse ( $0.35 < K_T \leq 0.55$ ), partly cloudy with dominance for the clear ( $0.55 < K_T \leq 0.65$ ) and clear ( $K_T > 0.65$ ). The evolution of the daily annual frequency  $F_a^d$  to the four sky conditions no showed systematic tendency to increase or decrease in any of the sky condition, depending on the climatic variations of micro and macro scale. The  $\overline{F_a^d}$  of the sky condition cloudy was  $16.7\% \pm 2.41$ ; for partly cloudy with dominance for the diffuse was  $25.6\% \pm 3.3$ ; for partly cloudy with dominance for the clear was  $26.4\% \pm 3.6$ ; and clear was  $31.2\% \pm 6.7$ . In the evolution of daily monthly average frequency  $\overline{F_m^d}$ , the  $\overline{F_m^d}$  for the cloudy was highest in January ( $29.78\% \pm 12.82$ ) and lowest in July ( $9.50\% \pm 5.43$ ); for partly cloudy with dominance for the diffuse, was highest in January ( $41.23\% \pm 7.76$ ) and lowest in August ( $13.57\% \pm 7.08$ ); for partly cloudy with dominance for the clear, was highest in July ( $30.60\% \pm 12.80$ ) and lowest in January ( $21.29\% \pm 10.59$ ); and to clear, was highest in August ( $53.80\%$



$\pm 20.20$ ) and lowest in January ( $7.70\% \pm 5.08$ ). The evolution of the hourly annual average frequency  $F_a^h$  showed that for the sky condition cloudy, partly cloudy with dominance for the diffuse and partly cloudy with dominance for the clear that, in function of the optical mass, the values of  $F_a^h$  to these sky conditions in all months decreases in hourly intervals from the beginning and end of the day in the sense of time slots in the noon; and for the sky condition clear, the  $F_a^h$  evolved inversely proportional to the diurnal evolution of the mass optical.

---

Keywords: Solar radiation, sky condition, cloudiness, clearness index

## 1 INTRODUÇÃO

A quantidade de radiação solar global incidente em qualquer localidade na superfície terrestre depende basicamente dos fatores astronômicos e geográficos, facilmente determinada da geometria solar, e das características climáticas locais, que diz respeito principalmente as concentrações de vapor de água, aerossóis e nuvens presentes na atmosfera, que são altamente variáveis no tempo e determinantes na transmissividade atmosférica. As nuvens reduzem a componente direta dentro da radiação solar global por difusão e reflexão e, junto do vapor de água, é a principal atenuadora da radiação solar global ao absorverem grande parcela da fração infravermelho. Esta fração corresponde a aproximadamente 50% da radiação solar global (BOLSENGA, 1997; ALI ROHAMA, 2001; MOSALAM SHALTOUT et al., 2001; ESCOBEDO et al., 2008). Os aerossóis afetam diretamente o balanço de radiação solar global, através da absorção da fração UV ou da difusão e reflexão da componente direta da radiação solar global, e indiretamente ao alterarem o ciclo de água regional (RAMANATHAN et al. 2001) e a nebulosidade (KAUFMAN & KOREN, 2006), pois uma parte dos aerossóis atua na atmosfera como núcleos de condensação de nuvens, formando nuvens e alterando suas propriedades físicas e tempo de vida (ROSENFELD, 2000; ABEL et al., 2005; LIN et al., 2006).

Dada a considerável influência das nuvens sobre a radiação solar global, o estudo das condições médias de céu de um determinado local, que diz respeito às condições de cobertura do céu por nuvens, permite conhecer a dinâmica da variação dos níveis de energia solar, além de servir como parâmetro na estimativa de radiações a partir de modelos estatísticos, ambos úteis em estudos e projetos de aproveitamento da energia solar nos processos térmico e fotovoltaico, de ambiência (voltados à otimização do uso de iluminação

elétrica e de aparelhos de ar condicionado), no planejamento e desenvolvimento turístico, secagem de produtos agrícolas, entre outros.

Este trabalho teve como objetivo apresentar uma análise estatística e climática das variações das condições de céu, classificadas com base no índice de claridade  $K_T$ , no período de 1995 a 2006, em Botucatu/SP (latitude 22,85°S, longitude 48,43°W, altitude 786m). O desenvolvimento desta pesquisa, além do interesse dentro da área de arquitetura e engenharia nos processos térmico e fotovoltaico, guarda interesse também nas áreas da climatologia e engenharia ambiental, pois a atmosfera da região recebe todos os anos no período da seca, entre julho e novembro, elevadas concentrações de aerossóis resultantes da queima da cana-de-açúcar, sendo ainda desconhecido o efeito dessas emissões sobre a frequência das condições de céu no município.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Interação da radiação solar com a atmosfera

A composição atual e a concentração dos constituintes da atmosfera variam com a localização geográfica, a altitude e a estação. Enquanto alguns componentes que constituem a atmosfera são relativamente constantes em concentração, outros são altamente variáveis no tempo e no espaço e determinantes na quantidade e características da radiação solar recebida pela superfície terrestre, como os aerossóis e vapor de água (IQBAL, 1983; LIOU, 2002).

Quando a radiação solar atravessa a atmosfera, interagindo com a mesma, tem sua intensidade modificada pelos processos físicos: difusão, absorção e reflexão. A difusão é um processo fundamental da física associado com as ondas eletromagnéticas e sua interação com a matéria, onde partículas no caminho de uma onda eletromagnética geram a re-irradiação desta energia em todas as direções, ocorrendo para todos os comprimentos de ondas dentro do espectro eletromagnético. O tamanho das partículas na atmosfera responsáveis pela difusão variam em tamanho de 10 a 4  $\mu\text{m}$  (moléculas de gases), aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  (aerossóis), até aproximadamente 1cm (gotas de chuva e granizo) (LIOU, 2002). Partículas pequenas, com diâmetro inferior ao do comprimento de onda, tendem a dispersar a radiação igualmente para todas as direções e, conforme é aumentado o tamanho das partículas, a dispersão tende a ser cada vez mais concentrada na frente com cada vez mais complexas características de dispersão. A difusão por moléculas de gases que possuem seu diâmetro menor que 20% do comprimento de onda são chamadas de difusão Rayleigh (IQBAL, 1983; LIOU, 2002). Para partículas cujas dimensões são comparáveis ou maiores que o comprimento

de onda, como exemplo vapor de água e aerossóis, a difusão é comumente chamada de difusão Mie (IQBAL, 1983; LIOU, 2002).

A absorção da radiação pelas partículas consiste na conversão da energia disponível sob forma eletromagnética em energia interna das partículas, a qual poderá ou não ser irradiada posteriormente, dependendo da estrutura eletrônica e da distribuição dos níveis quânticos da partícula (LIOU, 2002). Cada tipo de partícula absorve a radiação solar de forma seletiva. Os mais importantes absorvedores do ar seco e limpo são o ozônio, absorvendo a fração ultravioleta, e o dióxido de carbono, absorvendo a fração infravermelho. O vapor de água é o maior absorvedor da radiação solar dentre os constituintes atmosféricos, respondendo pela absorção da fração infravermelho que corresponde a aproximadamente 34 – 52,75% da radiação global (BOLSENGA, 1997; ALI ROHAMA, 2001; MOSALAM SHALTOUT et al., 2001; ESCOBEDO et al., 2008).

### **2.1.1 Influência da nebulosidade sobre a radiação solar**

A radiação solar, em qualquer localidade, é uma das variáveis meteorológicas mais afetadas pela presença de nuvens sobre o céu (CALBÓ et al., 2001), pois as nuvens são as principais atenuadoras da radiação solar ao absorver quase toda a radiação no comprimento de onda do infravermelho, e de atenuar por difusão a componente direta (IQBAL, 1983; KINSELL, 1975; MOLINEAUX & INEICHEN, 1995), ou seja, diferentes condições de cobertura do céu por nuvens resultam em diferentes padrões da radiação solar global e da difusa. Como exemplo, o céu sem nuvens resulta em valores baixos da radiação solar difusa dentro da global, enquanto no outro extremo, em condições de céu totalmente coberto por nuvens, os valores da radiação solar difusa são aproximadamente iguais ao da global, como pode ser observado na Figura 1.

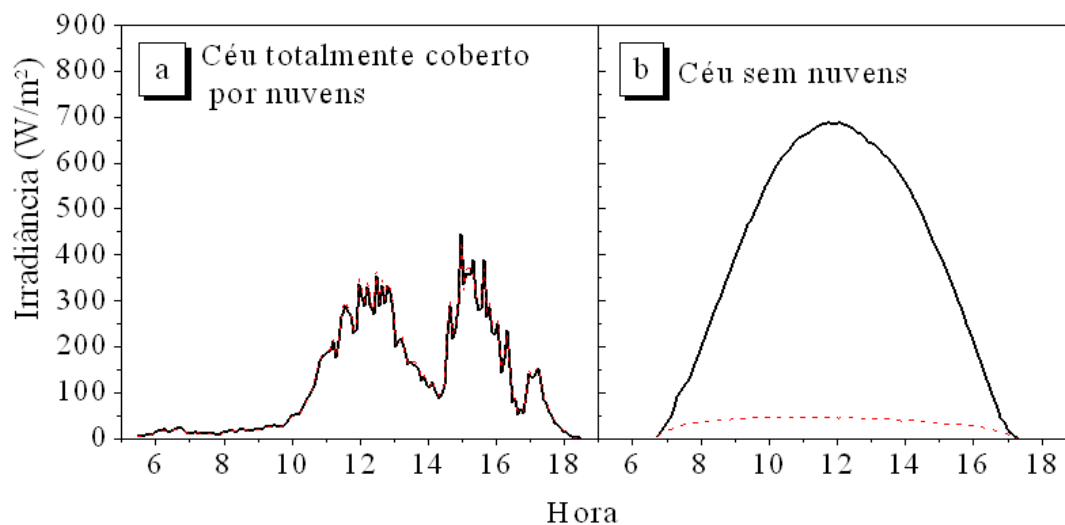


Figura 1. Irradiância solar global (linha contínua na cor preta) e difusa (linha tracejada na cor vermelha) medidos em dois dias diferentes em Botucatu/SP: a) Céu totalmente coberto por nuvens, no dia 28/01/2005; b) Céu sem nuvens, no dia 03/06/2005.

Tradicionalmente, a nebulosidade é estimada visualmente, e é indicada em oitavos ou em décimos de céu encoberto, ou seja, representa a fração da abóbada celeste que, em um dado momento, encontra-se encoberta por nuvens. Porém, nos últimos anos os satélites vêm substituindo a estimativa visual humana. Além destes meios, a nebulosidade pode ser determinada a partir de dados de irradiância difusa e global. Como exemplos, Duchon e O'Malley (1999) propõem a utilização da média e do desvio padrão da irradiância global em intervalos de 21 minutos para determinar o tipo de nuvem dentre sete possíveis; e Calbó et al. (2001) propôs uma metodologia semelhante, a qual classifica a nebulosidade em nove classes.

## 2. 1.2 Influência dos aerossóis sobre a radiação solar

Os aerossóis modificam o balanço radiativo do sistema climático de maneira direta ou indireta. Diretamente, através da difusão da componente direta e absorção da fração ultravioleta. A fração ultravioleta correspondente a aproximadamente 2,1 – 9,4% da radiação global (ELHADIDY et al., 1990; KHOGALI & AL-BAR, 1992; ALI RAHOMA, 2001; MOSALAM SHALTOUT et al., 2001; OGUNJOBI et al., 2002; ROOBA, 2004;

ESCOBEDO et al., 2008). E indiretamente, os aerossóis alteram o tempo de vida e as propriedades radiativas das nuvens, influenciando os processos de formação das chuvas (ROSENFELD, 2000; RAMANATHAN et al. 2001, KAUFMAN et al. 2002; ABEL et al., 2005; LIN et al., 2006). Aumentos na concentração de aerossóis nas colunas atmosféricas podem provocar aumentos de até 5% na cobertura por nuvens (KAUFMANN & KOREN, 2006) e até 6% no albedo de nuvens (WIELICKI et al. 2005).

Em regiões tropicais, a queima de biomassas agrícolas e florestais, comum para conversão de florestas em terras agrícolas ou como trato cultural (antes da colheita manual, no caso da cana de açúcar, ou para eliminação de restos culturais), durante o período seco do ano, desempenha um papel importante no aumento da profundidade ótica atmosférica e conseqüentemente no aumento da atenuação da radiação solar, (CRUTZEN & ANDREAE, 1990; ANDERSON et al., 1996; ABEL et al., 2005), e alteração por difusão da proporção da radiação solar direta dentro da global (MOLINEAUX & INEICHEN, 1995).

Como exemplo, no estado de São Paulo, maior produtor de cana de açúcar no Brasil com 58,8% da produção nacional (IBGE, 2006), concentrada na região centro-norte e oeste do Estado, 66,5% da área plantada em 2006 era colhido com uso de fogo (AGUIAR et al., 2009), prática que altera a composição química da atmosfera regional e conseqüentemente sua transmitância. Segundo Codato (2008), sob condições de céu claro, a atenuação da radiação solar na atmosfera em Botucatu, cidade da região centro-oeste de São Paulo, durante o inverno e início da primavera, período de colheita de cana na região, é equivalente ao da média da cidade de São Paulo, indicando que a contaminação durante a colheita de cana no sudeste do Brasil tem um grande impacto sobre o campo de radiação solar na superfície. Em Piracicaba, que possui 80% do seu território coberto por plantações de cana, durante o período seco, as queimadas de cana respondem por 60% ( $13,62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do material particulado fino ( $d_p < 2,5 \mu\text{m}$ ), 64% ( $2,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do carbono negro e 25% ( $17,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) do material particulado grosseiro ( $2,5 < d_p < 10 \mu\text{m}$ ), sendo estes aerossóis liberados pela queima de biomassa, dependendo da concentração de vapor de água na atmosfera, atuantes como núcleos de condensação de nuvens, afetando a nebulosidade e o albedo das nuvens (LARA et al., 2005). Porém, as emissões de aerossóis na atmosfera do estado, oriundos das queimadas de cana, seguem tendência de redução, pois com o intuito de acelerar o processo de diminuição das queimadas, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da

Agroindústria de Cana de açúcar de São Paulo (UNICA) assinaram protocolo em 2007, onde se determina que os produtores e indústrias do estado que aderirem a este deverão eliminar gradativamente a prática da queimada na colheita da cana até 2017. Em 2010, o percentual de cana não queimada deverá ser aumentado para 70% em áreas passíveis de mecanização (declividade superior a 12%), e 30% em áreas não passíveis (ÚNICA, 2010).

## 2.2 Caracterização da condição de céu

Conforme citado anteriormente, as nuvens exercem forte efeito na atenuação da radiação solar, por isso, para efeito de estudos dos níveis de radiação incidente sobre a superfície terrestre em função das condições de céu, a atmosfera terrestre é classificada em dois amplos tipos: com nuvens e sem nuvens (IQBAL, 1983). A máxima incidência da radiação sobre qualquer superfície na Terra é recebida sob condições de céu sem nuvens, e nestas condições a turbidez atmosférica é determinante na atenuação (IQBAL, 1983; MOSALAM SHALTOUT et al., 2001; OGUNJOBI et al., 2002). A maioria dos trabalhos presentes em literatura classifica as condições de céu em nebuloso, parcialmente nebuloso e céu claro, sendo estas classificações normalmente feitas com base em índices calculados a partir de dados medidos ou estimados de radiações, como o índice de claridade  $K_T$ , índice  $K_d$ , e os parâmetros meteorológicos número de horas de brilho solar e a razão de insolação.

O índice de claridade  $K_T$ , razão entre a radiação global e a extraterrestre, serve como um indicativo das condições atmosféricas ao expressar quanto da radiação solar extraterrestre é transmitida pela atmosfera antes de incidir sobre a superfície terrestre, mostrando com maior clareza as variações da radiação global em função do clima, ou seja, elimina as dependências astronômicas e geográficas (LIU E JORDAN, 1960). Segundo Kudish e Ianetz (1996), é uma medida integral da quantidade e tipo de condição de nuvens, indicando de maneira objetiva a influência da condição de nebulosidade sobre o fluxo de radiação solar. O índice  $K_d$ , razão entre a radiação solar difusa e a global, serve de indicativo da capacidade da atmosfera sobre o local considerado em difundir a radiação.

Equivalentes aos índices  $K_T$ ,  $K_d$  e  $K_b$  na caracterização das condições de céu, Perez et al. (1990) propuseram o uso do índice de claridade  $\epsilon$  e do índice de brilho do



céu  $\Delta$ , onde as variações do primeiro expressam a transição de um céu totalmente nebuloso para um céu claro com baixa turbidez, e as variações do segundo refletem a opacidade/espessura das nuvens. Com base nos dois índices, determinados a partir das Equações 1 e 2, as condições de céu podem ser classificadas em três tipos: nebuloso ( $\Delta < 0,1$  e  $\varepsilon < 1,2$ ), intermediário ( $0,2 < \Delta < 0,3$  e  $1,2 < \varepsilon < 5,2$ ) e céu claro ( $\Delta < 0,1$  e  $\varepsilon > 5,2$ ).

$$\varepsilon = \frac{I_d + I_b}{I_d} \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{I_d}{I_0 \text{sen}(h)} \quad (2)$$

onde  $I_d$  e  $I_b$  são respectivamente a irradiância solar difusa e a direta sobre superfície horizontal,  $I_0$  a irradiância solar no topo da atmosfera e  $h$  o ângulo horário.

Informações médias das condições de céu são utilizadas em modelos para estimativa de radiações solares, como os propostos por Angström (1924), o qual estima a radiação solar global diária com base na razão de insolação, e por Liu e Jordan (1960), que utiliza para caracterização das condições de céu a fração  $K_T$  na estimativa da radiação solar difusa diária. Também, tais informações são úteis em estudos ecológicos, hidrológicos, agrônômicos e na engenharia, em projetos e simulações para estimar o desempenho de sistemas que utilizem energia solar ou que sejam influenciados por ela (iluminação natural e conforto térmico) (UDO, 2000; LI & LAN, 2001; AL-LAWATI, 2003). Tendo como exemplo os sistemas de aquecimento solar de água, em dias de céu nebuloso, faz-se necessário o uso de um sistema de aquecimento elétrico complementar ao solar. Portanto, para uma projeção da redução no consumo de energia elétrica a partir da utilização da solar, além da quantidade média de energia solar disponível, é também necessário ter o conhecimento da frequência média de dias de céu nebuloso na localidade.

Com base na importância da caracterização das condições de céu, Kudish e Iancu (1996) estudaram a evolução anual das condições de céu em Beer Sheva (latitude  $31,25^\circ$  N, longitude  $34,75^\circ$  E) em Israel, a partir do índice de claridade  $K_T$  calculado utilizando dados de radiação global medida ao longo de 10 anos. Verificaram que os meses com maior e menor valor de frequência de dias de céu claro são, respectivamente, junho (72%) e dezembro (6%), Figura 2, e que ao longo do ano 7% dos dias são de céu nebuloso, 54% parcialmente nebuloso e 39% de dias de céu claro.

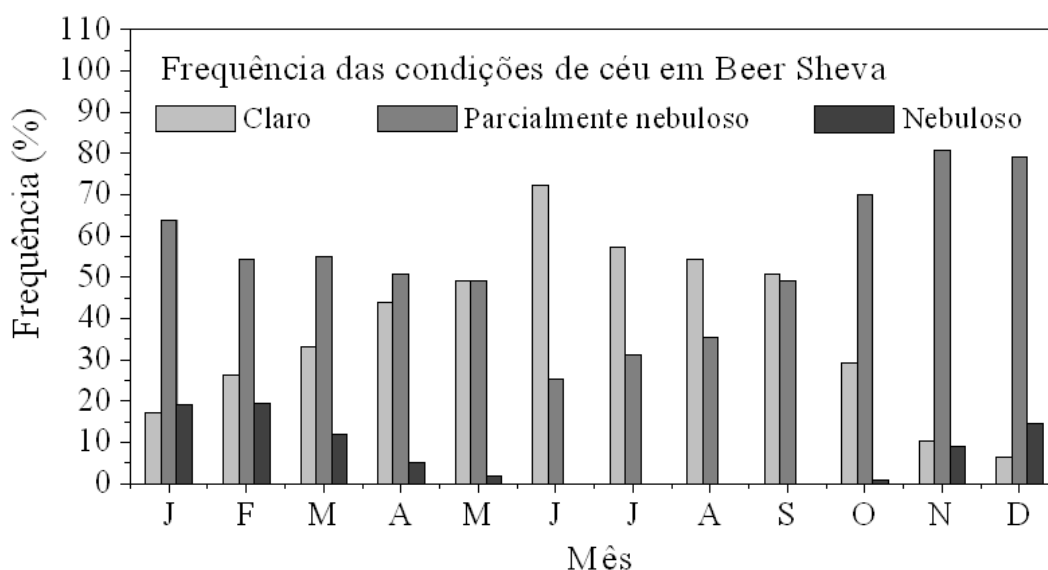


Figura 2. Evolução anual da frequência das condições de céu nebuloso, parcialmente nebuloso e claro em Beer Sheva (KUDISH & IANETZ,1996).

Li e Lam (2001) verificaram que, em Hong Kong (latitude 22,3° N, longitude 114,2° E), ao longo do ano, 23% do fotoperíodo é representado por céu nebuloso, 80% por céu parcialmente nebuloso e 7% de céu claro. Ogunjobi et al. (2002), verificaram que 32% dos dias do ano em Ile-Ife (latitude 7,14° N, longitude 4,56° E) são de céu claro, com maior frequência no período seco do ano (novembro-abril), enquanto em Kwangju (Latitude 35,13° N, longitude 126,53° E) é de 5% e em Seoul (latitude 37,57° N, longitude 126,98° E) é de 4%, sendo estes baixos valores de frequência encontrados para as duas últimas cidades influência da elevada turbidez atmosférica resultante da queima de biomassa agrícola e da poeira oriunda do deserto de Gobi. Che et al. (2007) estudaram as condições de céu para 14 cidades da China, analisando as variações sazonais ao longo de 40 anos, e verificaram que para a maioria das cidades houve reduções gradativas de ocorrência de dias de céu claro em função do aumento gradativo da emissão de aerossóis resultante do aumento da queima de combustíveis.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e clima

De acordo com o censo demográfico de 2007 realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,43°W, altitude 786m), distante 221 km do Oceano Atlântico, conta com 120,8 mil habitantes. É uma cidade do tipo universitária, inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucaliptos. Conta com cerca de 4% de sua área territorial (1.483 km<sup>2</sup>) ocupado por cana-de-açúcar, com rendimento médio aproximado de 70 to/ha. Não possui grandes indústrias. De acordo com dados do IBGE (2007), a frota de veículos automotores para a cidade de Botucatu em 2006 é de 56,38 mil (aproximadamente 1 veículo para cada 2 habitantes), incluindo automóvel (39.359), caminhão (1.359), caminhão trator (134), caminhonete (3.722), ônibus (387), micro-ônibus (198), motocicleta (9.799), trator de rodas (26) e motoneta (1.396).

O clima do município é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. Os efeitos climáticos característicos que afetam diretamente os valores das radiações solares em Botucatu podem ser observados por meio dos valores médios mensais nas séries de temperatura, umidade, precipitação e insolação apresentados na Figura 3. Analisando a evolução anual média diária mensal de 22 anos de dados, percebemos que os meses de fevereiro e julho são o mais quente e o mais frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 22,94°C e 16,99°C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 76,07% e 61,61% respectivamente. A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue as variações astronômicas do sol, onde os

valores são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local (radiação solar mais elevada) e menores valores quando declina no hemisfério norte (radiação solar menos elevada).

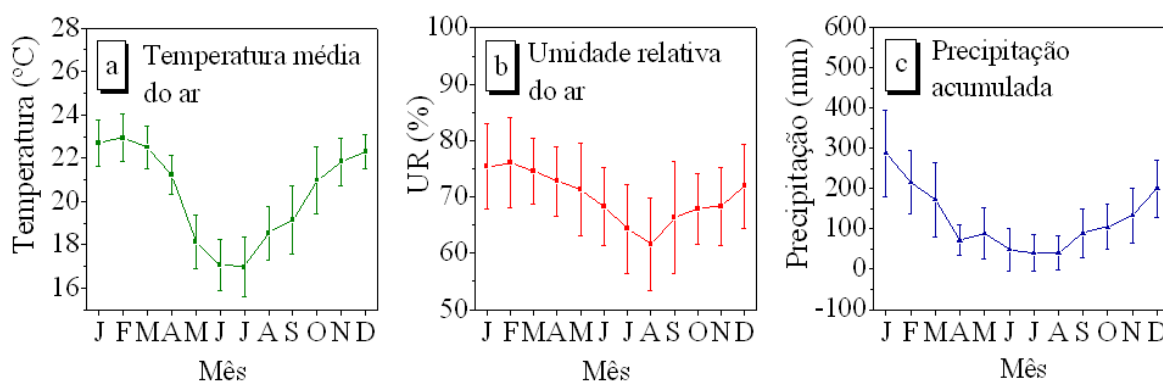


Figura 3. a) Evolução anual da temperatura média diária mensal (período de 1983 a 2005); b) Evolução anual da umidade média diária mensal (período de 1983 a 2005); c) Evolução anual da precipitação acumulada média diária mensal (período de 1983 a 2005).

A precipitação é mais elevada nos meses de janeiro ( $288,22 \pm 107,19\text{mm}$ ), fevereiro ( $218,77 \pm 78,36\text{mm}$ ), março ( $173,52 \pm 91,85\text{mm}$ ), outubro ( $105,6 \pm 56,25 \text{ mm}$ ), novembro ( $133,76 \pm 68,78\text{mm}$ ), dezembro ( $200,88 \pm 71,38\text{mm}$ ) e menores em abril ( $72,53 \pm 38,75\text{mm}$ ), maio ( $88,80 \pm 63,85\text{mm}$ ), junho ( $48,77 \pm 53,42\text{mm}$ ), julho ( $41,09 \pm 46,49\text{mm}$ ), agosto ( $40,69 \pm 41,66\text{mm}$ ), setembro ( $90,00 \pm 60,40\text{mm}$ ), como apresentado na Figura 3b.

Anualmente, o ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos: o período chuvoso (outubro a março) e o período seco (abril a setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100 mm.

No período chuvoso, de outubro a março, predominantemente nas estações da primavera e verão, quando ocorrem mais de 80% do total anual de chuvas, a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre. A chuva convectiva é localizada e com grande variabilidade espacial; a intensidade é moderada a forte dependendo do desenvolvimento vertical da nuvem; a predominância é no período da tarde ou início da noite, e a duração, é curta à média, de minutos a horas. São provocadas pela intensa evapotranspiração de superfícies úmidas e aquecidas. O ar ascende em parcelas de ar que se

resfriam de forma praticamente adiabática (sem trocar calor com o meio exterior) durante sua ascensão.

No período seco de abril a setembro, nas estações de outono e inverno, a precipitação é predominantemente do tipo frontal, originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas da região sudeste do Brasil, típicas das latitudes médias. A distribuição da chuva é generalizada na região; a intensidade é de fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria; e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente.

Com relação à emissão de materiais particulados na atmosfera local, o período da seca apresenta uma atmosfera sujeita à materiais particulados proveniente das queimadas da cana-de-açúcar feitas em aproximadamente 70 cidades adjacentes e das usinas que produzem o álcool e açúcar. Segundo Codato et al. (2008), a partir do início das queimadas da cana em junho/julho, a concentração de aerossóis aumenta consideravelmente, atingindo no mês de setembro o valor máximo de  $PM_{10}$  ( $d_p > 10 \mu m$ ) de  $70.0 \mu g m^{-3}$ , equivalente a uma profundidade ótica de aerossóis AOD de 0,35, conforme Figura 4 que relaciona AOD com  $PM_{10}$  a partir de dados de 2004.

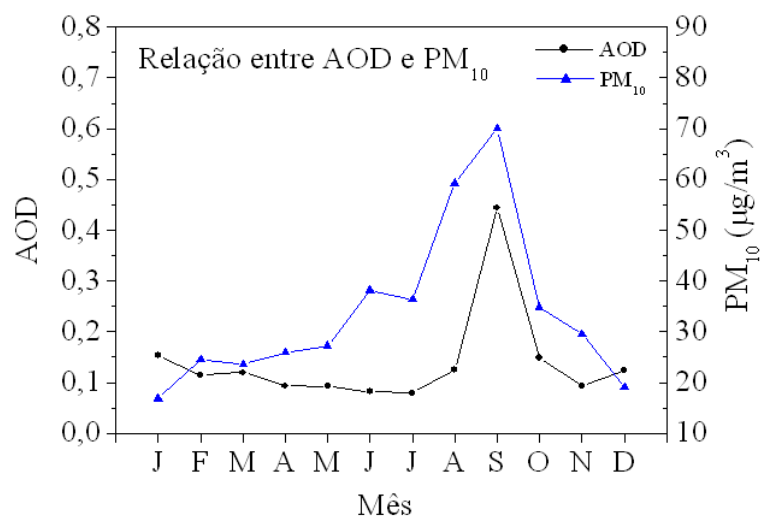


Figura 4. Relação entre a evolução anual da Profundidade ótica de aerossóis AOD (dados obtidos do satélite TERRA) e do  $PM_{10}$  (CODATO et al., 2008) no ano de 2004.

O ciclo da colheita da cana de açúcar termina no mês de novembro devido a dificuldade do transporte da matéria prima no período chuvoso. Nos meses de outubro a dezembro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, até atingir  $19.0 \mu\text{gm}^{-3}$ , equivalente a um AOD de 0,13. Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir os menores níveis de concentração  $PM_{10}$  no mês de maio, respondendo basicamente à emissão feita por indústrias e veículos automotores, antes de iniciar o novo ciclo. Este estudo desenvolvido por Codato et al. (2008) foi feito com base em dados de materiais particulados  $PM_{10}$  medidos pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) no ano de 2004 em Jaú, considerando estes dados representativos para Botucatu, dada a proximidade entre as duas cidades (distantes 80 km uma da outra). Jaú, o sexto maior produtor do estado, com 46.684,00 ha cultivados (CANASAT, 2009), até 2006 queimava aproximadamente 92% de sua área colhida (Aguiar et al., 2009).

### 3.2 Instrumentação e obtenção dos dados

A base de dados de irradiâncias global na horizontal ( $I_G$ ) e a de direta na incidência ( $I_b$ ) foram medidas, respectivamente, por um piranômetro Eppley PSP e por um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. Estes sensores de radiação solar são calibrados há cada 2 anos usando procedimentos recomendados pela Organização Mundial de Meteorologia (1965). Os dados medidos foram registrados por um sistema automático de aquisição de dados CR23X e armazenados diariamente no módulo de memória SM192, ambos da Campbell Scientific-Inc., no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2005, operando continuamente. Os dados armazenados no módulo de memória são transferidos diariamente para um microcomputador através de uma interface SC532 e do software PC208w da Campbell Scientific. As características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão descritos na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta.

<b>Radiação</b>	<b>Direta</b>	<b>Global</b>
<b>Sensor-marca</b>	Pireliômetro - Eppley	Piranômetro - Eppley
<b>Fator de calibração</b>	7,59 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$	7,45 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$
<b>Intervalo espectral</b>	295 – 2800 nm	295 – 2800 nm
<b>Tempo de resposta</b>	1 s	1 s
<b>Linearidade</b>	$\pm 0,5\%$ (0 a 1400 $\text{W}/\text{m}^2$ )	$\pm 0,5\%$ (0 a 2800 $\text{W}/\text{m}^2$ )
<b>Co-seno</b>	–	$\pm 1\%$ ( $0 < Z < 70^\circ$ ) $\pm 3\%$ ( $70 \leq Z < 80^\circ$ )
<b>Resposta à temperatura</b>	$\pm 1\%$ de $-20^\circ\text{C}$ a $40^\circ\text{C}$	$\pm 1\%$ de $-20^\circ\text{C}$ a $40^\circ\text{C}$

A base de dados de precipitação pluviométrica diária foi registrada por um pluviógrafo Ota Keiki Seisakusho instalado na Estação Climatológica de Botucatu/SP, no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2005, operando continuamente. Ambas as estações citadas anteriormente estão situadas na Faculdade de Ciências Agrônomicas/UNESP/Botucatu (latitude  $22,85^\circ\text{S}$ , longitude  $48,45^\circ\text{W}$ , altitude 786 m).

Os dados de profundidade ótica de aerossóis (AOD) foram os medidos pelo satélite TERRA, no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005, através do instrumento MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). O MODIS é um radiômetro espectral passivo que possui uma largura de abertura de 2330 km, sendo capaz de monitorar quase todo o globo em 1 dia, com 36 grandezas espectrais discretas medidas (ou bandas) entre 0,4 e 14,5  $\mu\text{m}$ . Os dados utilizados aqui correspondem a banda 4, de 0,55  $\mu\text{m}$ . Este satélite entrou em atividade em dezembro de 1999 e faz parte do programa EOS (*Earth Observing System*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e possui órbita descendente, com horário de passagem sobre o Equador em torno das 10h30min, numa altitude de aproximadamente 700 km.

### 3.3 Avaliação dos dados e cálculos

Os dados de irradiância global na horizontal e da direta na incidência foram processados com o uso do software ORIGIN 6.0 para eliminação de valores inconsistentes, ou seja, foram submetidos a um controle de qualidade, onde foram verificados individualmente para a identificação de possíveis erros de coleta, de armazenamento ou de transferência. Os dados negativos e os zeros absolutos foram excluídos, para não comprometer a série de dados de 10 anos e garantir a confiabilidade das medidas. No caso da irradiância solar direta na incidência, a base de dados foi novamente processada para eliminação de valores inferiores a 120 W/m<sup>2</sup>.

Foram removidos, para a radiação global, 20 dias em 1996, 4 dias em 1997, 7 dias em 1998, 29 dias em 1999, 5 dias em 2000, 11 dias em 2001, 9 dias em 2002, 4 dias em 2003, 9 dias em 2004 e 7 dias em 2005. Na radiação direta na incidência foram removidos 35 dias em 1996, 25 dias em 1997, 30 dias em 1998, 38 dias em 1999, 17 dias em 2000, 27 dias em 2001, 20 dias em 2002, 23 dias em 2003, 46 dias em 2004 e 27 dias em 2005. Na precipitação foram removidos 13 dias em 1996, 2 dias em 1997, 4 dias em 1998, 22 dias em 1999, 2 dias em 2000, 4 dias em 2001 e 2002, 1 dia em 2003, 6 dias em 2004 e 5 dias em 2005. As medidas perdidas de precipitação, a fim de não se comprometerem os cálculos das acumuladas, foram preenchidos com o valor médio do mês.

O software ORIGIN 6.0 foi utilizado ainda, em uma segunda etapa, para os cálculos de estimativa da irradiância no topo da atmosfera ( $I_0$ ), das irradiações horárias e diárias, da insolação, da nebulosidade, do índice de claridade ( $K_T$ ), dos cálculos estatísticos e para a confecção dos gráficos.

A irradiância solar no topo da atmosfera foi calculada 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:  $I_0$  representa a irradiância no topo da atmosfera, expressa em W/m<sup>2</sup>;  $I_{SC}$  a constante solar, equivalente a 1367W/m<sup>2</sup>;  $E_0$  o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, expressa em u.a.;  $\delta$  a declinação solar, expressa em graus;  $\phi$  a latitude local, expressa em graus; e  $\omega$  o ângulo horário, expresso em graus.



As irradiações global e no topo da atmosfera, em MJ/m<sup>2</sup>, foram calculadas a partir da integração da irradiância global ( $I_G$ ) e da no topo da atmosfera ( $I_0$ ), na hora e no dia, determinando-se as radiações horárias  $H_G^h$  e  $H_o^h$  e as diárias  $H_G^d$  e  $H_o^d$ , onde o símbolo H representa a energia integrada no intervalo de tempo horário “h” ou diário “d”, e os símbolos “G” e “o” representam as radiações global e no topo da atmosfera.

A razão de nebulosidade, o qual refere-se à fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular, foi calculado pela Equação 2:

$$f = 1 - \frac{n}{N} \quad (2)$$

onde: n representa o número de horas de brilho solar e N o fotoperíodo, ambos expressos em horas. O número de horas de brilho solar foi determinado a partir da base de dados de radiação solar direta na incidência, levando em consideração o critério citado por Olivieri (1998), o qual considera como horas de brilho solar o somatório dos segundos do dia em que a irradiância direta na incidência é maior que 120 W/m<sup>2</sup>.

Os índices de claridade ( $K_T$ ), frações horárias ( $K_T^h$ ) e diárias ( $K_T^d$ ), foram calculados através da Equação 3, conforme Liu e Jordan (1960),

$$K_T = \frac{H_G}{H_0}, \quad (3)$$

onde:  $K_T$  representa o índice de claridade ou índice de transmissividade da radiação global, adimensional, o qual varia de 0 a 1;  $H_G$  a irradiação solar global na horizontal, expressa em MJ/m<sup>2</sup>; e  $H_0$  a irradiação solar no topo da atmosfera, expressa em MJ/m<sup>2</sup>.

A precipitação acumulada mensal  $P_m$  e a anual  $P_a$  foram calculadas a partir da expressão:

$$P_x = \sum_{i=1}^j P_i \quad (4)$$

onde “x” é igual “a” (para anual), ou “m” (para mensal), “j” é o número de dias do mês, no caso da  $P_m$ , ou dias do ano, no caso da  $P_a$ .

### 3.4 Estatística

#### 3.4.1 Cálculos das médias

Na evolução anual da irradiação global, índice de claridade  $K_T$ , nebulosidade e profundidade ótica de aerossóis, calculou-se as médias mensais diárias:

$$\overline{Y_m^d} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j Y_i^d \quad (5)$$

onde  $\overline{Y_m^d}$  é a média diária mensal do parâmetro climático considerado e  $j$  é o número de dias do mês.

A partir das médias mensais diárias, determinaram-se as médias mensais de 10 anos através da expressão:

$$\langle \overline{Y_m^d} \rangle = \frac{1}{10} \sum_{i=1996}^{2005} \overline{Y_{mi}^d} \quad (6)$$

onde  $\langle \overline{Y_m^d} \rangle$  é a média diária mensal de 10 anos do parâmetro climático considerado.

As médias anuais diárias da irradiação global, índice de claridade  $K_T$ , nebulosidade e profundidade ótica de aerossóis foram determinados através da expressão:

$$\overline{Y_a^d} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j Y_i^d \quad (7)$$

onde  $\overline{Y_a^d}$  é a média anual do parâmetro climático considerado e  $j$  é o número de dias do ano.

As médias anuais diárias dos 10 anos foram determinadas através da expressão:

$$\langle \overline{Y_a^d} \rangle = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \overline{Y_{ai}^d} \quad (8)$$

onde  $\langle \overline{Y_a^d} \rangle$  é a média anual de 10 anos do parâmetro climático considerado e  $j$  é o número de dias do ano.

A média mensal  $\overline{P_m}$  e anual  $\overline{P_a}$  da precipitação acumulada foram calculadas a partir da expressão:

$$\overline{P_x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1996}^{2005} P_{xi} \quad (9)$$

onde “x” é igual “a” (para anual), ou “m” (para mensal).

### 3.4.2 Caracterização das condições de céu e distribuição de frequência

O critério usado para classificar a condição do céu foi o descrito por Escobedo et al. (2009) para Botucatu, conforme descrito abaixo e ilustrado na Figura 5:

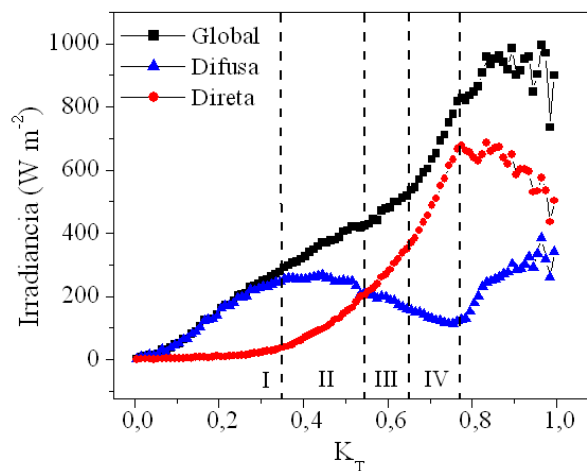


Figura 5. Evoluções das radiações global, difusa e direta na horizontal, médias de 5 minutos, em função de intervalos infinitesimais de  $K_T$ . Fonte: Escobedo et al. (2009).

- Condição de céu I, nebuloso:  $K_T \leq 0,35$ , a radiação direta é praticamente igual a zero, ou seja, a parcela global é equivalente a 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 de 249,89 a 209,02 W/m<sup>2</sup>, até igualar-se a parcela direta, o que ocorre em torno de 200W/m<sup>2</sup>;
- 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 difusa diminui variando de 209,02 a 158,30 W/m<sup>2</sup>;

- Condição de céu IV, claro:  $K_T > 0,65$ , a radiação global possui a maior parcela da radiação direta, sendo maior que  $359,75 \text{ W/m}^2$ , e mínima de difusa.

Inicialmente, para determinação das frequências relativas das condições de céu em Botucatu, classificaram-se a base total de dados em com condições de céu: nebuloso, parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, parcialmente nebuloso com dominância para o claro ou claro, e em seguida foi feita a distribuição de frequência percentual para as quatro classes, para cada dia, mês e ano da base de dados. A frequência relativa percentual corresponde ao valor da frequência absoluta dividido pelo número total de observações, conforme Moore (2000), calculado através da Equação 10,

$$F = \frac{F_A}{n} \times 100 \quad (10)$$

onde:  $F$  representa a frequência relativa, expressa em %;  $F_A$  a frequência absoluta, correspondente ao número de repetições observadas para um determinado intervalo de  $K_T$ ; e  $n$  a número total de observações. Optou-se pela distribuição de frequência percentual, pois a base de dados possuía descontinuidades decorrentes do processo de eliminação de valores inconsistentes, quando foram removidos dados discrepantes decorrentes de erros de coleta.

O desvio relativo  $D$  das frequências anuais diárias em relação à média dos 10 anos foi calculado através da Equação 11, que expressa em porcentagem a variabilidade da frequência por ano em relação à frequência média total.

- 
- $$D(\%) = \left( \frac{\text{frequência no ano} - \text{frequência média total}}{\text{frequência média total}} \right) * 100 \quad (11)$$

Os resultados da distribuição de frequência para os intervalos de  $K_T$  foram avaliados junto dos valores médios mensais diários e médios anuais diários da nebulosidade e da profundidade ótica de aerossóis (AOD) e da precipitação pluviométrica acumulada mensal diária e anual diária, com a finalidade de explicar as variações nos valores da série temporal de  $K_T$  em Botucatu.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise da radiação global e do índice de claridade no decênio 1996 a 2005

A Figura 6 mostra a evolução da irradiação global anual diária  $\overline{H_G^d}$  em Botucatu, para o período de 1996 a 2005. A linha contínua representa o valor da irradiação global média dos 10 anos  $\{\overline{H_G^d}\}$  e a linha tracejada representa o desvio padrão da irradiação média total.

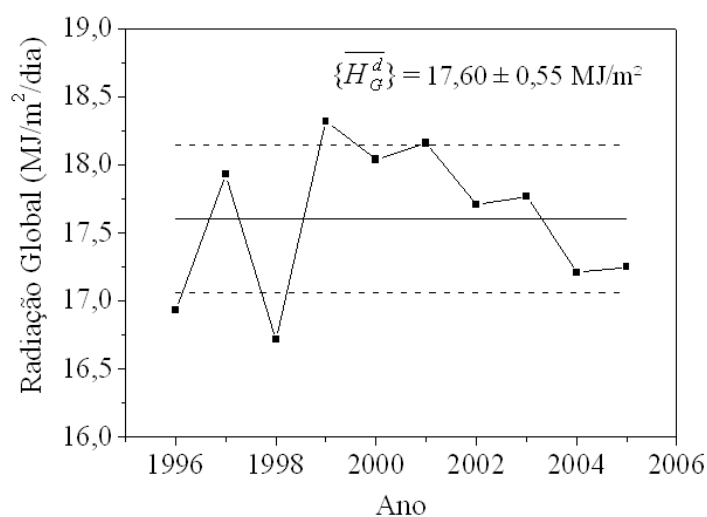


Figura 6. Evolução da irradiação global (MJ/m²) no período de 1996 a 2005.

A  $\overline{[H_G^d]}$  variou de 16,72 MJ/m<sup>2</sup> (em 1998) a 18,32 MJ/m<sup>2</sup> (em 1999), sendo o valor da média dos 10 anos  $\{\overline{H_G^d}\} = 17,60 \text{ MJ/m}^2 \pm 0,55$ . Qualquer valor externo ao intervalo correspondente a  $17,60 \pm 0,55 \text{ MJ/m}^2$ , inferior ou superior, representa irradiação global anual diária fora da normal da série dos dez anos. A partir da Figura 6, percebe-se que os anos de 1999 e 2001 apresentaram valores superiores, 18,32 MJ/m<sup>2</sup> e 18,16 MJ/m<sup>2</sup>, respectivamente, enquanto que nos anos de 1996 e 1998 valores inferiores, de 16,93 MJ/m<sup>2</sup> e 16,72 MJ/m<sup>2</sup>, respectivamente.

As variações da radiação global mostradas na Figura 6 estão fortemente associadas à nebulosidade e à concentração de vapor de água na atmosfera registradas em Botucatu no mesmo, período de 1996 a 2005, conforme é apresentado na Figura 7.

Na Figura 7 é apresentada a evolução da radiação global média diária anual  $\overline{[H_G^d]}$ , na grande totalidade dos anos, acompanhou de forma inversa a evolução da nebulosidade média diária anual  $\overline{f_a^d}$ .

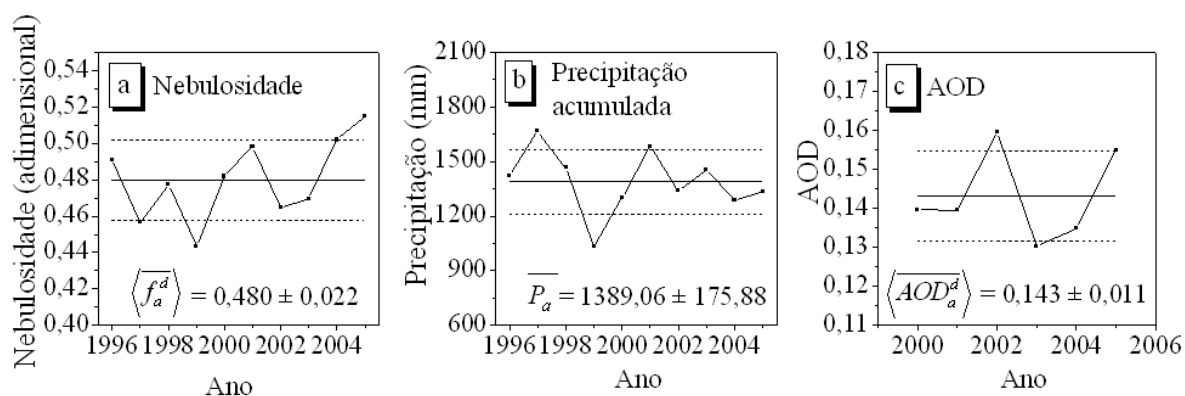


Figura 7. a) Nebulosidade média diária anual, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada anual, período de 1996 a 2005; c) Profundidade ótica de aerossóis média diária anual (AOD), período de 2000 a 2005.

O aumento ou diminuição da  $\overline{[H_G^d]}$  de um ano a outro não foi proporcional ao acréscimo ou decréscimo da  $\overline{f_a^d}$  no mesmo período. Por exemplo, o crescimento da  $\overline{[H_G^d]}$  em função do decréscimo da  $\overline{f_a^d}$  de 1996 a 1997 não foi proporcional ao

crescimento da radiação global em função do decréscimo da nebulosidade de 1998 a 1999. Enfim, são possíveis muitas outras combinações entre os anos em que não se verificou a proporcionalidade entre as variações da  $\overline{H_G^d}$  e a da  $\overline{f_a^d}$ .

A não proporcionalidade nas variações da radiação global, acompanhando as variações da nebulosidade, indica que outros fatores climáticos afetaram a linearidade das duas variáveis entre os anos. O vapor de água na atmosfera, que neste trabalho vamos quantificar indiretamente por meio da precipitação acumulada P, e a própria precipitação, são dois destes fatores. Quando a chuva é diurna, a relação entre a radiação global e a nebulosidade é pouco afetada, pois a atmosfera úmida e com elevada nebulosidade proporciona baixos valores na radiação global. No entanto, quando as chuvas são noturnas, a relação entre a nebulosidade e a radiação global é afetada, pois a atmosfera com baixa nebulosidade e elevada concentração de vapor de água nos dias seguintes provoca uma baixa nebulosidade, ou um aumento considerável do número de horas de brilho solar, sem aumentar na mesma proporção a radiação global, devido à absorção pelo vapor de água da fração da radiação global no comprimento do infravermelho. É importante considerar nesta análise que, em Botucatu, a fração infravermelho da radiação global representa uma quantidade elevada dentro do espectro total de radiação (aproximadamente 47,0%) (ESCOBEDO et al., 2008). Na atmosfera úmida, o decréscimo da radiação global é maior que na atmosfera seca nas mesmas condições de nebulosidade. Fugindo desta lógica das variações da radiação global acompanharem de forma inversa as variações da nebulosidade, nos anos de 2001 e 2005 a radiação global e a nebulosidade aumentaram juntas em relação aos anos anteriores (2000 e 2004, respectivamente), mesmo que em ambos os anos o aumento da radiação global e da nebulosidade tenha sido muito pequeno. É possível que essa diferença seja resultante de erros experimentais no momento da medição gerado por um dos equipamentos de medição, ou então, pelos dois. Os erros estimados, nas medidas das radiações global e direta na incidência, pelo piranômetro e pireliômetro da Eppley, respectivamente, é da ordem de 2,0%, o que acarretou um erro propagado de 4,0% que é muito maior que a diferença nos valores da radiação e insolação, destes anos.

A comparação entre a evolução da radiação global média diária anual  $\overline{H_G^d}$  e a evolução da profundidade ótica de aerossóis média diária anual  $\overline{AOD_a^d}$ , mostra que,

do ponto de vista estatístico médio anual, a presença de aerossóis originadas nas queimadas de cana em Botucatu não interferiu no decréscimo acentuado da radiação global. Os valores de aerossóis na atmosfera, como mostrado na Figura 7c, na média anual são muito baixos.

Na Figura 8 é apresentada a evolução do índice de claridade  $K_T$  médio anual diário  $\{\overline{K_T^d}\}$ , obtido por meio da relação entre a radiação global média diária anual  $\{\overline{H_G^d}\}$  e a radiação no topo da atmosfera média diária anual  $\{\overline{H_o^d}\}$ . O índice de claridade  $K_T$  é um indicador geral dos processos de absorção e espalhamento, por nuvens, vapor de água e aerossóis, que intervêm na transmissão da radiação global através da atmosfera.

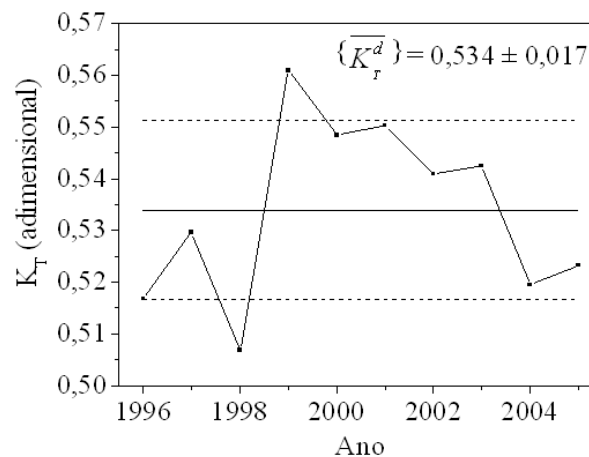


Figura 8. Evolução do índice de claridade  $K_T$  médio anual diário, período de 1996 a 2005.

A normalização da irradiação global  $H_G$  por meio da irradiação do topo da atmosfera  $H_o$  eliminou as dependências astronômica (declinação solar) e geográfica (latitude) da irradiação global. Portanto, a variação sazonal da fração da irradiação global transmitida  $K_T$ , observada na Figura 5, é resultante apenas de variações climáticas, como as variações das concentrações de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera local.

A evolução do índice de claridade  $K_T$  é similar à evolução da radiação global ( $H_G$ ). O índice de claridade  $K_T$  médio anual diário variou entre 0,56, em 1999, a 0,51, em 1998, ambos os valores extrapolam a normal da série dos dez anos  $\{\overline{K_T^d}\}$ , cujo valor foi de  $0,53 \pm 0,03$ . A elevada transmissividade ocorrida em 1999 (Figura 8) foi resultante da baixa



nebulosidade deste ano, enquanto que, a baixa transmissividade de 1998 é resultante da baixa nebulosidade e alta concentração de vapor de água. Foi nesta condição de  $K_T$  que se estabeleceu o critério de classificação das quatro condições 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 claro ( $0,55 < K_T \leq 0,65$ ) e IV - claro ( $K_T > 0,65$ ); para se determinar a frequência anual diária, frequência mensal diária, frequência mensal horária e a frequência anual horária, que serão analisadas nos itens a seguir.

#### 4.2. Distribuição da frequência anual diária.

Na Figura 9 e na Tabela 2 são apresentados os valores da frequência anual diária, ao longo do período de 1996 a 2005, para as quatro condições de céu: I - nebuloso, II - parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, III - parcialmente nebuloso com dominância para o e IV - claro.

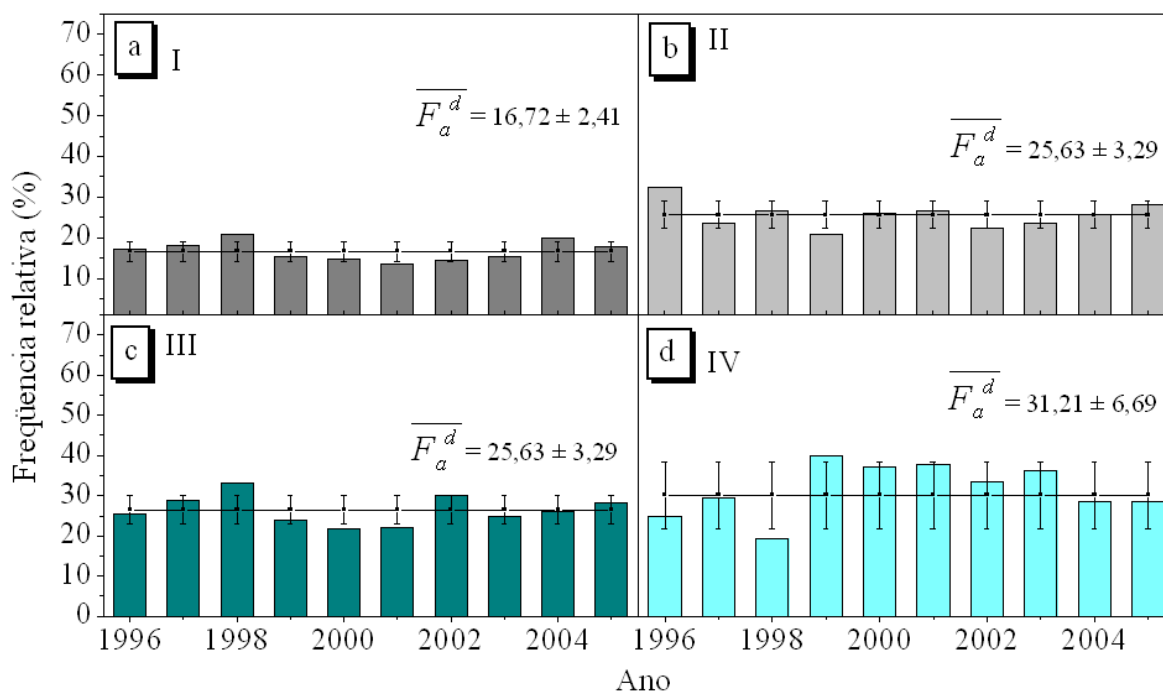


Figura 9. Distribuição de frequência, entre os anos de 1996 a 2005, para as condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV.

Tabela 2. Valor da frequência entre os anos de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV.

Ano	Condição de céu			
	I	II	III	IV
	$F_a^d$ (%)	$F_a^d$ (%)	$F_a^d$ (%)	$F_a^d$ (%)
1996	17,21	32,56	25,33	24,89
1997	17,98	23,67	28,83	29,52
1998	20,78	26,79	33,13	19,30
1999	15,29	20,90	24,00	39,81
2000	14,81	26,05	21,88	37,26
2001	13,68	26,51	22,14	37,67
2002	14,36	22,36	29,92	33,36
2003	15,34	23,67	24,87	36,12
2004	19,97	25,64	25,99	28,40
2005	17,77	28,16	28,27	25,80
$\overline{F_a^d}$	<b>16,72 ± 2,41</b>	<b>25,63 ± 3,29</b>	<b>26,44 ± 8,30</b>	<b>31,21 ± 6,69</b>

Para a condição de céu I,  $F_a^d$  variou de 13,68% a 20,78%, com  $\overline{F_a^d}$  de 16,72% ± 2,41; para a II, de 20,90% a 32,56%, com  $\overline{F_a^d}$  de 25,63% ± 3,29; para a III, de 21,88% a 33,13%, com  $\overline{F_a^d}$  de 26,44% ± 8,30; e para a IV, de 19,30% a 39,81%, com  $\overline{F_a^d}$  de 31,21% ± 6,69.

Com base nos valores de  $\overline{F_a^d}$ , é conclusivo que a classificação da condição de céu em Botucatu é na seqüência: IV com 31,21%; III com 26,44%; I com 25,63% e II com 16,72%.

A comparação entre as somas das  $\overline{F_a^d}$  da condição de céu I e II, e das III e IV, mostra que há uma predominância de dias claros (57,65%), ou seja, com

predominância de incidência de radiação solar direta, sobre os dias com predominância de radiação solar difusa (42,35%) em Botucatu.

A evolução da frequência  $F_a^d$ , no período de 1996 a 2005, para as quatro condições de céu, mostrada na Figura 9, não indica haver tendência sistemática de crescimento ou de decréscimo de qualquer uma das condições de céu neste período em função das variações climáticas. Para cada ano, a variação de qualquer uma das condições de céu em função das variações climáticas acompanha variações também nas demais condições dentro do equilíbrio dinâmico da atmosfera, ou seja, o aumento ou decréscimo na  $F_a^d$  de um tipo de condição acompanha o aumento ou diminuição das demais condições, onde o somatório das  $F_a^d$  de todas as condições totaliza os 100,0%.

Os eventos climáticos característicos de Botucatu que podem ter afetado a transmissão atmosférica e, conseqüentemente, a condição de céu são: os efeitos micro climáticos com frequência anual, que provocam o aumento da nebulosidade e de vapor de água na atmosfera no período chuvoso (de outubro a março) e aumento da nebulosidade a baixa umidade, nos meses de maio a junho, decorrente da entrada de frentes frias vindas do sul; os efeitos macro climático com frequência alternada, como o El Niño e o La Nina, que geram mudanças nos regimes de chuva e nebulosidade nas regiões tropicais e em locais de latitudes médias.

Na soma dos dois principais efeitos climáticos responsáveis pelas mudanças da atmosfera local, ou variações das condições de céu, são representados na Figura 10, a qual mostra os valores médios anuais diários e desvios da nebulosidade  $\overline{f_a^d}$  e da precipitação acumulada anual  $\overline{P_a}$  no período de 1996 a 2005.

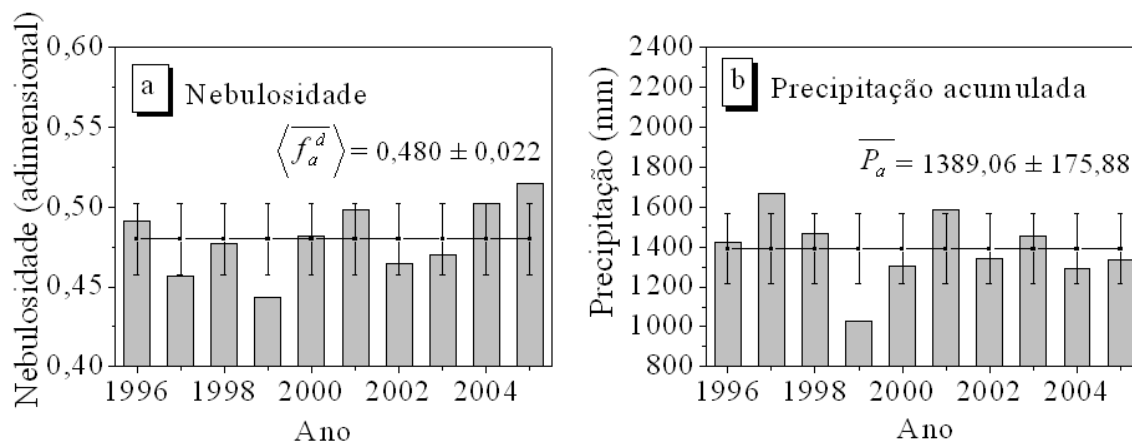


Figura 10. a) Nebulosidade média diária anual, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada anual, período de 1996 a 2005.

A análise da Figura 10 mostra que os parâmetros meteorológicos, nebulosidade e precipitação também não apresentam tendências sistemáticas de crescimento ou decréscimo em função dos eventos climáticos em micro e macro escala. As variações da nebulosidade e da precipitação, ano a ano, são variações aleatórias, crescente ou decrescente, em função dos eventos climáticos em micro e macro escala de cada ano.

#### 4.2.1 Influência de fenômenos climáticos de micro escala sobre as condições de céu

Na Figura 11 e na Tabela 3 são mostrados os valores dos desvios relativos entre as  $F_a^d$  e a  $\overline{F_a^d}$ , para as quatro condições de céu. As linhas contínuas nos gráficos da Figura 11 indicam o desvio padrão como percentual em relação à média, ou seja,  $(sd / \overline{F_a^d}) \times 100$ .

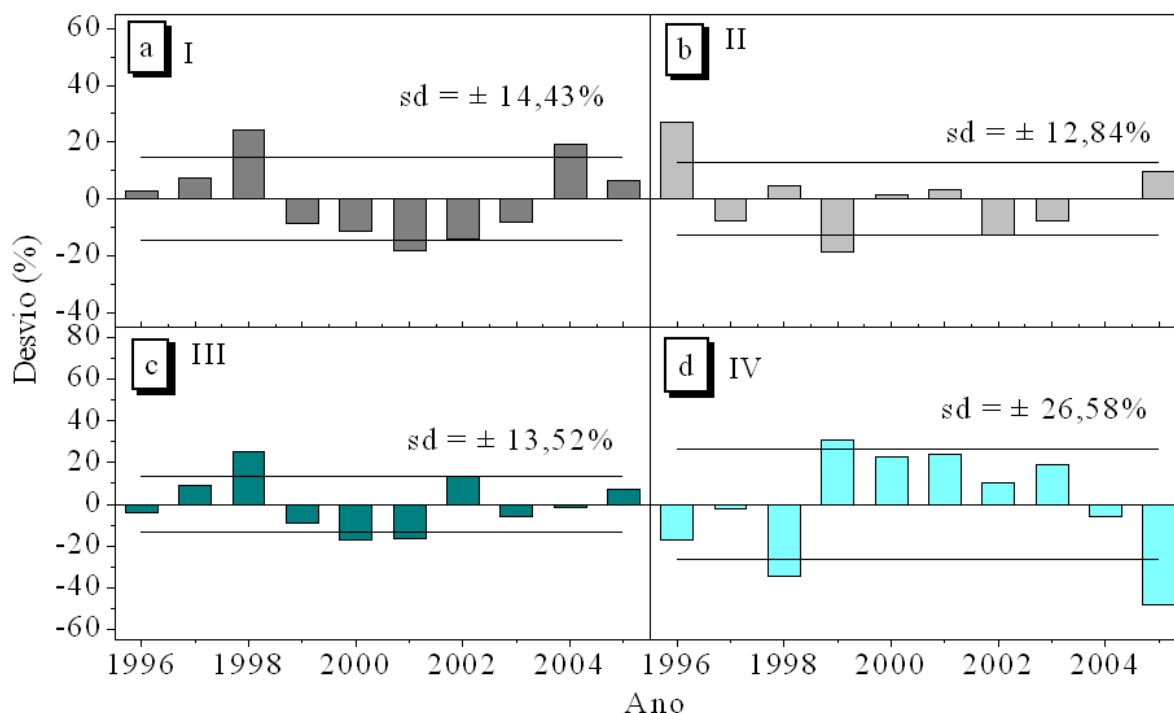


Figura 11. Desvio relativo da média da frequência entre os anos de 1996 a 2005 para as quatro condições de céu: a) I; b) II; c) III; d) IV.

A análise dos desvios relativos das frequências D, nas quatro condições de céu, permite constatar que: na condição de céu nebuloso (Figura 11a), com exceção dos anos de 1998, 2001 e 2004, os D foram normais em relação à média total da série dos 10 anos. Nos anos de 1998 e 2004 os D foram muito elevados e positivos com valores de 24,3% e 19,4% respectivamente ( $D >$  desvio padrão total), enquanto que, no ano de 2001 o desvio foi também elevado e negativo com valor de -18,2% ( $D <$  desvio padrão total).

Na condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o céu difuso (Figura 11b), com exceção dos anos de 1996 e 1999, os resultados foram normais. Em 1996, o D foi positivo e acima da média com valor de 27,0%, enquanto que, o D em 1999 foi também elevado e negativo, com valor de -18,5%.

Na condição de céu nebuloso com dominância para de céu claro (Figura 11c), os anos de 1998, 2000 e 2001 anormais: em 1998 o D foi positivo com valor de 25,3%; nos anos de 2000 e 2001 os D foram negativos, com valores -17,2% e -16,2%, respectivamente. Para a condição de céu claro (Figura 11d), os D dos anos de 1998, 1999 e 2005 foram anormais: em 1998 e 2005 os desvios foram negativos, com valores de -34,8% e -

48,0%, respectivamente, enquanto que, em 1999 o desvio relativo foi positivo com valor de 30,9%.

Tabela 3. Valores de desvio relativo das frequências entre os anos de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV.

Ano	Condição de céu			
	I	II	III	IV
	D (%)	D (%)	D (%)	D (%)
1996	2,94	27,03	-4,18	-16,86
1997	7,54	-7,65	9,06	-2,02
1998	24,29	4,52	25,32	-34,77
1999	-8,55	-18,46	-9,21	30,95
2000	-11,42	1,64	-17,23	22,78
2001	-18,18	3,43	-16,25	24,09
2002	-14,11	-12,76	13,18	10,28
2003	-8,25	-7,65	-5,92	19,13
2004	19,44	0,04	-1,69	-5,61
2005	6,29	9,87	6,94	-47,97
<b>Desvio padrão</b>	<b>± 14,43</b>	<b>± 12,84</b>	<b>± 13,52</b>	<b>± 26,58</b>

Na Figura 12 são apresentados os desvios relativos D da nebulosidade ( $f$ ) e precipitação acumulada (P). Os desvios relativos aqui apresentados foram calculados similarmente ao apresentado na Equação 11 e expressam o percentual entre os valores das médias ou acumulados em cada ano em relação à média dos 10 anos.

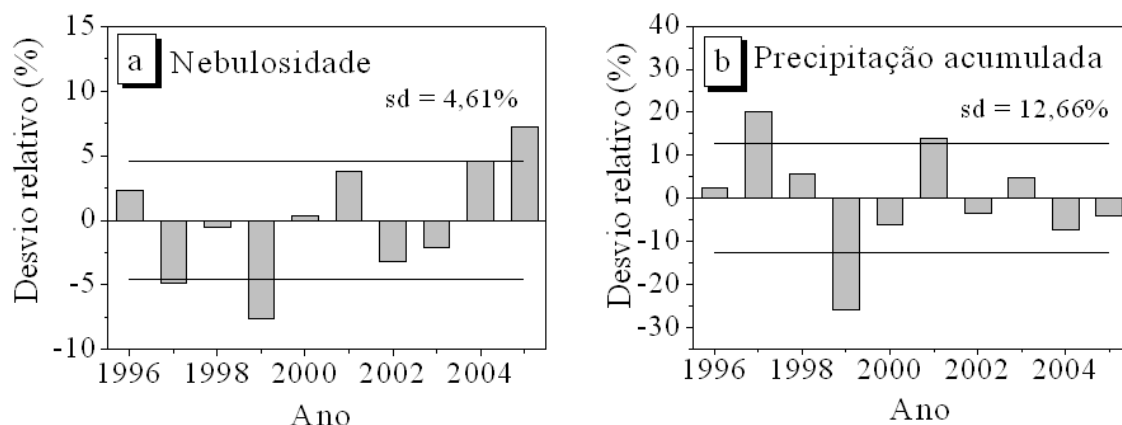


Figura 12. a) Desvio relativo da nebulosidade, período de 1996 a 2005; b) Desvio relativo da precipitação acumulada, período de 1996 a 2005.

Os desvios relativos  $D$  da frequência anual diária  $F_a^d$  em relação à média  $\overline{f_a^d}$  (Figura 12a) foram normais na maioria dos anos. As exceções ocorreram no ano de 1999, o qual apresentou  $D < -7,31\%$ , e no ano de 2005 com  $D > 7,35\%$ , respectivamente. Comparando-se os valores de  $D$  em relação à  $\overline{f_a^d}$  (Figura 12), com os valores de  $D$  em relação à  $\overline{F_a^d}$  (Figura 11), verifica-se que a condição de céu IV é a única condição que foi afetada diretamente pela ausência ou excesso de nuvens. O baixo valor da  $\overline{f_a^d}$ , ou elevado número de horas de brilho solar, em 1999, influenciou no acentuado aumento da  $F_a^d$  da condição de céu IV na série. No ano de 2005, verificou-se a relação inversa, o elevado valor de nebulosidade, ou baixo número de horas de brilho solar, representou uma acentuada redução da  $F_a^d$  da condição de céu IV. Nos demais anos, onde a nebulosidade foi normal em relação à sua média geral, não houve nenhum grande aumento ou redução de  $F_a^d$  em qualquer uma das quatro condições de céu. Dentro dos limites da normal, o aumento de  $F_a^d$  de uma ou outra condição resultou em acréscimo ou decréscimo das demais condições.

Em relação à precipitação acumulada anual  $P_a$ , ou presença de vapor de água na atmosfera, Figura 12b, os valores de  $D$  foram na maioria dos anos dentro dos valores previstos ( $1389,06 \text{ mm} \pm 12,66\%$  pela serie normal). As exceções ocorreram nos anos

de 1997, 1999 e 2001, onde nos anos de 1997 e 2001 observou-se  $D > 12,66\%$  (20,02% e 14,06%, respectivamente), enquanto que, em 1999,  $D < 12,66\%$  (-25,79%). No ano de 1999, o baixo valor de  $P_a$  foi acompanhado de baixa nebulosidade, que favoreceram o aumento da  $F_a^d$  da condição de céu IV neste ano. Em 2001, o valor elevado de forma anormal na  $P_a$  foi acompanhado de redução anormal da  $F_a^d$  da condição de céu II e da III. Em 1997, não foi significativa a influência das chuvas em regime anormal sobre a variação da frequência relativa para nenhum dos quatro intervalos.

#### **4.2.2 Influência de fenômenos climáticos de macro escala sobre as condições de céu**

Os fenômenos climáticos em nível de macro escala que vêm influenciando o clima do Brasil são: o El Niño e o La Niña. O primeiro gera mudanças nos padrões de vento a nível mundial, afetando assim, os regimes de chuva e nebulosidade e temperatura do ar em regiões tropicais e locais de latitudes médias. Seus efeitos sobre o clima no Brasil dependem da região e da intensidade do fenômeno. Na região sudeste, gera moderado aumento das temperaturas médias, não havendo um padrão característico de mudanças das chuvas. O segundo fenômeno apresenta características opostas ao El Niño.

Com relação ao tempo de recorrência e de duração, enquanto o El Niño pode ocorrer em intervalos de 1 a 10 anos, com duração de 1 ano, o La Niña não apresenta um padrão de recorrência, e pode apresentar duração maior. Segundo o CPTEC (2009), considerando o período de 1996 a 2005, os seguintes anos apresentaram a ocorrência do El Niño: 1997–1998 (intensidade forte), 2002–2003 (intensidade moderada) e 2004–2005 (intensidade fraca); e para La Niña: 1995–1996 (intensidade fraca) e 1998–2001 (intensidade moderada).

Considerando os efeitos dos fenômenos El Niño e La Niña sobre o regime de chuvas (Figura 12b), os anos de 1997, 1999 e 2001 apresentaram  $D$  acima do intervalo  $1389,06 \text{ mm} \pm 12,66\%$  (respectivamente, 20,02%, -25,79% e 14,06%), sendo considerados anos fora do previsto pela normal da série dos 10 anos, estando todos associados



com os fenômenos El Niño ou La Niña. Para nebulosidade, Figura 12a, os anos de 1997, 1999 e 2005 apresentaram D fora do intervalo  $0,48 \pm 4,61\%$  (respectivamente,  $-4,84\%$ ,  $-7,68\%$  e  $7,28\%$ ), sendo considerados anos fora do previsto pela normal da série dos 10 anos, estando todos associados com os fenômenos El Niño ou La Niña.

No ano de 1997, em que foi registrada a ocorrência de El Niño de intensidade forte, o elevado valor de  $P_a$  observado (1667,20 mm) e o baixo valor de  $\overline{f_a^d}$  ( $0,46 \pm 0,02$ ) em relação às respectivas séries dos 10 anos, podem estar associados ao fenômeno macro climático. Porém, em nenhuma das quatro condições de céu foi percebida alterações anormais na  $F_a^d$ . O ano de 1999 está no meio do intervalo de 1998–2001, quando foi registrado um episódio de La Niña de intensidade moderada, podendo o baixo valor de  $P_a$  registrado (1030,80 mm) em relação à normal da série dos 10 anos estar associado ao fenômeno macro climático, pois é no seu período intermediário que o fenômeno atinge sua intensidade máxima. Neste ano houve alterações anormais nas  $F_a^d$  das condições de céu II e IV, influenciados pelo reduzido volume de chuvas e baixa nebulosidade registrados. No ano de 2001, ano de término da ocorrência de La Niña de intensidade moderada, foi registrado valor de precipitação anormal, 14,06% acima do valor médio total  $\overline{P_a} = 1389,06 \text{ mm} \pm 12,66\%$ . Neste ano houve alteração anormal na  $F_a^d$  das condições de céu III e I, influenciados pelo elevado volume de chuvas registrado e pela nebulosidade. Em 2005, quando foi registrada a ocorrência de El Niño intensidade fraca, o valor elevado e anormal de nebulosidade (0,51) ocasionou uma redução anormal na  $F_a^d$  da condição de céu IV.

### 4.3 Distribuição das frequências mensais diárias

Na Figura 13 e Tabela 4 são apresentados os valores médios mensais de nebulosidade, precipitação acumulada e AOD com seus desvios da média.

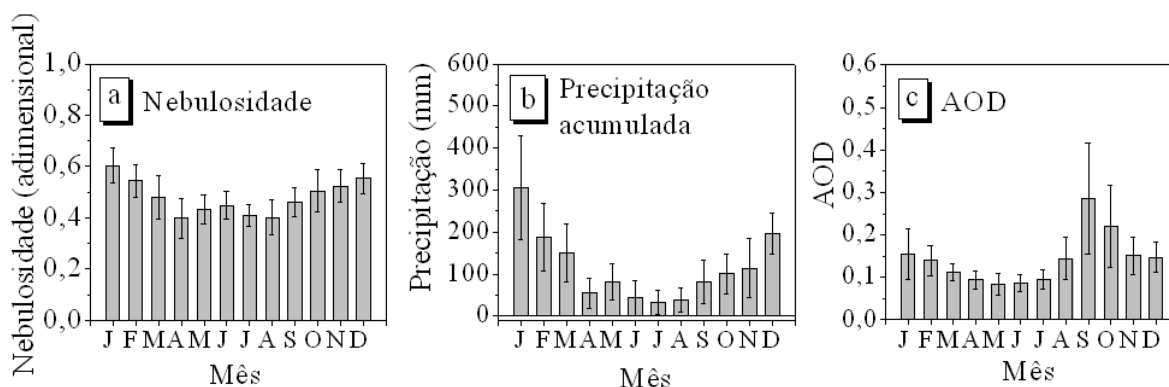


Figura 13. a) Nebulosidade média diária mensal, período de 1996 a 2005; b) precipitação acumulada média mensal, período de 1996 a 2005; c) Profundidade ótica de aerossóis (AOD) média diária mensal, período de 2000 a 2005.

Tabela 4. Valores referentes à: nebulosidade média mensal, período de 1996 a 2005; precipitação acumulada mensal, período de 1996 a 2005; e profundidade ótica de aerossóis (AOD), período de 2000 a 2005.

Mês	Nebulosidade	Precipitação acumulada	AOD
	$\langle f_m^d \rangle$ (adimensional)	$\overline{P_m}$ (mm)	$\overline{AOD_m^d}$ (adimensional)
<b>Janeiro</b>	0,60 ± 0,07	306,38 ± 123,33	0,15 ± 0,06
<b>Fevereiro</b>	0,54 ± 0,06	188,36 ± 80,67	0,14 ± 0,03
<b>Março</b>	0,48 ± 0,08	149,78 ± 69,52	0,11 ± 0,02
<b>Abril</b>	0,40 ± 0,08	55,07 ± 35,55	0,09 ± 0,02
<b>Mai</b>	0,43 ± 0,06	81,76 ± 44,14	0,08 ± 0,03
<b>Junho</b>	0,45 ± 0,05	43,09 ± 42,60	0,09 ± 0,02
<b>Julho</b>	0,41 ± 0,04	32,93 ± 29,67	0,09 ± 0,02
<b>Agosto</b>	0,40 ± 0,07	38,47 ± 28,15	0,14 ± 0,05
<b>Setembro</b>	0,46 ± 0,06	82,72 ± 52,12	0,29 ± 0,13
<b>Outubro</b>	0,50 ± 0,08	100,68 ± 48,14	0,22 ± 0,10
<b>Novembro</b>	0,52 ± 0,06	114,13 ± 70,17	0,15 ± 0,04
<b>Dezembro</b>	0,55 ± 0,06	195,69 ± 49,25	0,15 ± 0,04

A nebulosidade média diária mensal  $\overline{f_m^d}$ , Figura 13a, decresce dos meses de janeiro (0,61) e dezembro (0,55), para os meses mais centrais do ano, julho (0,41) e agosto (0,40). A exceção ocorre nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, enquanto a nebulosidade aumenta em maio com relação a abril, e em junho comparado a maio. Essa singularidade existe por conta de entradas das frentes frias vindas do sul e sudeste do país, que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, para a região nordeste no outono, nos meses de abril, maio e junho.

A evolução anual da precipitação acompanhou a evolução da nebulosidade (Figura 13a). É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100 mm, aproximadamente. A precipitação é mais elevada nos meses de janeiro (306,38 mm) e menor em julho (32,93 mm). No período chuvoso, de outubro a março (estações primavera e verão) a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre. A chuva convectiva é do tipo localizado com grande variabilidade espacial, a intensidade é moderada a forte dependendo do desenvolvimento vertical da nuvem, a predominância de ocorrência é durante a tarde ou início de noite e a duração é curta a média (de minutos a horas). No período seco, de abril a setembro (estações outono e inverno), a precipitação é do tipo frontal, originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste. A distribuição da chuva é generalizada na região, a intensidade é de fraca a moderada dependendo do tipo de frente fria, e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente.

A evolução anual das médias diárias da AOD ( $\overline{AOD_m^d}$ ), Figura 13c, do período de 2000 a 2005, mostra que a partir do início das queimadas da cana de açúcar em junho/julho, a concentração de aerossóis na atmosfera aumenta consideravelmente no período de agosto ( $0,14 \pm 0,05$ ) a outubro ( $0,22 \pm 0,1$ ), com valor máximo em setembro ( $0,29 \pm 0,13$ ). A concentração começa a decrescer, ao final do ciclo de colheita, até atingir o menor nível no mês de maio ( $0,08 \pm 0,03$ ), respondendo basicamente à emissão feita por indústrias e veículos automotores, antes de iniciar o novo ciclo.

Na Figura 14 e na Tabela 5 é apresentada a distribuição de frequência anual média diária mensal ( $\overline{F_m^d}$ ) para as quatro condições de céu.

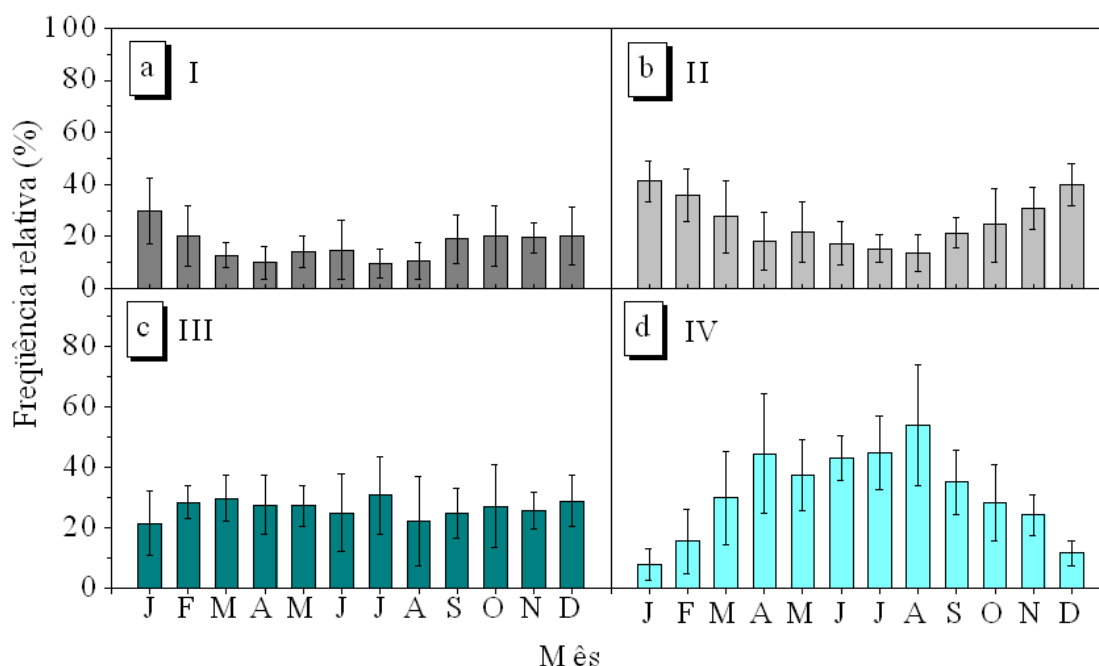


Figura 14. Evolução anual da frequência média diária mensal, período de 1996 a 2005, das condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV.

A  $\overline{F_m^d}$  da condição de céu I (Figura 14a) é maior no período chuvoso, meses de outubro a fevereiro, onde a concentração de nuvens é mais elevada no ano. Neste período, a precipitação convectiva da época e a nebulosidade são responsáveis pelos resultados. Ao contrário, a menor frequência ocorreu no período seco, abril a agosto, onde a concentração de nuvens e vapor de água é a menor do ano; com exceções aos meses de maio e junho, os quais são influenciados pelo aumento da nebulosidade resultante das entradas de frentes frias. O mês de janeiro apresentou o maior valor de média ( $29,78\% \pm 12,82$ ) e julho o menor ( $9,50\% \pm 5,43$ ).

Para a condição de céu II (Figura 14b), a  $\overline{F_m^d}$  acompanhou a evolução anual da precipitação: aumentou gradativamente nos meses do período chuvoso e diminuiu nos meses mais secos. Janeiro apresentou o maior valor de média ( $41,23\% \pm 7,76$ ) e agosto o menor ( $13,57\% \pm 7,08$ ).

Para a condição de céu III (Figura 14c), o mês de julho apresentou o maior valor de média ( $30,60\% \pm 12,80$ ) e janeiro o menor ( $21,29\% \pm 10,59$ ). Dentre as quatro

classes de condição de céu, esta é a que apresenta a menor variação ao longo do ano, desvio padrão de 2,87.

A evolução da  $\overline{F_m^d}$  da de céu claro (Figura 14d) é inversa a da nebulosidade e da precipitação, sendo maior no período seco onde são baixas as concentrações da nebulosidade e de vapor de água, e maior a concentração de aerossóis. O mês de agosto apresentou o maior valor de  $\overline{F_m^d}$  ( $53,80\% \pm 20,20$ ); e janeiro o menor ( $7,70\% \pm 5,08$ ). O mês de abril apresentou um dos maiores valores de  $\overline{F_m^d}$  da condição de céu IV dentro da série de 10 anos:  $44,36\% \pm 19,72$ . É provável que o mês de abril, sendo um mês posterior ao período chuvoso e precedente ao período das entradas de frentes frias, seja um mês com condição transitória de céu claro, de baixos valores de nebulosidade e precipitação, antes do inverno.

Tabela 5. Valor da frequência média diária mensal, período de 1996 a 2005 para as condições de céu I, II, III e IV.

Mês	Condição de céu			
	I	II	III	IV
	$\overline{F_m^d}$ (%)	$\overline{F_m^d}$ (%)	$\overline{F_m^d}$ (%)	$\overline{F_m^d}$ (%)
<b>Janeiro</b>	29,78 ± 12,82	41,23 ± 7,76	21,29 ± 10,59	7,70 ± 5,08
<b>Fevereiro</b>	20,24 ± 11,50	35,96 ± 10,05	28,31 ± 5,56	15,48 ± 10,66
<b>Março</b>	12,86 ± 4,85	27,62 ± 14,04	29,66 ± 7,74	29,87 ± 15,45
<b>Abril</b>	9,88 ± 6,28	18,35 ± 11,12	27,41 ± 9,88	44,36 ± 19,72
<b>Mai</b>	13,99 ± 6,03	21,63 ± 11,77	27,10 ± 6,88	37,28 ± 11,83
<b>Junho</b>	14,83 ± 11,20	17,37 ± 8,38	24,92 ± 12,80	42,89 ± 7,36
<b>Julho</b>	9,50 ± 5,43	15,36 ± 5,33	30,60 ± 12,80	44,55 ± 12,17
<b>Agosto</b>	10,66 ± 6,96	13,57 ± 7,08	21,98 ± 14,86	53,80 ± 20,20
<b>Setembro</b>	19,02 ± 9,46	21,40 ± 5,89	24,67 ± 8,30	34,91 ± 10,67
<b>Outubro</b>	20,25 ± 11,54	24,47 ± 14,16	27,07 ± 13,69	28,22 ± 12,61
<b>Novembro</b>	19,49 ± 5,98	30,90 ± 8,03	25,54 ± 6,13	24,06 ± 6,91
<b>Dezembro</b>	20,15 ± 11,15	39,70 ± 8,10	28,71 ± 8,57	11,44 ± 4,32

### 4.3.1 Efeito dos aerossóis sobre a frequência das condições de céu

Parte dos aerossóis presentes na atmosfera atua como núcleos de condensação de nuvens (NCN) ou alterando as propriedades físicas das nuvens (albedo, absorção, espalhamento), e afetando assim o sistema climático quanto à nebulosidade, precipitação e quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície terrestre. Em condições de baixa umidade e elevada concentração de aerossóis do tipo NCN na atmosfera, a distribuição do vapor de água disponível entre as partículas de aerossóis aumenta. Nestas condições, as gotículas formadas crescem pouco em volume e lentamente, não favorecendo a ocorrência de precipitação porque as gotas não crescem o suficiente para haver colisão-coalescência e reduzindo a ocorrência da condição de céu claro (ROSENFELD, 2000; RAMANATHAN et al., 2001). Após este período de tempo, não havendo precipitação, normalmente as nuvens tendem a evaporarem ou são carregadas por correntes convectivas para outros locais.

A literatura mostra estudos verificando reduções nas frequências da condição de céu claro e aumento da de céu parcialmente nebuloso por meio do efeito da alta concentração de aerossóis na atmosfera. Li e Lam (2001) observaram em Hong Kong, cidade poluída pela emissão de aerossóis oriundos principalmente da queima de combustíveis fósseis, que a frequência anual horária da condição de céu claro nesta cidade é muito baixa (7%), sendo predominante a de céu parcialmente nebuloso (80%). Os valores de AOD para Hong Kong variam entre valores de 0,51 a 0,95 (CHENG et al., 2006). Ogunjobi et al. (2002) observaram em Kwangju e Seoul, na Coreia do Sul, valores de frequência de dias com céu claro da ordem de 5% e 4%, respectivamente. Esses valores foram considerados baixos e foram devidos à influência da elevada turbidez atmosférica resultante da queima de biomassa agrícola e da poeira oriunda do deserto de Gobi. Na China, Che et al. (2006) observaram em várias localidades reduções gradativas de ocorrência de dias de céu claro em função do aumento gradativo da emissão de aerossóis, devido ao aumento da queima de combustíveis fósseis. Algumas destas cidades apresentam hoje AOD médio anual entre 0.37 e 0.55 (LUO et al., 2000).

Na região de Botucatu, o aumento na concentração de aerossóis presentes na atmosfera ocorre no período seco, com o início das queimadas na cana de açúcar

(julho), onde a umidade relativa do ar e a precipitação são baixas, favorecendo o acúmulo na atmosfera dos aerossóis. Ao longo do ano, o pico na concentração de aerossóis é registrada em setembro, Figura 13c. Estes aerossóis são em média compostos de 44,44% de material particulado fino ( $d_p < 2,5 \mu\text{m}$ ) e 55,56% de material particulado grosso ( $2,5 < d_p < 10 \mu\text{m}$ ) (LARA et al., 2005). Na Figura 15a é apresentada a frequência das coberturas de céu nebuloso com dominância para o difuso, nebuloso com dominância para o claro e claro, para o mês de setembro no período de 2000 a 2007, e na Figura 15b as médias mensais diárias da nebulosidade e profundidade ótica de aerossóis AOD e a frequência de dias com precipitação, para o mesmo período.

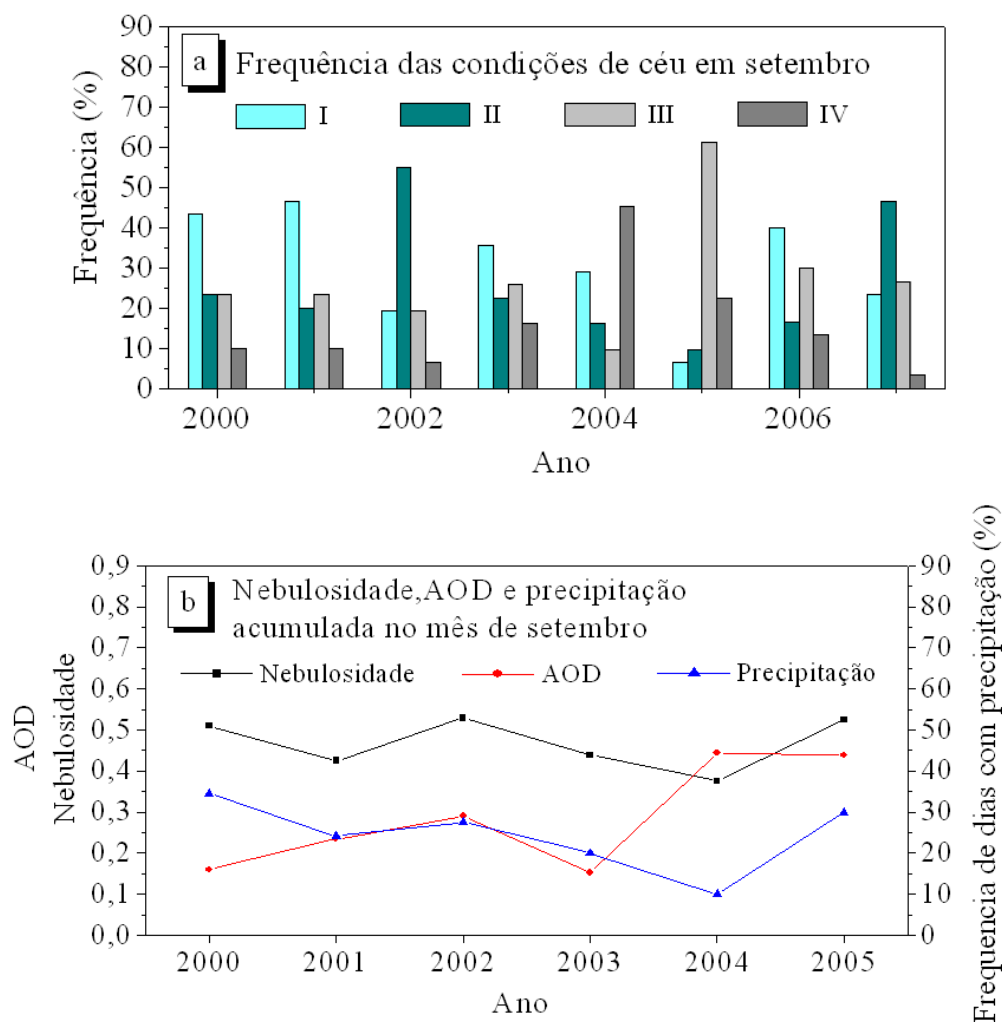


Figura 15. a) Frequência mensal diária, em setembro no período de 2000 a 2005, das quatro condições de céu; b) Média diária mensal da nebulosidade e

AOD e frequência de dias com ocorrência de precipitação.

Analisando a nebulosidade, AOD e as frequências de dias com precipitação e da condição de céu IV em Botucatu, constata-se que apenas nos anos de 2004 a 2005 ocorreram possibilidades de que os aerossóis ( $\overline{AOD}_m^d = 0,44$ ) tenham influenciado nos valores dos demais parâmetros, ou seja, crescimento da nebulosidade, mudança da precipitação e redução da frequência de dias de claro. Nos demais anos a concentração dos aerossóis foi da ordem de concentração do período chuvoso (Figura 13c).

Para o ano de 2004, o valor da AOD da ordem de 0,44 (igual a de 2005) não influenciou a formação de nuvens, visto que a nebulosidade foi da ordem de 0,38 (Figura 15b), e nem tão pouco a precipitação e a diminuição frequência de dias de céu claro. Para um valor de AOD da ordem de 0,44, o ano de 2005 apresentou um valor de nebulosidade,  $f = 0,53$ . Este valor de nebulosidade foi considerado elevado comparado ao valor médio da série dos 10 anos, que é de  $f = 0,46 \pm 0,06$  (Tabela 4). Esta alteração da nebulosidade gerou uma redução na frequência da condição de céu IV ( $F_m^d = 6,45\%$ ) e um elevado aumento na frequência da II ( $F_m^d = 61,29\%$ ), mas não houve mudança uma climática da precipitação, ela foi da ordem dos anos anteriores. Este resultado está em concordância com os observados Li e Lam (2001), Ogunjobi et al. (2002) e Che et al. (2006).

#### 4.4 Distribuição de frequência diurna.

##### 4.4.1 Distribuição de frequência diurna média horária anual

Na Figura 16 e na Tabela 6 são apresentados a evolução diurna da frequência média anual horária  $\overline{F}_a^h$  para as quatro condições de céu.



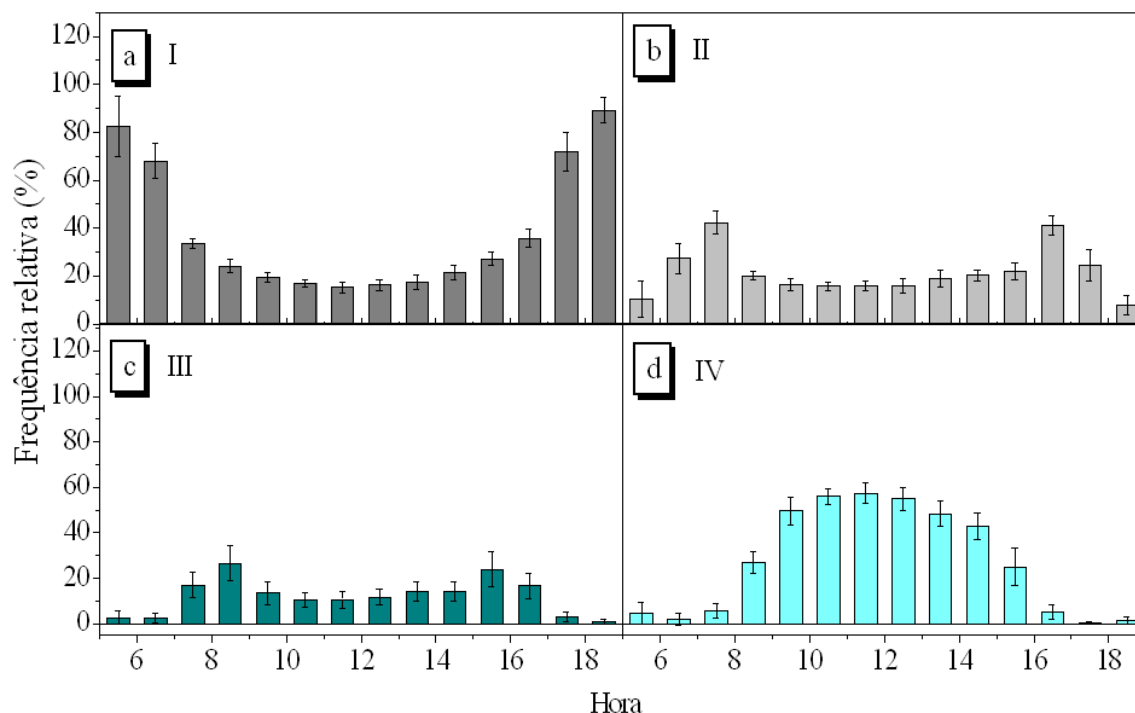


Figura 16. Evolução diurna da frequência anual horária, no período de 1996 a 2005, das condições de céu: a) I; b) II; c) III e d) IV.

Para a condição de céu I (Figura 16a), a evolução diurna das  $\overline{F_a^h}$  é inversamente proporcional à evolução diurna da massa ótica, que decresce no sentido dos intervalos horários do início e final do dia para os intervalos horários próximos ao meio do dia. Quanto maior a massa ótica, maior é o percurso feito pela radiação solar antes de incidir sobre a superfície terrestre e também maior a probabilidade dela interagir com nuvens, vapor de água e aerossóis presentes na atmosfera, sofrendo atenuação e gerando assim um decréscimo no valor de  $K_T$ . Na Figura 17 é apresentada a evolução diurna da média anual horária do índice de claridade  $K_T$ , a qual mostra que nos intervalos de maior massa ótica, entre 5 e 6 horas e entre 18 e 19 horas, a condição de céu predominante é a nebuloso, pois os valores médios de  $K_T$  e desvios estão quase em sua totalidade dentro do intervalo de  $K_T$  inferior a 0,35 (80 e 90%, respectivamente).

Tabela 6. Evolução diurna da frequência anual horária, no período de 1996 a 2005, das condições de céu: I, II, III e IV.

Hora	I	II	III	IV
	$\overline{F_a^h}$ (%)	$\overline{F_a^h}$ (%)	$\overline{F_a^h}$ (%)	$\overline{F_a^h}$ (%)
5,5	82,47 ± 12,50	10,32 ± 7,62	2,66 ± 2,81	4,52 ± 4,72
6,5	68,10 ± 7,34	27,39 ± 6,31	2,49 ± 2,07	1,92 ± 2,48
7,5	33,66 ± 2,17	42,32 ± 4,74	17,04 ± 5,48	5,69 ± 3,21
8,5	24,14 ± 2,87	20,16 ± 1,97	26,71 ± 7,85	27,02 ± 4,60
9,5	19,45 ± 1,84	16,54 ± 2,62	13,48 ± 4,93	49,64 ± 5,95
10,5	16,69 ± 1,53	15,83 ± 1,76	10,60 ± 3,32	56,13 ± 3,42
11,5	15,17 ± 2,32	15,81 ± 1,94	10,75 ± 3,75	57,51 ± 4,58
12,5	16,28 ± 2,36	16,00 ± 2,99	11,79 ± 3,46	55,04 ± 5,10
13,5	17,47 ± 2,99	18,91 ± 3,34	14,32 ± 4,43	48,45 ± 5,43
14,5	21,33 ± 2,93	20,44 ± 2,27	14,21 ± 4,35	42,95 ± 6,05
15,5	27,13 ± 2,75	21,95 ± 3,57	23,98 ± 7,46	25,07 ± 8,09
16,5	35,81 ± 3,84	41,14 ± 4,25	16,67 ± 5,73	5,29 ± 3,06
17,5	71,94 ± 8,17	24,43 ± 6,73	2,93 ± 2,22	0,42 ± 0,46
18,5	89,30 ± 5,49	7,97 ± 4,02	0,95 ± 0,95	1,65 ± 1,54

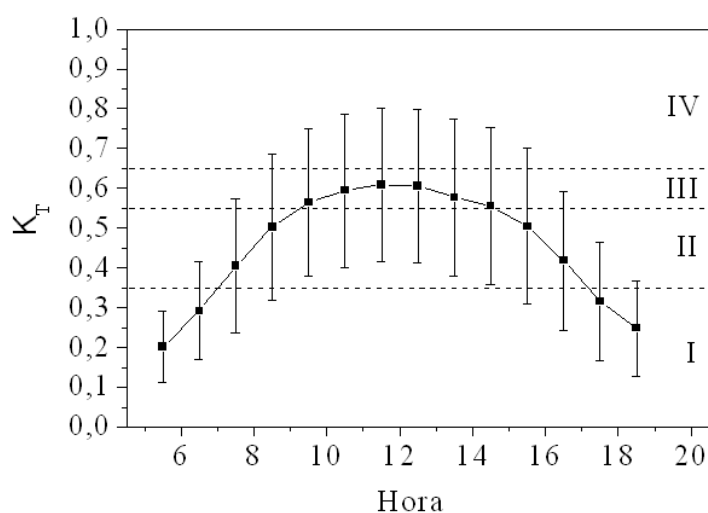


Figura 17. Evolução diurna do  $K_T$  médio anual horário no período de 1996 a 2005.

No intervalo entre as 5 e 6 horas, conforme Figura 17, a cobertura de céu é 100% I. Entretanto, a Figura 16 mostra que há uma parcela de dias em que dentro deste intervalo ocorrem outras condições de céu além da I: 10,32% II; 2,66% III e 4,52% IV. Essa discrepância acontece, pois pode haver registros de dias em que dentro deste intervalo horário ocorreram valores de  $K_T$  superiores a 0,35 que, quando processado estatisticamente no cálculo da média, foram ocultados ao terem seus valores de  $K_T$  diluídos dentro da média. A mesma observação pode ser feita para o intervalo entre 18 e 19 horas.

Os valores de  $\overline{F_a^h}$  da condição nebulosa variaram de  $15,17\% \pm 2,32$ , no intervalo horário das 11,5 horas, até  $89,30\% \pm 5,49$ , no intervalo horário das 18,5 horas. Os valores de frequência nos intervalos horários ao final do fotoperíodo maiores que os do início do fotoperíodo evidenciam o efeito da alta concentração de nuvens, provocadas pela intensa evapotranspiração de superfícies úmidas nas horas de maior temperatura, que normalmente ocorrem no final do dia.

A evolução diurna das  $\overline{F_a^h}$  da condição de céu II, Figura 16b, apresenta os menores valores de  $\overline{F_a^h}$  no primeiro e último intervalos horários, respectivamente, e os maiores a partir dos antepenúltimos intervalos do início (7 as 8 horas) e final (16 as 17 horas) do dia. Essa característica na evolução pode ser explicada por meio dos baixos valores de  $K_T$  (Figura 17) nestes intervalos horários (primeiro, segundo, penúltimo e último intervalo horários), os quais são quase que inteiramente de condição de céu I (acima de 70,0%). A partir destes últimos horários,  $\overline{F_a^h}$  decresce de forma similar a condição de céu I, onde atinge valores mínimos nos horários próximos ao meio do dia. A  $\overline{F_a^h}$  da condição de céu II variou de  $15,81\% \pm 1,94$ , as 11,5 horas, até  $42,32\% \pm 4,74$ , as 7,5 horas.

Para a condição de céu III, os valores de  $\overline{F_a^h}$ , a evolução diurna apresenta também o efeito da massa ótica nas primeiras e últimas horas do dia. Os valores da  $\overline{F_a^h}$ , na terceira (entre 8 e 9 horas) e antepenúltima hora do dia (15 horas as 16 horas), também são baixos devido os efeitos dos baixos valores de  $K_T$  nos três intervalos horários. Conseqüentemente, os intervalos horários de maior frequência começam as 9 horas e as 15 horas, ambos no quarto intervalo horário no sentido do início e fim, para o meio do dia. Os

valores de  $\overline{F_a^h}$  da condição de céu III, variaram de  $0,95\% \pm 0,95$ , as 18,5 horas, até  $26,71\% \pm 7,85$ , as 8,5 horas .

A evolução diurna das  $\overline{F_a^h}$  da condição de céu I, Figura 16d, é crescente no sentido do decréscimo da massa ótica, início do dia como uma função parabólica até passar por um valor máximo no intervalo horário 11,5 horas, e decrescendo posteriormente com o aumento gradativo da massa ótica, até o último intervalo horário no fim do dia. A evolução diurna das  $\overline{F_a^h}$  é proporcional a evolução média horária anual de  $K_T$ . Nos intervalos horários em que os valores de  $K_T$  são baixos, início e final do dia, os valores da  $\overline{F_a^h}$  são menores, e nos intervalos horários em  $K_T$  são altos, próximos ao meio dia, os valores da frequência horária são elevados. Os valores de  $\overline{F_a^h}$  da condição de céu I, variaram de  $0,42\% \pm 0,46$ , as 17,5 horas, até  $57,51\% \pm 4,58$ , as 11,5 horas.

#### 4.4.2 Distribuição de frequência diurna média horária mensal

Na Figura 18 e na Tabela 7 é apresentada a evolução diurna da frequência média mensal horária  $\overline{F_m^h}$  da condição de céu I, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005.

A evolução diurna da  $\overline{F_m^h}$  em todos os meses possui um comportamento similar, onde os valores decrescem nos intervalos horários do início e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia. Ou seja, a evolução diurna da  $\overline{F_m^h}$  acompanha à evolução diurna do ângulo de elevação solar, ou inversamente, à evolução diurna do ângulo zenital. Essa característica nos permite concluir que o fator atmosférico responsável por essa distribuição de frequência é a massa ótica, que decresce no sentido dos intervalos horários do início e final do dia, para os intervalos horários no meio do dia. Quanto maior a massa ótica, maior é a probabilidade de a radiação global ser absorvida ou espalhada por nuvens, vapor de água e aerossóis, reduzindo os valores de  $K_T$ .

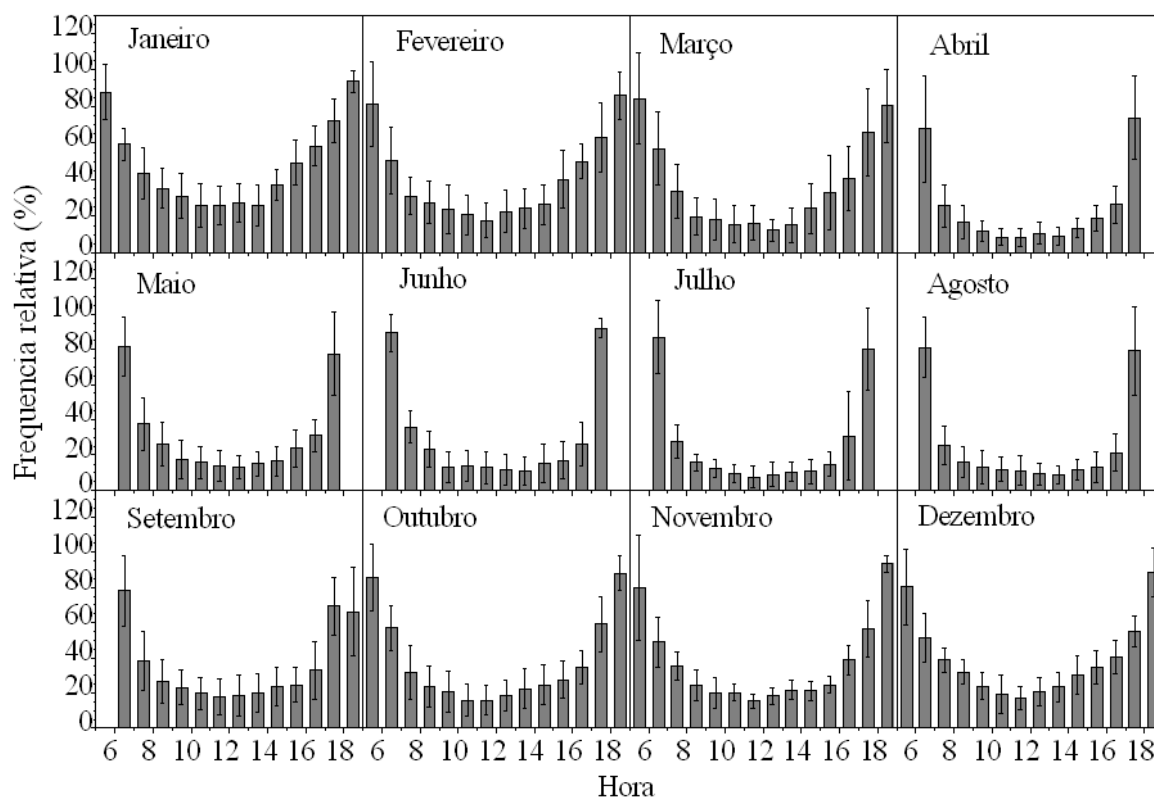


Figura 18. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu I, no período de 1996 a 2005.

A  $\overline{F_m^h}$  da condição de céu I é maior nos meses que compõem o período chuvoso (meses janeiro fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro), nos quais a concentração de nuvens e vapor de água é elevada no ano. Por outro lado,  $\overline{F_m^h}$  é menor no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, onde predomina a condição de céu claro e baixas concentrações de vapor de água na atmosfera. No geral, em relação a evolução diurna, como mostrado na Tabela 7, o mês de janeiro apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$ , e julho as menores ao longo do fotoperíodo.

Tabela 7. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu I, no período de 1996 a 2005.

Hora	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)
5,5	59,4 ± 8,7	81,3 ± 22,9	52,7 ± 18,7	—	—	—	—	—	—	85,5 ± 18,70	79,7 ± 30,1	80,2 ± 21,6
6,5	43,3 ± 14,1	50,1 ± 18,2	31,3 ± 13,6	67,8 ± 29,0	81,7 ± 16,9	89,4 ± 10,5	86,9 ± 20,9	81,2 ± 17,1	78,0 ± 20,1	56,9 ± 12,7	49,0 ± 14,1	51,3 ± 14,1
7,5	35,3 ± 11,1	30,8 ± 10,2	18,2 ± 9,6	25,6 ± 11,5	37,6 ± 15,1	35,8 ± 9,2	27,6 ± 9,8	25,8 ± 10,9	38,4 ± 16,9	31,8 ± 15,4	35,2 ± 8,0	38,7 ± 7,0
8,5	31,1 ± 12,1	27,3 ± 11,6	16,5 ± 10,3	16,6 ± 9,4	26,1 ± 12,5	23,3 ± 10,2	15,7 ± 4,9	16,0 ± 9,0	26,5 ± 12,6	23,5 ± 11,7	24,7 ± 8,8	31,8 ± 6,7
9,5	25,9 ± 12,1	23,9 ± 13,5	14,3 ± 9,7	11,8 ± 5,9	17,7 ± 10,8	13,2 ± 8,7	12,3 ± 5,1	13,1 ± 9,2	23,1 ± 10,0	20,4 ± 11,7	19,9 ± 8,8	23,9 ± 7,5
10,5	25,7 ± 10,4	20,8 ± 10,9	15,0 ± 8,8	8,6 ± 4,8	15,9 ± 9,2	14,1 ± 8,7	9,6 ± 4,9	11,8 ± 6,9	19,7 ± 8,9	15,9 ± 9,1	20,3 ± 4,9	19,2 ± 10,9
11,5	27,4 ± 10,6	17,6 ± 9,4	11,3 ± 5,5	8,2 ± 5,0	13,8 ± 8,5	12,8 ± 8,9	7,6 ± 5,9	11,1 ± 8,5	18,0 ± 10,3	15,9 ± 8,4	15,4 ± 4,0	16,9 ± 6,8
12,5	25,7 ± 11,1	22,7 ± 11,3	14,0 ± 8,8	10,7 ± 6,0	13,2 ± 6,7	11,5 ± 8,8	9,0 ± 7,1	9,2 ± 6,3	18,4 ± 11,7	18,3 ± 8,4	18,2 ± 4,5	20,6 ± 8,3
13,5	37,1 ± 8,4	24,1 ± 10,8	22,2 ± 12,8	9,2 ± 4,7	15,1 ± 7,0	11,1 ± 8,2	10,5 ± 5,2	8,8 ± 5,2	19,8 ± 11,0	22,5 ± 11,3	21,5 ± 5,5	23,3 ± 8,6
14,5	49,2 ± 12,4	26,3 ± 10,7	30,4 ± 18,5	13,4 ± 5,2	16,6 ± 8,5	15,3 ± 10,9	10,7 ± 7,0	11,7 ± 5,6	23,5 ± 11,0	24,6 ± 11,5	21,3 ± 5,3	30,1 ± 10,6
15,5	58,4 ± 11,0	40,2 ± 16,1	37,5 ± 16,1	18,5 ± 7,1	23,8 ± 10,8	17,0 ± 10,3	15,0 ± 6,9	13,4 ± 8,8	24,6 ± 9,9	27,4 ± 10,5	24,4 ± 4,8	34,4 ± 9,4
16,5	72,1 ± 12,1	50,0 ± 9,5	60,8 ± 21,9	26,4 ± 10,2	31,1 ± 9,2	26,2 ± 12,7	30,9 ± 25,4	21,5 ± 10,4	32,8 ± 16,4	34,5 ± 9,6	38,7 ± 8,4	40,6 ± 9,5
17,5	93,8 ± 5,9	62,8 ± 18,9	74,2 ± 18,5	73,9 ± 22,6	77,4 ± 23,8	92,1 ± 5,3	80,2 ± 23,5	79,3 ± 25,4	69,5 ± 16,4	59,1 ± 15,5	56,4 ± 16,1	55,0 ± 8,7
18,5	59,4 ± 8,7	81,3 ± 22,9	52,7 ± 18,7	—	—	—	—	—	65,8 ± 25,2	88,0 ± 10,0	93,4 ± 4,7	88,5 ± 13,9

A  $\overline{F_m^h}$  da condição de céu II, Figura 19, é também maior nos meses correspondentes ao período chuvoso e menor nos meses do período seco. Similarmente a condição de céu I, na evolução diurna, o mês de janeiro apresentou as maiores os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$ , e julho as menores.

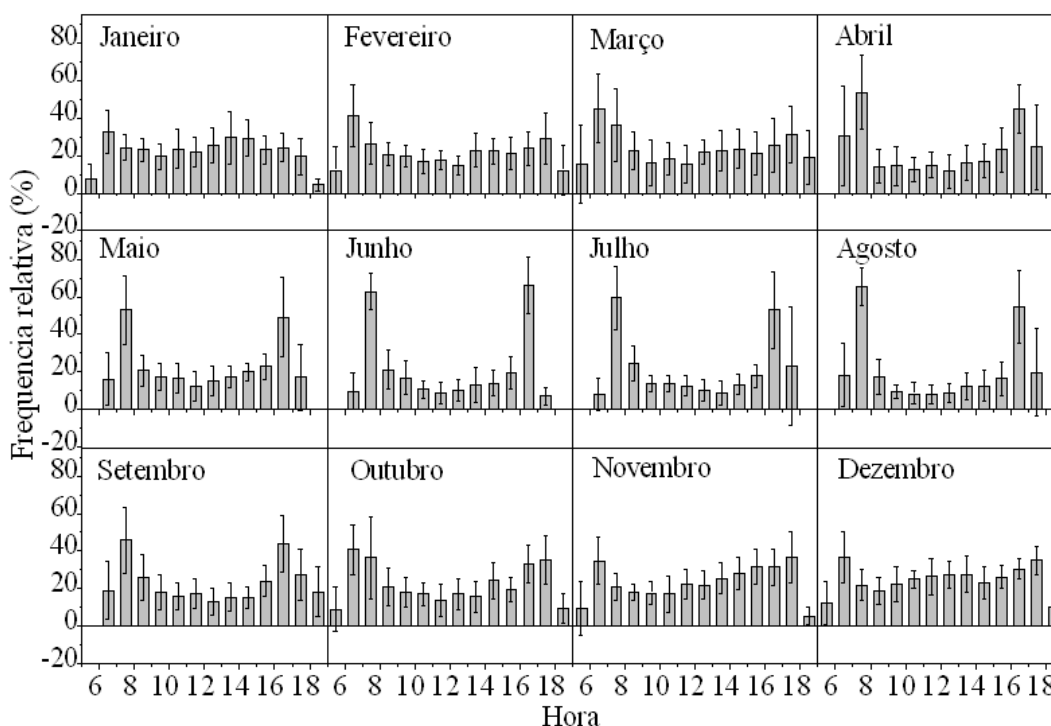


Figura 19. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu II, no período de 1996 a 2005.

condição de céu II apresenta, na maioria dos meses, os menores valores de  $\overline{F_m^h}$  no primeiro e último intervalo horário, e as maiores no sentido do segundo e penúltimo intervalo horário para os intervalos horários no meio do dia. A partir destes últimos horários, a  $\overline{F_m^h}$  decresce de forma similar a condição de céu nebuloso, onde atinge valores mínimos nos horários do meio do dia. Essa anomalia está associada aos baixos valores de  $K_T$  no primeiro e último intervalo horário, que são quase que inteiramente de condição de céu I que atingiram níveis de 60% a 90% dependendo do mês. Basicamente a fração restante dos 100% pertence as demais condições de céu, tendo percentuais na seqüência: II, III e IV. Dentro da evolução diurna das frequências, como mostrado na Tabela 8, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$ , e agosto os menores, ao longo do fotoperíodo.

Tabela 8. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu II, no período de 1996 a 2005.

Hora	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)
5,5	7,8 ± 8,0	12,2 ± 12,4	7,8 ± 8,0	-	-	-	-	-	-	8,9 ± 11,8	9,5 ± 14,1	12,4 ± 11,1
6,5	32,5 ± 11,7	41,3 ± 16,7	32,5 ± 11,7	30,6 ± 26,7	16,3 ± 13,8	9,9 ± 9,9	8,1 ± 8,8	18,5 ± 17,1	19,2 ± 15,6	40,8 ± 13,0	34,9 ± 12,5	36,6 ± 13,5
7,5	24,3 ± 7,0	26,2 ± 11,1	24,3 ± 7,0	53,5 ± 19,4	52,9 ± 18,5	62,5 ± 9,7	59,2 ± 16,6	65,2 ± 9,9	45,6 ± 17,3	36,5 ± 22,0	20,9 ± 7,3	21,8 ± 8,1
8,5	23,0 ± 6,4	20,5 ± 6,2	23,0 ± 6,4	14,2 ± 9,0	20,7 ± 8,5	21,0 ± 10,4	24,7 ± 9,4	17,0 ± 9,3	25,8 ± 12,2	21,0 ± 10,0	18,2 ± 4,5	19,1 ± 7,1
9,5	19,5 ± 7,0	19,8 ± 5,8	19,5 ± 7,0	14,3 ± 10,3	17,5 ± 7,3	16,8 ± 8,9	13,8 ± 4,3	9,4 ± 3,5	18,1 ± 9,0	18,1 ± 7,9	17,8 ± 5,8	22,5 ± 9,1
10,5	23,6 ± 10,0	16,9 ± 6,4	23,6 ± 10,0	12,6 ± 6,3	16,5 ± 7,8	10,7 ± 4,8	13,9 ± 4,5	8,5 ± 5,6	16,0 ± 7,4	17,2 ± 6,1	17,2 ± 9,6	25,0 ± 4,8
11,5	21,9 ± 7,8	17,6 ± 4,9	21,9 ± 7,9	14,8 ± 6,8	12,3 ± 8,0	8,8 ± 5,9	12,7 ± 5,4	7,8 ± 5,0	17,4 ± 8,1	13,7 ± 8,6	22,4 ± 8,1	26,5 ± 9,7
12,5	25,3 ± 9,5	14,4 ± 5,0	25,3 ± 9,5	11,7 ± 8,8	15,2 ± 7,6	10,3 ± 5,8	10,1 ± 5,9	8,8 ± 5,2	13,1 ± 6,9	17,3 ± 8,3	21,8 ± 7,7	27,4 ± 7,0
13,5	29,5 ± 13,9	22,5 ± 8,9	29,4 ± 13,9	16,2 ± 9,3	17,4 ± 5,8	13,0 ± 9,1	8,73 ± 6,3	12,4 ± 7,4	15,5 ± 7,6	15,9 ± 8,2	25,6 ± 8,5	27,8 ± 9,6
14,5	29,2 ± 9,8	22,3 ± 6,7	29,2 ± 9,8	17,2 ± 9,2	19,9 ± 4,7	14,1 ± 6,7	13,3 ± 5,4	12,4 ± 8,3	15,2 ± 5,8	24,3 ± 9,4	28,0 ± 8,5	23,1 ± 8,6
15,5	23,2 ± 7,5	21,3 ± 8,5	23,2 ± 7,5	23,0 ± 11,8	22,9 ± 6,7	19,3 ± 8,7	17,9 ± 5,9	16,4 ± 8,8	24,0 ± 8,3	19,8 ± 6,4	31,6 ± 9,3	26,3 ± 6,1
16,5	24,2 ± 7,2	23,8 ± 8,9	24,2 ± 7,3	44,5 ± 12,9	49,1 ± 21,3	66,1 ± 14,7	52,8 ± 20,5	54,6 ± 19,6	43,7 ± 14,8	33,1 ± 10,2	31,7 ± 9,7	30,6 ± 5,3
17,5	19,5 ± 9,6	29,1 ± 13,3	19,5 ± 9,6	24,4 ± 22,7	17,3 ± 17,5	7,2 ± 4,8	23,1 ± 31,8	19,7 ± 23,3	27,4 ± 13,7	35,3 ± 13,1	36,8 ± 13,7	35,0 ± 7,3
18,5	4,5 ± 3,3	12,1 ± 13,4	4,5 ± 3,3	-	-	-	-	-	18,4 ± 13,1	9,5 ± 8,1	5,6 ± 4,4	10,5 ± 12,9



Na Figura 20 e na Tabela 9 é apresentada a distribuição de  $\overline{F_m^h}$  no intervalo correspondente ao da condição de céu III.

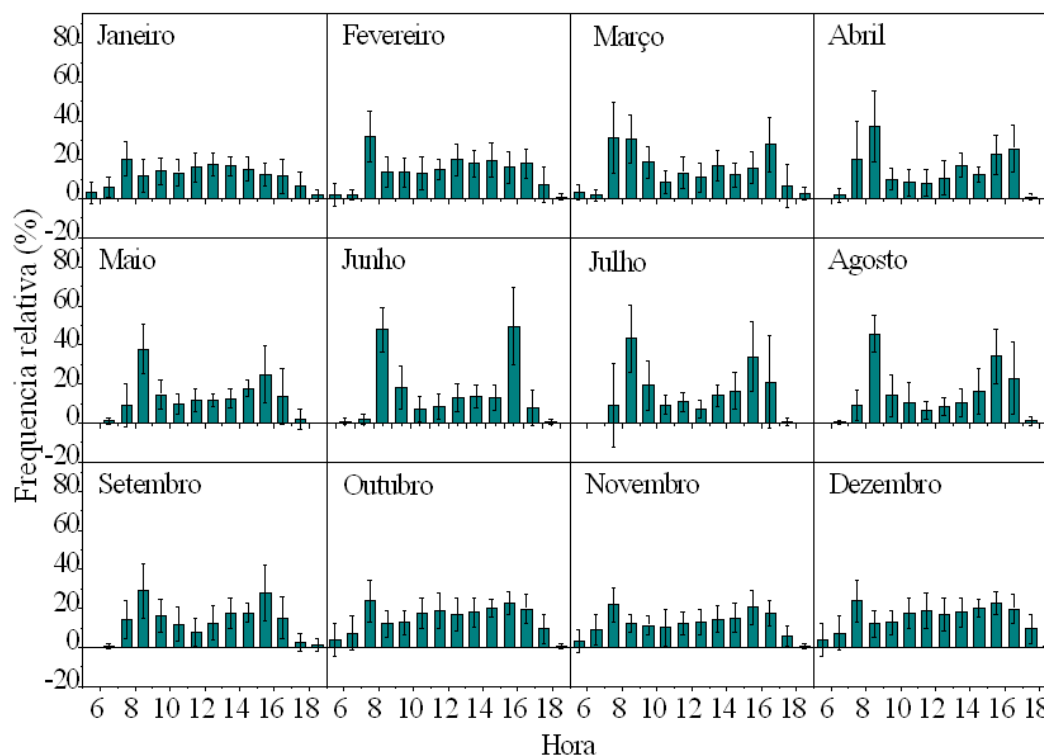


Figura 20. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu III, de no período de 1996 a 2005.

Para a condição de céu III, a evolução diurna das  $\overline{F_m^h}$  no geral é maior no período chuvoso que no seco. Os maiores valores de frequência são observados a partir das 8 horas e das 16 horas, ambos no terceiro intervalo horário, e crescem ou decrescem no sentido do início e fim, para o meio do dia dependendo do período ser seco ou úmido. No período úmido (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro), com uma maior nebulosidade e elevadas concentrações de vapor de água, os valores de  $\overline{F_m^h}$  são mais elevados e mais ou menos uniformes. No entanto, no período seco (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro), os valores de  $\overline{F_m^h}$  decrescem a partir das 8 horas e das 16 horas para os intervalos horários próximos ao meio dia. Na evolução diurna, conforme apresentado na Tabela 9, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$ , e agosto as menor.

Tabela 9. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu III, no período de 1996 a 2005.

Hora	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)	$F_m^h$ (%)
5,5	3,0 ± 6,0	2,1 ± 5,6	3,0 ± 3,9	-	-	-	-	-	-	4,0 ± 8,4	3,2 ± 6,0	4,0 ± 8,4
6,5	5,9 ± 5,3	1,9 ± 2,6	1,7 ± 2,8	1,7 ± 3,6	1,0 ± 1,6	0,7 ± 1,5	0,0 ± 0,0	0,3 ± 1,1	0,6 ± 1,5	7,3 ± 8,7	9,0 ± 7,9	7,3 ± 8,7
7,5	20,4 ± 8,7	31,9 ± 13,1	31,3 ± 18,2	19,9 ± 19,9	9,1 ± 11,0	1,8 ± 2,4	9,1 ± 21,6	9,0 ± 7,9	14,0 ± 9,6	23,8 ± 10,9	21,9 ± 8,9	23,8 ± 10,9
8,5	12,0 ± 8,5	13,7 ± 7,7	30,6 ± 12,5	37,3 ± 18,1	37,9 ± 12,8	47,7 ± 11,5	43,1 ± 17,4	45,7 ± 9,5	28,9 ± 13,8	12,0 ± 6,8	12,3 ± 4,5	12,0 ± 6,8
9,5	14,0 ± 6,6	13,5 ± 7,6	18,6 ± 8,3	9,9 ± 5,4	14,5 ± 7,7	18,1 ± 10,9	19,1 ± 12,8	14,1 ± 10,7	16,0 ± 8,5	12,6 ± 5,9	11,3 ± 5,0	12,6 ± 5,9
10,5	13,4 ± 6,6	13,2 ± 8,4	8,3 ± 5,8	8,3 ± 7,0	9,7 ± 4,9	7,2 ± 6,8	9,3 ± 4,7	10,4 ± 10,2	11,9 ± 8,9	17,7 ± 7,7	10,1 ± 9,4	17,7 ± 7,7
11,5	16,0 ± 7,6	15,1 ± 5,1	13,4 ± 8,0	8,2 ± 6,6	11,6 ± 5,9	8,3 ± 6,3	10,6 ± 4,8	6,2 ± 4,5	7,7 ± 7,4	19,0 ± 9,0	12,3 ± 6,0	19,0 ± 9,0
12,5	17,4 ± 5,8	19,9 ± 8,0	10,8 ± 7,3	10,6 ± 8,9	11,4 ± 3,4	12,9 ± 7,0	7,0 ± 4,7	8,1 ± 4,7	12,5 ± 8,6	17,1 ± 8,4	12,8 ± 6,5	17,1 ± 8,4
13,5	16,7 ± 4,9	18,0 ± 7,0	16,9 ± 7,9	17,1 ± 6,2	12,4 ± 5,0	13,8 ± 5,9	14,2 ± 5,5	10,2 ± 7,2	17,7 ± 7,7	17,9 ± 7,4	14,4 ± 6,9	17,9 ± 7,4
14,5	15,3 ± 6,3	19,6 ± 8,8	12,2 ± 6,3	12,3 ± 3,9	17,8 ± 4,1	12,9 ± 6,7	16,4 ± 9,4	16,1 ± 11,6	17,7 ± 4,8	20,2 ± 4,6	15,1 ± 7,4	20,2 ± 4,6
15,5	12,4 ± 5,7	16,2 ± 8,2	16,0 ± 8,4	22,5 ± 10,0	24,7 ± 14,6	49,6 ± 19,9	34,0 ± 18,1	34,1 ± 14,2	27,9 ± 14,5	22,8 ± 5,7	20,5 ± 9,0	22,8 ± 5,7
16,5	11,4 ± 8,6	18,0 ± 7,6	27,8 ± 14,0	25,7 ± 12,2	13,7 ± 14,2	7,8 ± 9,0	20,9 ± 23,9	22,9 ± 18,4	15,3 ± 10,7	19,8 ± 7,5	17,4 ± 6,6	19,8 ± 7,5
17,5	6,7 ± 6,8	7,1 ± 9,3	6,6 ± 10,8	1,0 ± 1,6	1,9 ± 5,0	0,4 ± 1,2	0,7 ± 2,1	1,0 ± 2,2	2,4 ± 4,5	9,4 ± 7,7	5,8 ± 5,2	9,4 ± 7,7
18,5	1,8 ± 3,0	0,8 ± 1,8	2,4 ± 3,3	-	-	-	-	-	1,0 ± 3,2	0,7 ± 1,5	0,7 ± 1,4	0,7 ± 1,5

Na Figura 21 é apresentada a distribuição de  $\overline{F_m^h}$  para a condição de céu IV. A evolução diurna da média  $\overline{F_m^h}$  apresentou uma distribuição característica comum em todos os meses. O valor  $\overline{F_m^h}$  aumentou do início do dia como uma função parabólica até passar por um valor máximo nos intervalos horário no meio dia, e decrescendo posteriormente até o ultimo intervalo horário no fim do dia.

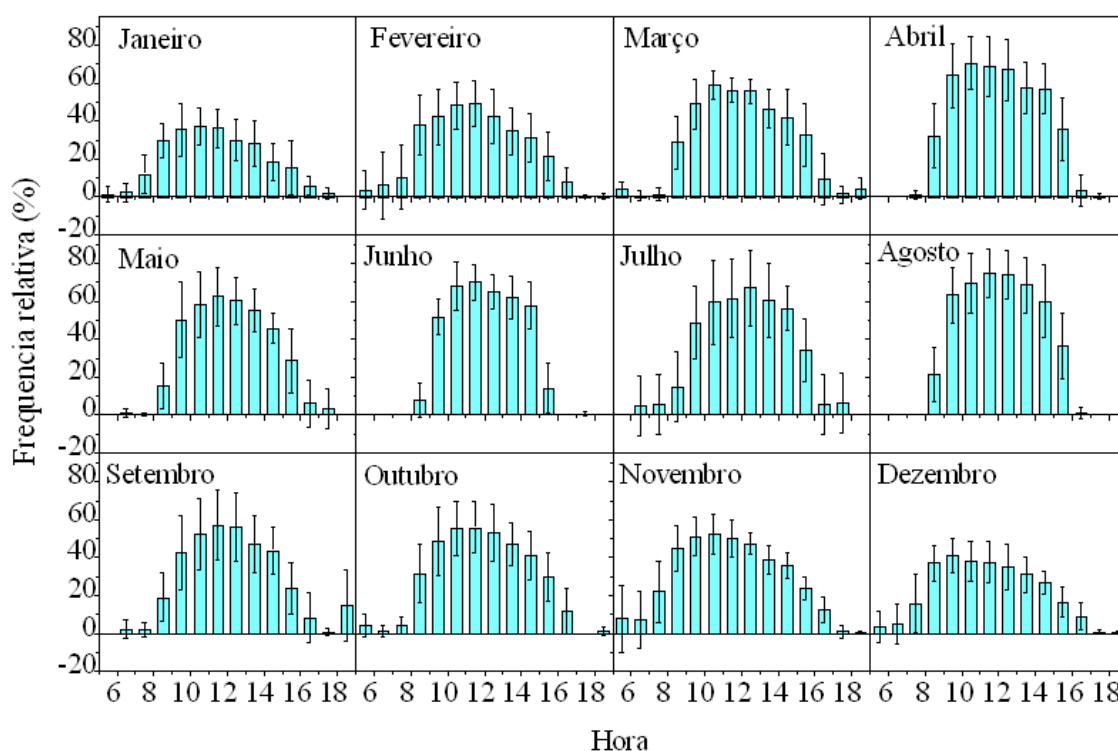


Figura 21. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu IV, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005.

Inversamente a distribuição de frequência para a condição de céu I, as frequências para a condição de céu IV, para cada mês, Figura 21, são maiores nos meses do período seco, e menores no período úmido, conseqüências da baixa nebulosidade no período seco. Como mostrado na Tabela 10, na evolução diurna, o mês de agosto apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$  e janeiro as menores.

Tabela 10. Evolução diurna da média horária mensal da condição de céu IV, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005.

Hora	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)	$\overline{F}_m^h$ (%)
5,5	1,3 ± 4,1	3,7 ± 10,1	3,8 ± 4,1	-	-	-	-	-	-	4,4 ± 6,1	7,6 ± 17,6	3,4 ± 8,5
6,5	2,3 ± 5,1	6,1 ± 18,0	0,7 ± 2,3	0,0 ± 0,0	1,0 ± 2,3	0,0 ± 0,0	5,0 ± 15,8	0,0 ± 0,0	2,2 ± 4,8	1,0 ± 3,0	7,1 ± 15,0	4,9 ± 10,6
7,5	12,0 ± 9,8	10,4 ± 17,2	1,4 ± 3,1	1,0 ± 2,3	0,3 ± 1,1	0,0 ± 0,0	5,3 ± 15,7	0,0 ± 0,0	2,0 ± 3,5	4,1 ± 4,6	22,1 ± 16,2	15,6 ± 15,4
8,5	29,7 ± 9,1	37,8 ± 15,7	28,7 ± 13,9	32,0 ± 16,9	15,3 ± 11,8	7,9 ± 9,0	14,9 ± 18,6	21,3 ± 14,5	18,8 ± 12,8	31,5 ± 15,4	44,8 ± 11,9	37,1 ± 9,5
9,5	35,4 ± 14,0	42,2 ± 14,7	48,9 ± 12,9	64,0 ± 16,8	50,4 ± 19,9	51,9 ± 9,5	48,9 ± 19,3	63,4 ± 14,7	42,8 ± 19,5	48,5 ± 18,2	51,0 ± 10,3	41,0 ± 9,2
10,5	37,1 ± 10,1	48,5 ± 12,4	59,0 ± 7,3	70,5 ± 14,2	58,0 ± 17,3	68,1 ± 12,5	59,6 ± 22,1	69,3 ± 15,8	52,4 ± 19,1	55,6 ± 14,3	52,4 ± 10,5	38,1 ± 10,7
11,5	36,4 ± 10,2	49,0 ± 12,1	56,3 ± 6,3	68,8 ± 16,1	62,4 ± 15,4	70,1 ± 9,6	61,5 ± 20,8	74,8 ± 12,6	56,9 ± 18,5	55,8 ± 13,5	49,9 ± 10,0	37,6 ± 11,3
12,5	29,9 ± 10,9	42,3 ± 14,1	55,7 ± 6,6	67,0 ± 16,3	60,2 ± 12,6	65,2 ± 9,1	66,9 ± 19,9	73,9 ± 12,7	56,0 ± 18,0	53,0 ± 15,3	47,2 ± 5,6	34,9 ± 12,0
13,5	28,2 ± 12,1	34,6 ± 12,3	46,6 ± 10,0	57,4 ± 13,4	55,1 ± 11,0	62,0 ± 11,4	60,3 ± 19,4	68,5 ± 14,8	47,1 ± 15,2	46,9 ± 11,2	38,5 ± 7,5	31,1 ± 9,6
14,5	18,5 ± 9,5	31,2 ± 13,0	42,0 ± 14,4	57,1 ± 13,3	45,7 ± 8,0	57,7 ± 12,3	56,3 ± 11,9	59,8 ± 19,1	43,7 ± 12,1	41,1 ± 12,6	35,6 ± 6,7	26,6 ± 6,2
15,5	15,2 ± 14,3	21,7 ± 12,9	32,8 ± 16,4	35,9 ± 16,5	28,6 ± 17,0	14,1 ± 13,2	34,1 ± 16,9	36,1 ± 17,3	23,5 ± 13,4	29,6 ± 12,8	23,5 ± 6,0	16,5 ± 8,0
16,5	6,0 ± 5,0	7,6 ± 7,9	9,4 ± 13,6	3,4 ± 8,3	6,1 ± 12,2	0,0 ± 0,0	5,3 ± 15,7	1,0 ± 3,1	8,2 ± 13,0	11,9 ± 12,0	12,2 ± 6,7	9,0 ± 7,5
17,5	1,7 ± 2,9	0,3 ± 1,1	1,4 ± 4,5	0,7 ± 1,5	3,4 ± 10,8	0,3 ± 1,1	6,0 ± 15,8	0,0 ± 0,0	0,7 ± 2,1	0,0 ± 0,0	1,0 ± 3,3	0,7 ± 1,5
18,5	0,0 ± 0,0	0,4 ± 1,2	4,4 ± 5,4	-	-	-	-	-	14,8 ± 18,6	1,1 ± 2,4	0,3 ± 1,1	0,3 ± 1,0

## 5. CONCLUSÕES.

1. Da análise da radiação global  $G$  e índice de claridade  $K_T$  anual na série dos 10 anos (período de 1995 a 2006), pode-se concluir que:

A energia média anual da radiação global variou entre 16,72 MJ/m<sup>2</sup> a 18,32 MJ/m<sup>2</sup>, com média dos 10 anos  $\{\overline{H_G^d}\} = 17,60 \text{ MJ/m}^2 \pm 0,55$ . A variação está associada à variação climática da nebulosidade e do vapor de água na atmosfera. O valor médio anual da profundidade ótica de aerossóis (AOD) muito baixo originadas nas queimadas da cana de açúcar na região de Botucatu não interferiu na variação da radiação global.

A variação da fração da radiação global transmitida ( $K_T$ ) anual é resultante apenas das variações climáticas, mais intensamente das variações das concentrações de nuvens e vapor de água. A evolução da média diária anual do índice de claridade  $K_T$   $\left[\overline{K_T^d}\right]$  foi similar à evolução da radiação global e variou entre 50,7 a 56,1, com média dos 10 anos  $\{\overline{K_T^d}\} = 53,4 \pm 3,2$ .

2. Da análise de frequência anual diária, no período 1996 a 2005, para as condições de céu I, II, III e IV, pode-se concluir que:

Para a condição de céu I, a frequência variou entre 13,7% a 20,8%, com  $\overline{F_a^d} = 16,7\% \pm 2,41$ ; para a II, variou de 20,9% a 32,6%, com  $\overline{F_a^d} = 25,6\% \pm 3,3$ ; para a III, variou de 21,9% a 33,1%, com  $\overline{F_a^d} = 26,4\% \pm 3,6$ , e para a IV, variou de 19,3% a 39,8%, com  $\overline{F_a^d} = 31,2\% \pm 6,7$ . A comparação entre as somas das condições (I e II) e (III e IV),

mostra que há uma predominância de dias claros, ou seja, com predominância incidência de radiação solar direta sobre a difusa (57,65%).

A análise da série climática de nebulosidade e precipitação permitiu quantificar os eventos climáticos locais que afetam a transmissividade atmosférica e, conseqüentemente, a condição de céu em Botucatu: 1) o efeito micro climático, tipo anual, que provoca o aumento da nebulosidade e do vapor de água na atmosfera no período chuvoso (de outubro a março); 2) o efeito macro climático com frequência alternada, como o El Niño e o La Niña, que geram mudanças nos regimes de chuva e nebulosidade nas regiões tropicais e locais de latitudes médias, e o aumento da nebulosidade a baixa umidade nos meses de maio a junho, decorrente da entrada de frentes frias vindas do sul.

A análise dos parâmetros meteorológicos nebulosidade e precipitação do período de 1996 a 2005, não apresentaram tendências sistemáticas de crescimento ou decréscimo. As variações anuais são variações aleatórias, em função dos eventos climáticos em micro e macro escala de cada ano.

A evolução da frequência anual diária  $F_a^d$  das quatro condições de céu mostrou também não haver tendência sistemática de crescimento ou de decréscimo de qualquer uma das condições de céu no período de 10 anos em função das variações climáticas.

A influência de fenômenos climáticos de micro escala analisada por meio do desvio (D%) entre o desvio da  $\overline{F_a^d}$  e a  $F_a^d$ , para as quatro condições de céu, expressou que a variabilidade da frequência por ano dependeu basicamente da nebulosidade e precipitação.

A influência de fenômenos climáticos de macro escala El Niño e o La Nina com ocorrência: El Nino, 1997–1998 (intensidade forte), 2002–2003 (intensidade moderada) e 2004–2005 (intensidade fraca); e La Nina de 1995–1996 (intensidade fraca) e 1998–2001 (intensidade moderada), mostraram que nem sempre há alterações nas frequências das condições de céu. No ano de 1997, em nenhuma das quatro coberturas de céu foi percebida alterações anormais na  $F_a^d$ , indicando que não houve influência considerável deste fenômeno macro climático sobre a frequência. Em 1999 houve alterações anormais nas  $F_a^d$  da condição de céu II e da IV, influenciados pelo reduzido volume de chuvas e baixa

nebulosidade registrados; em 2001, houve alteração anormal na  $F_a^d$  da condição de céu III e da I, influenciados pelo elevado volume de chuvas registrado e pela nebulosidade, e em 2005, o valor elevado e anormal de nebulosidade (0,51) ocasionou uma redução anormal na  $F_a^d$  da condição de céu IV.

### 3. Da análise de frequência mensal diária $F_m^d$ das condições de céu I, II, III e IV:

Os valores de  $\overline{F_m^d}$  para a condição de céu I são maiores no período chuvoso, meses de outubro a fevereiro, onde a concentração de nuvens é mais elevada no ano. Ao contrário, os menores valores de  $\overline{F_m^d}$  ocorreram no período seco, abril a agosto, onde a concentração de nuvens e vapor de água é a menor do ano. O mês de janeiro apresentou o maior valor de  $\overline{F_m^d}$  ( $29,78\% \pm 12,82$ ) e julho o menor valor ( $9,50\% \pm 5,43$ ).

Os valores de  $\overline{F_m^d}$  para a condição de céu II são maiores nos meses do período chuvoso e menores nos meses secos. O mês de janeiro apresentou o menor valor de  $\overline{F_m^d}$  ( $41,23\% \pm 7,76$ ) e agosto o menor ( $13,57\% \pm 7,08$ ). Para a condição de céu III, o mês de julho apresentou o maior valor de  $\overline{F_m^d}$  ( $30,60\% \pm 12,80$ ) e janeiro o menor ( $21,29\% \pm 10,59$ ). Dentre as quatro classes de condição de céu, esta é a que apresenta a menor variação ao longo do ano, desvio padrão de 2,87.

Os valores de  $\overline{F_m^d}$  para a condição de céu I são maiores no período seco e menores no período úmido onde é elevada a concentração da nebulosidade e o vapor de água, e menos a concentração de aerossóis. O mês de agosto apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^d}$  ( $53,80\% \pm 20,20$ ) e janeiro os menores valores ( $7,70\% \pm 5,08$ ).

### 4. Do efeito dos aerossóis sobre a frequência das condições de céu

Não foi possível concluir que há efeito ou não dos aerossóis na frequência das condições de céu em Botucatu, sendo necessários mais estudos a partir de uma base de dados maior. Dentre os dados da série de seis anos de AOD, precipitação e

nebulosidade analisados, foram encontrados dois anos com AOD com valores maiores que o do período chuvoso, 2004 e 2005. E dentre esses dois anos, apenas o ano de 2005 indicou tendência de que os aerossóis tenham influenciado no crescimento da nebulosidade e conseqüente redução na frequência de dias de claro.

5. Da análise da evolução da frequência anual horária  $F_a^h$  pode-se concluir que:

Para a condição de céu I, a  $F_a^h$  evoluiu inversamente proporcional à evolução diurna da massa ótica, decresceu dos intervalos horários do início e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia. A  $F_a^h$  da condição de céu I variou 88,39%, no intervalo horário das 18,5 horas até 14,22%, no intervalo horário no meio do dia às 11,5 horas. A  $F_a^h$  para a condição de céu II variou entre 11,39%, as 5,5 horas, até 70,89%, as 16,5 horas. A  $F_a^h$  para a condição de céu III variou entre 3,0%, as 5,5 horas, até 29,3%, as 8,5 horas. A  $F_a^h$  para a condição de céu IV evoluiu proporcionalmente à massa ótica, cresceu dos intervalos horários do início e fim do dia, para os intervalos horários no meio do dia variou de 1,1% as 18,5 horas, até 57,47% as 11,5 horas.

6. Da análise da evolução da frequência mensal horária  $F_m^h$  pode-se concluir que:

A evolução diurna da  $F_m^h$  da condição de céu I, em todos os meses, decrescem dos intervalos horários do início e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia. O fator atmosférico responsável é a massa ótica, que decresce no sentido da evolução da  $F_m^h$ .

A  $F_m^h$  da condição de céu I é maior no período chuvoso, nos meses janeiro fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais a concentração de nuvens e vapor de água, é mais elevadas no ano, e é menor no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, onde predominou condição de céu claro e baixa concentração de vapor de água. Na evolução diurna, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$ , e agosto os menores.



A  $F_m^h$  da condição de céu II é também maior nos meses correspondentes ao período chuvoso e menor nos meses do seco. Similarmente, o mês de Janeiro apresentou os maiores valores de  $F_m^h$  e julho os menores.

A  $F_m^h$  para a condição de céu III, no geral, é maior no período chuvoso que no seco. Na evolução diurna, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$  e agosto os menores.

A  $F_m^h$  da condição de céu IV apresentou uma distribuição característica comum em todos os meses onde a  $F_m^h$  aumentou como uma função parabólica com valor máximo no intervalo horário no meio dia, acompanhando a evolução da massa ótica ao longo do fotoperíodo. Na evolução diurna, o mês de agosto apresentou os maiores valores de  $\overline{F_m^h}$  e janeiro os menores.

## 6. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABEL, S. J.; HIGHWOOD, E. J.; HIGHWOOD, J. M.; STRINGER, M. A. The direct radiative effect of biomass burning aerosols over southern Africa. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 5, p. 1165-1211, 2005

ACKERMAN, A. S.; TOON, O. B.; STEVENS, D. E.; HEYMSFIELD, A. J.; RAMANATHAN, V.; WELTON, E. J. Reduction of Tropical Cloudiness by Soot. **Science**, v. 288, p. 1042-1047, 2000.

AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Eng. 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**, v. 68, p. 337-346, 2001.

AL-LAWATI, A.; DORVLO, A. S. S.; JERVASE, J. A. Monthly average daily solar radiation and clearness index contour maps over Oman. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 691-705, 2003.

ANDERSON, B. E.; GRANT, W. B.; GREGORY, G. L.; BROWELL, E. V.; COLLINS, J. E.; SACHSE, G. W.; BAGWELL, D. R.; HIDGINS, C. H.; BLAKE, D. R.; BLAKE, N. J. Aerosols from burning over the tropical South Atlantic region: distributions and impacts. **Jornal of Geophysic**, v. 24, p. 117-137, 1996.

ANGSTRON, A. Solar and terrestrial radiation. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v.50, p.121-5, 1924.

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

CALBÓ, J.; GONZÁLEZ, J. A.; PAGÉS, D.. A method for sky-condition classification from ground-based solar radiation measurements. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, p.2193-2199, 2001.

CANASAT. **Área de Cana, Safra e Reforma na Região Centro-Sul**. Disponível em: <<http://150.163.3.3/canasat/tabelas.php>>. Acesso em: 18 jan. 2009.

CHE, H. Z.; SHI, G. Y.; ZHANG, X. Y.; ZHAO, J. Q.; LI, Y. Analysis of sky conditions using 40 year records of solar radiation data in China. **Theory and Applied Climatology**, v. 89, p. 83-94, 2007.

CHENG, A.Y.S., CHAN, M.H.; YANG, X. Study of aerosol optical thickness in Hong Kong, validation, results, and dependence on meteorological parameters. **Atmospheric Environment**, v. 40, p. 4469-4477, 2006.

CODATO, G., OLIVEIRA, A. P., SOARES, J., ESCOBEDO, J. F., GOMES, E. N., PAI, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theory and Appl. Climat.**, v. 93, p. 57-73, 2008.

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric. **Chemistry and Biogeochemical Cycles**, v. 250, 1669-1678, 1990.

CENTRO DE PREVISÃO DO TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC. **El Niño e La Niña**. Disponível em: < <http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 24 de janeiro de 2010.

DUCHON, C. E.; O'MALLEY, M. S. Estimating cloud type from pyranometer observations. **Jornal Applied Meteorology**, v. 38, p. 132-141, 1999.

ELHADIDY, M. A.; ABDEL-NABI, D. Y.; KRUSS, P. D. Ultraviolet solar radiation at Dhahram (Saudi Arabia). **Solar Energy**, v. 44, p. 315-324, 1990.

ESCOBEDO, J; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, p. 299-309, 2009.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Variações mensais das frações solares UV, PAR e IV da radiação global em Botucatu. In: CEBENS 2008 - II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferencia Latino Americana da ISES, 2008. **Anais...** Florianópolis/SC. Disponível em: < [www.cbens-crlises.com.br/pdf/resumos/1109.pdf](http://www.cbens-crlises.com.br/pdf/resumos/1109.pdf)>. Acesso em: 13 de fev. 2010.

IBGE. **Censo dos municípios 2007**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>>. Acesso em: 30 jul. 2009.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 27 mar. 2010.

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

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

KAUFMAN, Y. J., TANRE, D., BOUCHER, O. A satellite view of aerosols in the climate system. **Nature**, v. 419, p. 215-223, 2002.

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

KINSELL, L. C. **Solar and terrestrial radiation : methods and measurements**. New York: Publisher Academic Press, 1975.

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**, v. 37, n. 4, p. 405-416, 1996.

LARA, L. L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B.; VICTORIA, R. L.; FERRAZ, E. S. B. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 26, p. 4627-4637, 2005.

LI, D. H. W; LAM, J. C. A study of atmospheric turbidity for Hong Kong. **Building and Environment**, v. 36, n. 4, p. 435-450, 2001.

LIN, J. C.; MATSUI, T.; PIELKE, R. A.; KUMMEROW, C. Effects of biomass-burning-derived aerosols on precipitation and clouds in the Amazon Basin: a satellite-based empirical study. **J. Geophysical**, v. 111, p. 2-14, 2006.

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

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

LUO, Y; LÜ, D.; HE, Q.; LI, W.; ZHOU, X. Characteristics of atmospheric aerosol optical depth variation over China in recent 30 years. **Chinese Science Bulletin**, v. 45, n. 14, p. 1328-1333, 2000.

MOLINEAUX, B.; INEICHEN, P. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity – improving model performance. **Solar Energy**, v. 55, n. 2, p 125-137, 1995.

MOORE, D.. **A estatística básica e sua prática**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000. 482 p.

MOSALAM SHALTOUT, M. A.; HASSAN, A. H.; FATHY, A. M.. Total suspended particles and solar radiation over Cairo and Aswan. **Renewable Energy**. v. 23, p. 605-619, 2001.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION – NASA. **Terra: the EOS Flagship**. Disponível em: < <http://terra.nasa.gov/>>. Acesso em: 13 de fevereiro de 2010.

OGUNJOBI, K. O.; KIM, Y. J.; ADEDOKUN, J. A.; RYU, S. Y.; KIM, J. E. Analysis of sky conditions using solar radiation data at Kwangju and Seoul, South Korea and Ile-Ife, Nigeria. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 72, p. 265-272, 2002.

OLIVIÉRI, J. C. Sunshine duration measurement using a pyranometer. **World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods report n° 70, WMO Tech. Doc**, n. 877, 385 p., 1998.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE METEOROLOGIA. **Measurement of radiation and sunshine**. In: Guide to meteorological instruments and observing practices. Gênova, 2ª edição, 1965. 279p

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, n. 5, pp. 271-289, 1990.

RAMANATHAN, V., CRUTZEN, P. J., KIEHL, J. T. , ROSENFELD, D. Atmosphere - Aerosols, climate, and the hydrological cycle, **Science**, v. 294, p. 2119-2124, 2001.

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

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

UDO, S. O. Sky conditions at Ilorin as characterized by clearness index and relative sunshine, v. 69, n. 1, p. 45-53, 2000.

WIELICKI, B. A., WONG, T., LOEB, N., MINNIS, P., PRIESTLEY, K., KANDEL, R. Changes in Earth's Albedo Measured by Satellite. **Science**, v. 308, p. 825, 2005.