

RADIAÇÕES SOLARES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA MÉDIA ANUAL NO PERÍODO DE 1996 A 2006 EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais/Ciência Ambiental – FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Nelson Veissid – veissid@las.inpe.br

Laboratório Associado de Sensores e Materiais / CTE-INPE.

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Jacyra Soares – jacyra@usp.br

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

Resumo. No trabalho é apresentada uma análise estatística e climática das radiações global (G), direta na horizontal (Dh), difusa (d) para uma base de dados de radiação solar medida no período de 1996 a 2006 em Botucatu. A sazonalidade das radiações ao longo do ano é resultante das variações astronômica e climática: a radiação global horária e diária foi maior, em média, na seqüência: primavera, verão, outono e inverno; a radiação direta horária foi, em seqüência, no inverno, outono, primavera e verão; enquanto que, a diária, na primavera, inverno, verão e outono; a radiação difusa, horária e diária, foi maior na primavera, verão, inverno e outono. A variabilidade média anual das radiações, horária e diária não foi significativa entre os anos. A energia da radiação global média anual horária variou de 1,40 MJ/m² a 1,50 MJ/m² com média total de (1,49 ± 0,07) MJ/m² e a energia média anual diária de 17,20 MJ/m² a 18,39 MJ/m² com média total de (17,74 ± 0,48) MJ/m²; a energia da radiação direta média anual horária variou de 0,82 MJ/m² a 1,0 MJ/m² com média (0,90 ± 0,07) MJ/m² e a energia média anual diária de 9,31 MJ/m² a 11,12 MJ/m² com média de (10,74 ± 0,48) MJ/m²; a energia da radiação difusa média anual horária variou de 0,55 MJ/m² a 0,63 MJ/m² com média de (0,57 ± 0,04) MJ/m² e a energia média anual diária de 6,80 MJ/m² a 7,92 MJ/m² com média de (7,09 ± 0,05) MJ/m².

Palavras-chave: radiações solares global, difusa e direta na horizontal.

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das radiações global, direta e difusa na superfície terrestre é de fundamental importância para muitos projetos de pesquisas otimizados ou de simulação nas áreas das engenharias; climatologia; arquitetura; agronomia, entre outras. Nas ciências térmicas, a quantificação dos níveis de energia permite que estudos de simulação e modelagem com coletores ou concentradores solares sejam melhores elaborados na determinação da eficiência térmica nos dois processos de conversão: térmico e fotoelétrico. Para o clima, o conhecimento das séries das três irradiações é importante porque permite calcular os índices radiométricos, os quais expressam a transmissão das radiações na atmosfera independentemente do dia e local. Do ponto de vista agrônomo, o conhecimento dessas radiações está associado aos estudos de modelos de balanço de energia e hídrico, atualmente de grande importância para o uso racional da água, entre muitas outras aplicações.

No Brasil, o conhecimento das radiações solar global, direta e difusa é restrito a pouquíssimos locais, e a causa principal, muito provavelmente, é devido aos poucos laboratórios especializados que medem rotineiramente uma ou duas dessas componentes e, em menor número ainda, são aqueles que medem simultaneamente as três radiações. (Sousa et al., 2005; Tiba et al., 2005; Soares, et. Al., 2004; Oliveira et al 2002a, b; Cavalcanti, 1991; Oliveira et al., 2006; Escobedo et al 2007).

A Estação de Radiometria de Botucatu é um desses laboratórios que, além das três componentes global, direta e difusa, monitora ainda outros tipos de radiações como ultravioleta, par, infravermelho curto, infravermelho longo, global e difusa em superfícies inclinadas, com instrumentos de boa precisão e aquisição de dados automática desde 1996. Alguns resultados foram divulgados com a radiação direta, ultravioleta, Par e infravermelha, como mostra os trabalhos de Escobedo et al (2006 a,b); Gomes et al (2006), Escobedo et al (2009 a,b).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi analisar estatística e climaticamente as radiações global, direta e difusa, nas partições horária e diária, bem como calcular os valores médios anual das radiações global, direta e difusa em Botucatu. A base de dados de radiação global, direta e difusa, essa última calculada pelo método da diferença, para este trabalho é constituída de 11 anos (1996 a 2006), tempo este que permite, com boa aproximação, determinar as tendências das três radiações em Botucatu, ao longo dos anos.

2 METODOLOGIA

2.1 Descrição do clima

As medidas foram realizadas na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, FCA, UNESP, Botucatu-SP, com coordenadas geográficas: latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m. O clima é temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno.

A figura (1a, b, c) mostra as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, nebulosidade e precipitação, do período de 1970 a 2000 em Botucatu. A temperatura e umidade são maiores quando os valores da radiação são mais elevados (declinação mais próximo da latitude local) e são menores quando a radiação é menos elevada, onde o sol o declina no hemisfério norte, mais distante da latitude local. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2 °C e 17,1 °C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

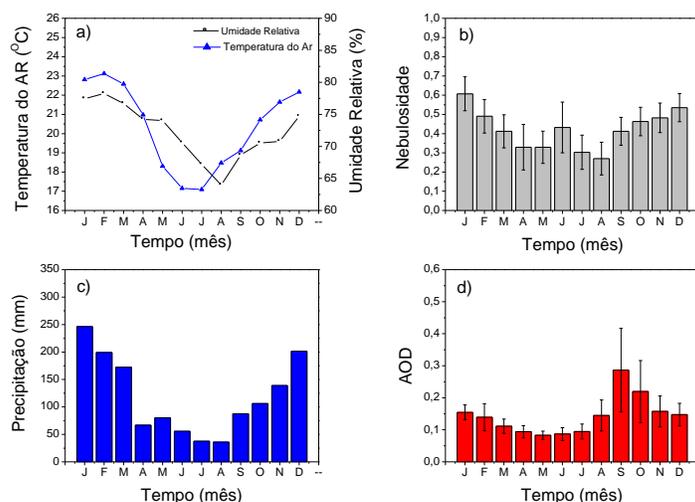


Figura 1(a,b,c) - Séries Climáticas da temperatura e Umidade (a), Nebulosidade (b), Precipitação (c) no período de 1970 a 2000 em Botucatu. Figura 1(d) - Serie de 6 anos do período de 2000 a 2005 da concentração de aerossóis em Botucatu.

A evolução anual da nebulosidade (Fig. 1b), na grande maioria dos meses, segue as séries climáticas da temperatura e umidade relativa. É mais elevada nos meses de janeiro ($f=0.61$) e menor em agosto ($f=0.27$). Contrastando a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h respectivamente. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho.

A evolução anual da média mensal da precipitação (Fig. 1c) segue a evolução da nebulosidade (Fig. 1b). É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100mm, aproximadamente. No período chuvoso, de outubro a março (estações primavera e verão) a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre. 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 maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

A cidade de Botucatu com 100 mil habitantes não possui grandes indústrias poluidoras, mas está inserida em uma região rural de cultivo da cultura da cana-de-açúcar e produção de álcool. Nos meses do período da seca e início do período chuvoso, de julho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados proveniente das queimadas da cana-de-açúcar e das usinas que produzem o álcool e açúcar localizadas num raio de 100 Km do centro da cidade. A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 (Fig. 1d), mostra que a partir do início das queimadas da cana de açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $AOD=0.35$ em setembro, o que é equivalente a concentração PM_{10} de 70.0 ug.m^{-3} (Codato et al 2007). Nos meses de outubro a dezembro, com a entrada do período chuvoso, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, aos valores da ordem de $AOD=0.16$ ou 20.0 ug.m^{-3} . Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir, no mês de maio, o menor nível de concentração PM_{10} , antes de iniciar o novo ciclo.

2.2 Instrumentação

A irradiância global (I_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência (I_b) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. A irradiância difusa (I_d) foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a irradiância direta na horizontal I_{Dh} , calculada na mesma frequência, por meio da equação: $I_d = I_G - I_b \cos z$, onde z é o ângulo zenital.



Figura 2 - Vista parcial da Estação de Radiometria Solar de Botucatu.

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 apresentados na Tab. 1. Os erros das medidas da radiação global e direta estão associados à precisão dos aparelhos da Eppley: o piranômetro PSP que mede a radiação global possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o pireliômetro que mede a radiação direta de 1,5% a 2,0%. Assim de acordo com a teoria de propagação de erro, a radiação difusa que foi obtida por diferença por meio da equação: $I_d = I_G - I_b \cos z$ apresenta um erro estimado de 3,5% a 4,0%.

Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas). Os dados armazenados diariamente para um microcomputador. Os dados passam por um controle de qualidade onde são eliminando-se os valores espúrios e numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

Tabela 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.

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

3 RADIAÇÕES SOLARES H_G , H_D e H_d .

O número de horas e dias utilizado no estudo refere-se aos números horas e dias em que as duas radiações (global e direta normal à incidência) foram medidas simultaneamente na estação experimental no período de 1996 a 2006. Foram eliminados os dias em que ocorreram paralisações de, pelo menos, um dos radiômetros devido a problemas técnicos. No ano de 1996 foram eliminados 104 dias, 23 dias em 1997, 26 dias em 1998, 31 dias em 1999, 2 dias em 2000, 17 dias em 2001, 17 dias em 2002, 13 dias em 2003, 8 dias em 2004, 8 dias em 2005 e 1 dia em 2006. O intervalo diurno considerado nas integrações diárias foi das 05h00 as 19h00 para os 10 anos. A evolução temporal das radiações horárias é similar a das irradiações diárias.

3.1 Evolução Temporal e Análise Estatística.

A evolução temporal das radiações horárias e diárias H_G , H_D e H_d mostrada na figura (3) é periódica anualmente e a sazonalidade é resultante da variação astronômica (declinação solar), geográfica (latitude) e das variações da atmosfera: a nuvens, vapor d'água e aerossóis. Os valores na média das estações das radiações global foram maiores na primavera (horária: $H_G = 1,6 \text{ MJ/m}^2$, e diária: $H_G = 20,6 \text{ MJ/m}^2$); verão (horária $H_G = 1,58 \text{ MJ/m}^2$ e diária $H_G = 19,46 \text{ MJ/m}^2$), e menores no outono (horária: $H_G = 1,32 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_G = 14,96 \text{ MJ/m}^2$) e inverno (horária: $H_G = 1,4 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_G = 16,04 \text{ MJ/m}^2$). Os valores da radiação direta na horizontal horária foram maiores, em seqüência, no inverno ($H_D = 0,93 \text{ MJ/m}^2$), outono ($H_D = 0,9 \text{ MJ/m}^2$), primavera ($H_D = 0,89 \text{ MJ/m}^2$) e verão ($H_D = 0,87 \text{ MJ/m}^2$), enquanto que, as radiações direta na horizontal diária são maiores, em seqüência: primavera ($H_D = 10,86 \text{ MJ/m}^2$), inverno ($H_D = 10,32 \text{ MJ/m}^2$), verão ($H_D = 10,13 \text{ MJ/m}^2$) e outono ($H_D = 9,98 \text{ MJ/m}^2$). Os valores da radiação difusa foram maiores na primavera (horária: $H_d = 0,72 \text{ MJ/m}^2$, e diária: $H_d = 9,78 \text{ MJ/m}^2$); verão (horária $H_d = 0,71 \text{ MJ/m}^2$ e diária $H_d = 9,33 \text{ MJ/m}^2$), e menores no inverno (horária: $H_d = 0,47 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_d = 5,72 \text{ MJ/m}^2$) e outono (horária: $H_d = 0,41 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_d = 4,97 \text{ MJ/m}^2$). A Tab. 2 apresenta o numero de horas e dias, energia média com desvios percentuais e os intervalos de variações para cada radiação horária por ano.

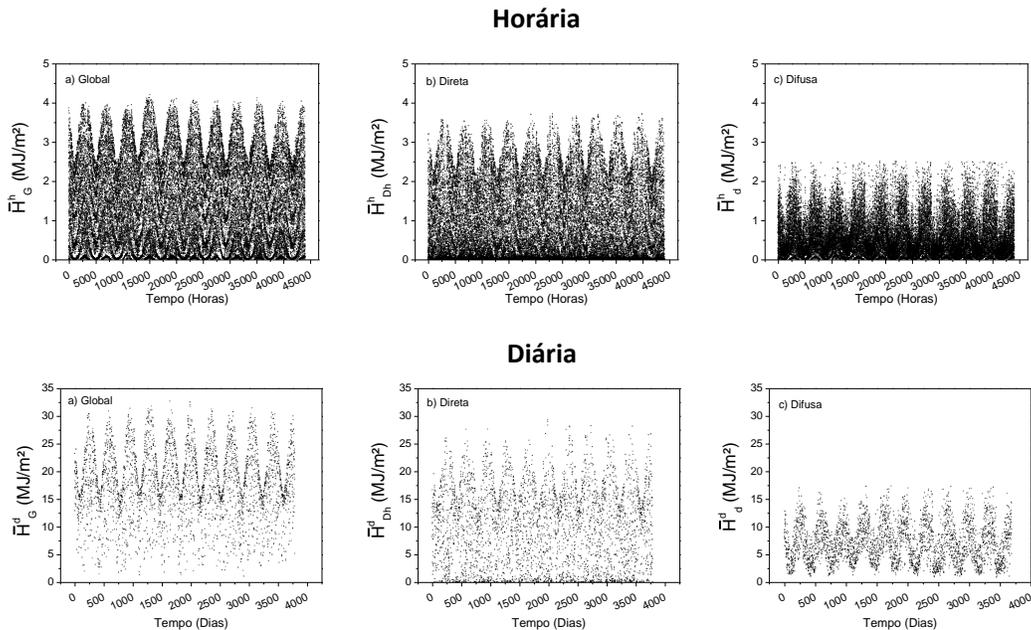


Figura 3 - Evolução das radiações global, direta e difusa horária e diária do período de 1996 a 2006.

A energia média horária das radiações variou de ano a ano, e foi maior, na seqüência, para as radiações global, direta e difusa. A radiação global apresentou o valor médio geral de $1,49 \text{ MJ/m}^2$ onde a menor média anual $1,40 \text{ MJ/m}^2$ ocorreu em 2005 e a maior de $1,55 \text{ MJ/m}^2$ em 2003; a radiação direta na horizontal apresentou energia média geral de $0,90 \text{ MJ/m}^2$, com menor média, $0,82 \text{ MJ/m}^2$, em 2005 e a maior, $1,0 \text{ MJ/m}^2$, em 2003; a difusa apresentou uma energia média geral de $0,57 \text{ MJ/m}^2$ aonde a menor média anual foi de $0,55 \text{ MJ/m}^2$ e ocorreu no ano de 2003 e a maior, de $0,63 \text{ MJ/m}^2$, em 2001.

O desvio da média horária, em porcentagem, diferiu entre os anos e entre as radiações. O menor desvio das médias foi da radiação global que variou de 67,9% (1996) a 75,9% (2000) com média geral de 71,4%; o desvio das médias a radiação direta foi o mais elevado, variou de 97,0% (2002) a 112,7% (2005) com média geral de 103,3%; o desvio das médias da radiação difusa variou entre 75,4% (1998) a 91,1% (2003) com média geral de 84,23%.

A amplitude ou intervalo de variação, diferença entre a maior e menor energia horária, foi diferente entre os anos e entre as radiações. Para a radiação global, o menor intervalo ocorreu em 1996, 1997 e 2006 com $3,95 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 1999 com $4,20 \text{ MJ/m}^2$, com média geral de $4,03 \text{ MJ/m}^2$; para a radiação direta, o menor intervalo ocorreu em 1997 com $3,53 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 2001 com $3,72 \text{ MJ/m}^2$, a média geral do intervalo de variação foi de $3,61 \text{ MJ/m}^2$; para a radiação difusa, o menor intervalo de variação ocorreu em 1997 e 1998 com $2,46 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 2000 e 2001 com $2,50 \text{ MJ/m}^2$, a média geral do intervalo de variação foi $2,48 \text{ MJ/m}^2$.

Sobre os dez anos das radiações diárias, a global apresentou a energia média geral de $17,74 \text{ MJ/m}^2$ sendo que a menor média anual $17,06 \text{ MJ/m}^2$ ocorreu em 1998 e a maior de $18,39 \text{ MJ/m}^2$ em 1999; a radiação direta na horizontal apresentou energia média geral de $10,33 \text{ MJ/m}^2$, com menor média $9,37 \text{ MJ/m}^2$ em 2005 e a maior $11,12 \text{ MJ/m}^2$ em 2003; a difusa apresentou uma energia média geral de $7,09 \text{ MJ/m}^2$ onde a menor média anual $6,79 \text{ MJ/m}^2$ ocorreu no ano de 1998 e a maior de $7,92 \text{ MJ/m}^2$ em 2001.

O desvio da média horária, em porcentagem, diferiu entre os anos e entre as radiações. O menor desvio das médias foi da radiação global que variou de 30,4% (2006) a 37,3% (2004) com média geral de 33,95%; o desvio das médias a radiação direta foi o mais elevado, variou de 60,4% (1996) a 75,4% (2005) com média geral de 65,4%; o desvio das médias da radiação difusa variou entre 41,7 (1999) a 57,9% (2003) com média geral de 49,21%.

A amplitude ou intervalo de variação, diferença entre a maior e menor energia horária, foi diferente entre os anos e entre as radiações. Para a radiação global, o menor intervalo ocorreu em 2006 com $26,79 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 2001 com $31,16 \text{ MJ/m}^2$, com média geral de $29,3 \text{ MJ/m}^2$; para a radiação direta o menor intervalo ocorreu em 2000 com $23,88 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 2001 com $29,98 \text{ MJ/m}^2$, a média geral do intervalo de variação foi de $27,17 \text{ MJ/m}^2$; para a radiação difusa, o menor intervalo de variação ocorreu em 1997 com $13,82 \text{ MJ/m}^2$ e o maior em 1996 com $16,27 \text{ MJ/m}^2$, a média geral do intervalo de variação foi $15,45 \text{ MJ/m}^2$.

3.2 Distribuição de frequências das Radiações H_G , H_D e H_d .

A Fig. 4 mostra as curvas de distribuição de frequência das três radiações para um total de 44085 radiações horária e 3786 radiações diária. A distribuição de frequência horária de H_G é do tipo bimodal, com intervalo de variação entre $0,1 \text{ MJ/m}^2$ a $4,3 \text{ MJ/m}^2$ onde o primeiro máximo ocorre em $H_G=0,1 \text{ MJ/m}^2$ com 13,8% da radiação total, e o segundo em $H_G=2,31 \text{ MJ/m}^2$ com 6,1% da radiação total.

A distribuição de frequência das radiações horárias H_D e H_d mostram que os intervalos de variação das duas radiações são bastantes extensos. A radiação H_D é do tipo bimodal e variou de $0,1 \text{ MJ/m}^2$ a $3,7 \text{ MJ/m}^2$ com maior percentual de 36,7% da radiação total em $H_D= 0,1 \text{ MJ/m}^2$ e o segundo máximo em $H_D= 2,1 \text{ MJ/m}^2$, com 4,5% da radiação total. A radiação H_d é do tipo modal, variou no intervalo de $0,25 \text{ MJ/m}^2$ a $2,55 \text{ MJ/m}^2$ com percentual de 14,1% da radiação total em $H_d = 0,05 \text{ MJ/m}^2$.

O valor máximo da frequência no menor valor intervalo das energias para as três radiações expressam a quantidade de horas não somente de baixa energia devido as primeiras e ultimas horas de brilho solar, início e final do dia, mas também nas horas no meio do dia sob condições de elevadas nebulosidade e chuvas.

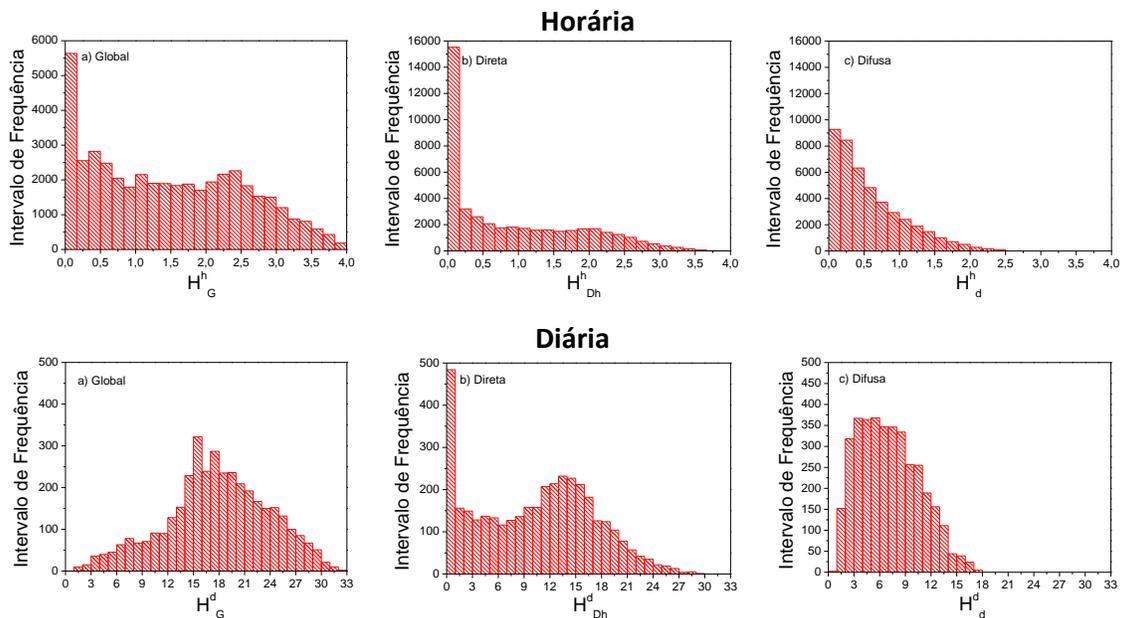


Figura 4 - Distribuição de frequências das Radiações H_G , H_D e H_d no período de 1996 a 2006.

Tabelas 2. Número de horas e dias, energia média com desvios percentuais, e os intervalos de variações para cada radiação global, direta e difusa, por ano

Ano	Radiação	Nº de Horas	Média (MJ/m ²)	Desvio (MJ/m ²)	Desvio (%)	Mínimo (MJ/m ²)	Máximo (MJ/m ²)	Amplitude (MJ/m ²)	Nº de Dias	Média (MJ/m ²)	Desvio (MJ/m ²)	Desvio (%)	Mínimo (MJ/m ²)	Máximo (MJ/m ²)	Amplitude (MJ/m ²)
1996	Global	3131	1,50	1,02	67,9	0,00	3,95	3,95	262	17,26	5,43	31,4	1,96	30,37	28,41
	Direta	3131	0,91	0,91	99,5	0,00	3,56	3,56	262	10,41	6,29	60,4	0,00	26,02	26,02
	Difusa	3131	0,59	0,49	82,3	0,00	2,47	2,47	262	6,78	3,40	50,2	1,38	17,01	15,63
1997	Global	4019	1,54	1,05	68,2	0,00	3,99	3,99	342	17,68	6,13	34,7	1,46	30,88	29,42
	Direta	4019	0,95	0,94	99,2	0,00	3,53	3,53	342	10,84	6,86	63,3	0,00	27,58	27,58
	Difusa	4019	0,59	0,49	83,5	0,00	2,46	2,46	342	6,83	3,53	51,7	1,04	16,15	15,11
1998	Global	3919	1,52	1,03	68,1	0,00	3,95	3,95	349	17,06	6,43	37,7	1,74	31,36	29,62
	Direta	3919	0,92	0,91	98,9	0,00	3,55	3,55	349	10,27	6,86	66,8	0,00	27,59	27,59
	Difusa	3919	0,60	0,45	75,4	0,00	2,46	2,46	349	6,79	2,84	41,9	1,11	14,70	13,60
1999	Global	4081	1,53	1,11	72,5	0,00	4,20	4,20	334	18,39	6,19	33,7	1,30	31,32	30,02
	Direta	4081	0,94	0,94	100,3	0,00	3,54	3,54	334	11,12	6,76	60,8	0,00	25,51	25,51
	Difusa	4081	0,60	0,47	78,8	0,00	2,48	2,48	334	7,27	3,03	41,7	1,26	15,08	13,82
2000	Global	4336	1,45	1,10	75,9	0,00	4,07	4,07	364	18,12	6,17	34,1	1,76	32,67	30,91
	Direta	4336	0,84	0,92	108,5	0,00	3,70	3,70	364	9,99	6,47	64,8	0,00	23,88	23,88
	Difusa	4336	0,61	0,51	83,3	0,00	2,50	2,50	364	7,77	3,41	43,9	1,33	17,28	15,95
2001	Global	4068	1,49	1,09	73,6	0,00	4,10	4,10	348	18,37	6,21	33,8	1,33	32,49	31,16
	Direta	4068	0,86	0,92	107,3	0,00	3,72	3,72	348	9,78	6,78	69,3	0,00	29,27	29,27
	Difusa	4068	0,63	0,54	85,5	0,00	2,50	2,50	348	7,92	3,63	45,8	1,33	17,35	16,02
2002	Global	4129	1,46	1,07	73,5	0,00	4,02	4,02	348	17,81	5,82	32,7	2,00	31,21	29,21
	Direta	4129	0,90	0,94	103,7	0,00	3,66	3,66	348	10,67	6,57	61,6	0,01	28,13	28,12
	Difusa	4129	0,55	0,49	89,3	0,00	2,49	2,49	348	6,80	3,61	53,1	1,11	16,98	15,87
2003	Global	3817	1,55	1,08	69,3	0,00	4,05	4,05	352	18,15	6,04	33,3	2,17	30,82	28,65
	Direta	3817	1,00	0,97	97,0	0,00	3,60	3,60	352	10,81	7,14	66,0	0,00	27,99	27,99
	Difusa	3817	0,55	0,50	91,1	0,00	2,49	2,48	352	6,83	3,96	57,9	0,93	16,81	15,88
2004	Global	4121	1,41	1,06	74,8	0,00	4,12	4,12	358	17,28	6,45	37,3	1,05	31,42	30,37
	Direta	4121	0,85	0,94	109,8	0,00	3,69	3,69	358	9,74	7,10	73,0	0,00	28,23	28,23
	Difusa	4121	0,56	0,48	86,4	0,00	2,49	2,49	358	7,03	3,60	51,1	1,05	17,25	16,21
2005	Global	4095	1,40	1,03	73,5	0,00	3,97	3,96	357	17,28	5,94	34,4	2,92	30,62	27,70
	Direta	4095	0,82	0,92	112,7	0,00	3,62	3,62	357	9,31	6,89	74,0	0,01	26,58	26,57
	Difusa	4095	0,58	0,52	88,6	0,00	2,49	2,49	357	7,16	3,70	51,6	1,29	16,91	15,62
2006	Global	3131	1,50	1,02	67,9	0,00	3,95	3,95	364	17,73	5,39	30,4	3,53	30,32	26,79
	Direta	3131	0,91	0,91	99,5	0,00	3,56	3,56	364	10,74	6,54	60,9	0,01	28,14	28,13
	Difusa	3131	0,59	0,49	82,3	0,00	2,47	2,47	364	6,99	3,77	53,9	0,86	19,48	18,62

A distribuição de frequência diária de H_G é do tipo modal, com amplo intervalo de variação de 1 MJ/m^2 a $33,0 \text{ MJ/m}^2$ com $11,6\%$ da radiação total em $H_G = 15 \text{ MJ/m}^2$. A distribuição de frequência das radiações diária H_D e H_d são do tipo bimodal e mostram que os intervalos de variação são também muito extensos: a radiação H_D variou de $1,0 \text{ MJ/m}^2$ a $29,0 \text{ MJ/m}^2$ com $16,9\%$ das radiações total em $H_D = 1,0 \text{ MJ/m}^2$ e o segundo mais elevado em $H_D = 13,0 \text{ MJ/m}^2$, com $11,8\%$ da radiação total; a radiação diária H_d variou no intervalo de $0,5 \text{ MJ/m}^2$ a $17,5 \text{ MJ/m}^2$ com $10,0\%$ da radiação total em $H_d = 5,5 \text{ MJ/m}^2$.

3.3 Energia das radiações média anual horária e diária

A Fig. 5 mostra a evolução das radiações global, direta e difusa média anual, horária e diária, do período 1996 a 2006 em Botucatu. A energia média anual da radiação global horária H_G variou de $1,40 \text{ MJ/m}^2$ a $1,50 \text{ MJ/m}^2$ e a energia média anual da radiação global diária H_G de $17,20 \text{ MJ/m}^2$ a $18,39 \text{ MJ/m}^2$; a energia média anual da radiação direta horária H_D variou de $0,82 \text{ MJ/m}^2$ a $1,0 \text{ MJ/m}^2$ e a diária H_D de $9,31 \text{ MJ/m}^2$ a $11,12 \text{ MJ/m}^2$; a energia média anual da radiação difusa horária H_d variou de $0,55 \text{ MJ/m}^2$ a $0,63 \text{ MJ/m}^2$ e a diária H_d de $6,80 \text{ MJ/m}^2$ a $7,92 \text{ MJ/m}^2$.

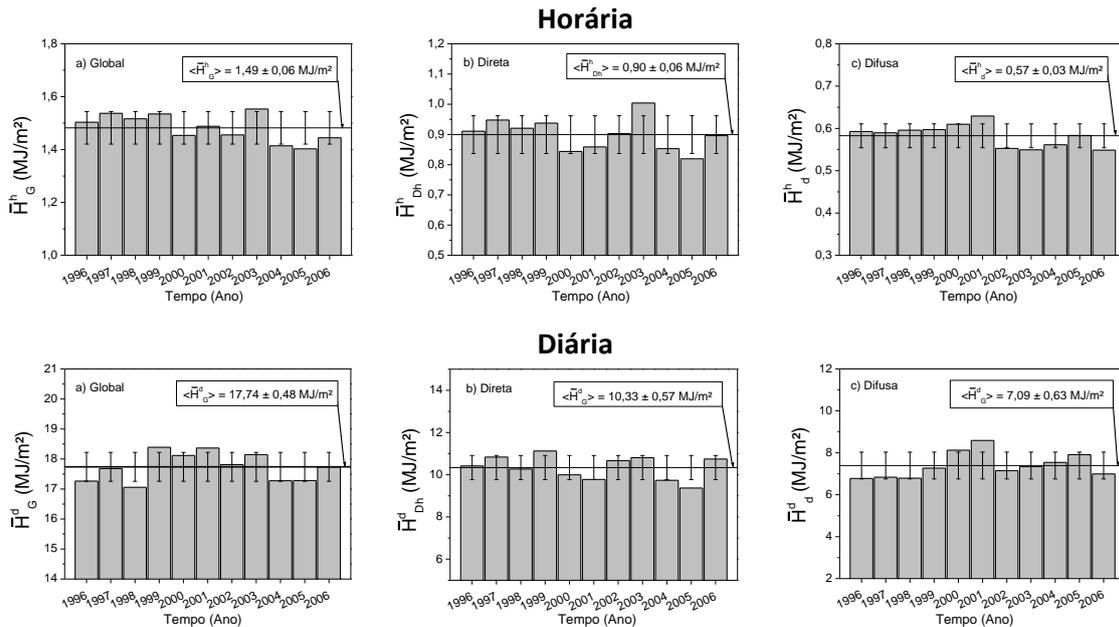


Figura 5 - Energia da radiação global, direta e difusa média anual, horária e diária, 1996 a 2006.

Os valores médios das radiações global, direta e difusa anual total foram: horária $\langle \overline{H_G} \rangle = (1,49 \pm 0,07 \text{ MJ/m}^2)$ e diária $\langle \overline{H_G} \rangle = (17,74 \pm 0,48 \text{ MJ/m}^2)$; horária $\langle \overline{H_D} \rangle = (0,9 \pm 0,07 \text{ MJ/m}^2)$ e diária $\langle \overline{H_D} \rangle = (10,33 \pm 0,57 \text{ MJ/m}^2)$; horária $\langle \overline{H_d} \rangle = (0,57 \pm 0,04 \text{ MJ/m}^2)$ e diária $\langle \overline{H_d} \rangle = (7,09 \pm 0,63 \text{ MJ/m}^2)$ respectivamente. A linha com os alteres representam o valor das radiações global, direta e difusa média anual com seu respectivo desvio padrão da média.

O desvio percentual entre a energia média anual e a energia média total, no período de 1996 a 2006, calculada pela expressão 1, expressa a variabilidade das radiações por ano.

$$D(\%) = \left(\frac{\text{Energia média do ano} - \text{Energia média total}}{\text{Energia média total}} \right) * 100 \quad (1)$$

O resultado da variabilidade anual das radiações global, direta e difusa, está representado na Fig. (6). Para a radiação global horária, a variação dos desvios (D%) foi entre $-5,4\%$ a $4,8\%$ com média de $\pm 3,8\%$, enquanto que, a radiação global diária entre $-3,8\%$ a $3,6\%$ com média de $\pm 2,8\%$. Para a radiação direta horária a variação dos desvios (D%) foi de $-6,2\%$ a $11,6\%$ com média de $\pm 6,4\%$, enquanto que, a radiação global diária entre $-9,4\%$ a $7,6\%$ com média de $\pm 5,6\%$. Para a radiação difusa horária a variação dos desvios (D%) foi de $-5,8\%$ a $8,0\%$ com média de $\pm 4,8\%$, enquanto que, a radiação difusa diária entre $-8,3\%$ a $16,2\%$ com média de $\pm 8,5\%$.

Na maioria dos anos os valores médios das radiações global, direta e difusa anuais estão dentro da previsão da normal ou da série, do período 1996 a 2006. Qualquer valor anual das radiações externa ao intervalo do valor médio total \pm desvio, inferior ou superior ao intervalo, representa uma não concordância ou não previsão no modelo experimental ou normal, da série dos onze anos.

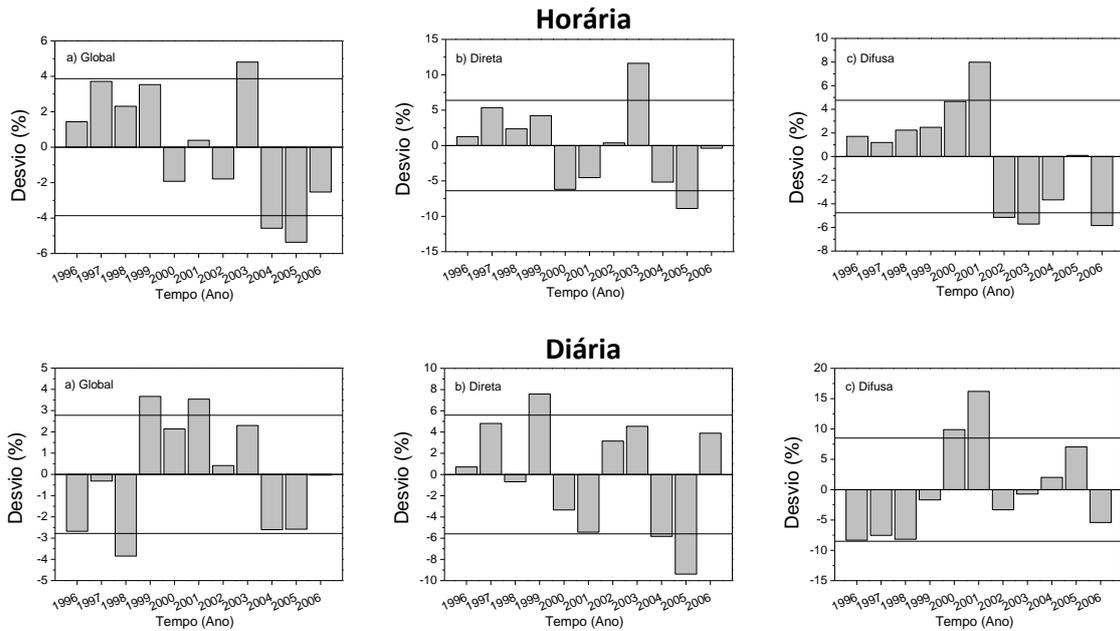


Figura 6 - Desvios percentuais entre a energia média anual e energia média anual total do período 1996-2006.

Como mostrado na Fig. 6, os valores da radiação global horária dos anos de 2003, 2004 e 2005, e a global diária de 1998, 1999 e 2001 estão fora da previsão da série normal. Similarmente, os anos de 2003 e 2005 para a direta horária, e para a direta diária 1999 e 2005, enquanto que, para a radiação difusa horária, os anos de 2001, 2002, 2003 e 2006, e a diária 2000 e 2001 respectivamente

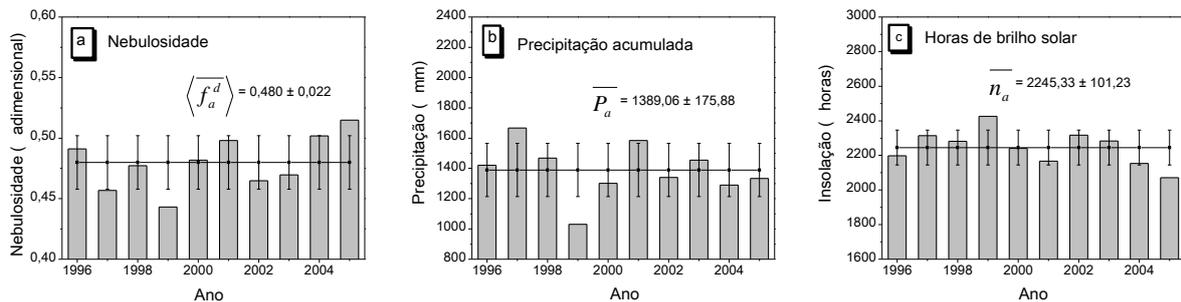


Figura 7: a) - Nebulosidade média anual diária; b) - precipitação acumulada anual, período de 1996 a 2005; c) - número de horas de brilho solar(n);

A variabilidade da radiação global, direta e difusa, mostrado na Fig. 6 está fortemente associada à nebulosidade média anual diária, ou ao número de horas de brilho solar acumulado anual diário(n), em Botucatu no mesmo período (de 1996 a 2006), como mostra a Fig 6a e Fig. 6c. respectivamente. A nebulosidade (Fig. 6a), calculada pela expressão $f = 1 - n/N$, expressa a fração do número de horas em que o sol fica encoberto por núvens no dia, onde n/N é a razão de insolação, n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo.

A evolução da radiação global média anual na grande totalidade dos anos acompanhou a evolução do número de horas de brilho solar anual. O aumento ou diminuição do número de horas de brilho solar de um ano a outro representou um crescimento ou uma diminuição da radiação global no mesmo período. A exceção ocorreu no ano de 1998 em que a radiação global foi mais baixa que a normal sem que houvesse um decréscimo acentuado do brilho solar ou um aumento considerável da nebulosidade neste ano. Ao contrário, neste ano, o valor de brilho solar e da nebulosidade foram normais. A não proporcionalidade entre a radiação global e o brilho solar, indica que outro fator climático afetou a relação neste ano. É possível que o vapor d'água na atmosfera, que neste trabalho vamos quantificar indiretamente por meio da precipitação e, a própria precipitação, sejam dois destes fatores, pois a precipitação diminui a nebulosidade e aumenta o vapor d'água na atmosfera. Quando a chuva é diurna, a relação entre a radiação global e a insolação solar é muito pouco afetada, porque a atmosfera úmida e com elevada nebulosidade proporciona baixos valores tanto no brilho solar como na radiação global. No entanto, quando as chuvas são noturnas, a relação entre a nebulosidade e a radiação global é afetada porque atmosfera com baixa nebulosidade e elevada concentração de vapor d'água provoca nos dias seguintes um aumento considerável do número de horas de brilho, sem aumentar, na mesma proporção, a radiação global, devido à absorção do infravermelho pelo vapor d'água. É importante considerar nesta análise, que a fração infravermelha da radiação global em Botucatu representa uma quantidade muito elevada dentro do espectro total de

radiação de 47,0% (Escobedo et al., 2008). Na atmosfera úmida, o decréscimo da radiação global é muito maior que na atmosfera seca, nas mesmas condições de nebulosidade. No ano de 1999 a radiação global foi anormal pelo excesso da radiação direta em função do excesso do brilho solar, enquanto que, em 2001 a radiação global foi muito elevada e também fora da normal, porque, além da radiação direta ter sido muito baixa, porém dentro do limite, a radiação difusa foi muito acima da normal em função da elevada nebulosidade.

A evolução da radiação direta diária (Fig. 5b) acompanhou a do número de horas de brilho solar nos anos de 1996 a 2005 (Fig. 7c). A radiação direta diária, nos anos de 1999 e 2005 foram atípicas, com valores de energia maior e menor, respectivamente, ao valor médio da série. O motivo foi o número de horas de brilho solar que, nestes anos, foram igualmente maior e menor, respectivamente, ao valor médio da série de brilho solar acumulada.

Em contraste à relação entre radiação direta e número de horas de brilho solar, a comparação da evolução da radiação difusa diária (Fig. 5c) com a da nebulosidade no período de 1996 a 2005 (Fig. 7a) mostra que os valores da radiação difusa diária não acompanharam totalmente os valores da nebulosidade. Nos anos de 1996 a 1999 o valor da radiação difusa foi quase constante para uma larga variação nos valores da nebulosidade, sendo que, no ano de 1999 a variação foi inversa, a radiação difusa aumentou pra um decréscimo da nebulosidade. Nos anos de 2000 e 2001, os valores da radiação difusa foram atípicos, sendo que nestes anos os valores da nebulosidade foram normais e dentro do previsto pela série da nebulosidade. No ano de 2005 o valor da radiação difusa, dentro da normal, está muito abaixo do valor esperado, considerando o valor da nebulosidade em 2005 que foi muito elevado comparado ao valor médio da série. Esses resultados mostram que, além da nebulosidade, mais fatores atmosféricos podem estar afetando a radiação difusa em Botucatu neste período (1996 a 2006). Muito provavelmente esses componentes sejam aerossóis ou presença de matérias particulados, resultantes da queima da cana-de-açúcar, que se estende desde julho a novembro em Botucatu.

4 CONCLUSÕES

A sazonalidade das radiações H_G , H_D e H_d , horária e diária, ao longo do ano é resultante da variação da declinação solar (dia), da latitude (local), e das variações climáticas da atmosfera. Os valores das radiações global foram maiores, na média: primavera (horária: $H_G = 1,6 \text{ MJ/m}^2$, e diária: $H_G = 20,6 \text{ MJ/m}^2$); verão (horária $H_G = 1,58 \text{ MJ/m}^2$ e diária $H_G = 19,46 \text{ MJ/m}^2$), e menores no outono (horária: $H_G = 1,32 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_G = 14,96 \text{ MJ/m}^2$) e inverno (horária: $H_G = 1,4 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_G = 16,04 \text{ MJ/m}^2$). Os valores das radiações direta na horizontal horária foram maiores, em seqüência, no inverno ($H_D = 0,93 \text{ MJ/m}^2$), outono ($H_D = 0,9 \text{ MJ/m}^2$), primavera ($H_D = 0,89 \text{ MJ/m}^2$) e verão ($H_D = 0,87 \text{ MJ/m}^2$), enquanto que, as irradiações direta na horizontal diária são maiores em seqüência: primavera ($H_D = 10,86 \text{ MJ/m}^2$), inverno ($H_D = 10,32 \text{ MJ/m}^2$), verão ($H_D = 10,13 \text{ MJ/m}^2$) e outono ($H_D = 9,98 \text{ MJ/m}^2$). Os valores das radiações difusa foram maiores a primavera (horária: $H_d = 0,72 \text{ MJ/m}^2$, e diária: $H_d = 9,78 \text{ MJ/m}^2$); verão (horária $H_d = 0,71 \text{ MJ/m}^2$ e diária $H_d = 9,33 \text{ MJ/m}^2$), inverno (horária: $H_d = 0,47 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_d = 5,72 \text{ MJ/m}^2$) e outono (horária: $H_d = 0,41 \text{ MJ/m}^2$ e diária: $H_d = 4,97 \text{ MJ/m}^2$).

A distribuição de frequência horária de H_G variou entre $0,1 \text{ MJ/m}^2$ a $4,3 \text{ MJ/m}^2$ com maior percentual (13,8%) em $H_G = 0,1 \text{ MJ/m}^2$ e o segundo em $H_G = 2,31 \text{ MJ/m}^2$ com 6,1% da radiação total; a distribuição de frequência horária radiação H_D variou de $0,1 \text{ MJ/m}^2$ a $3,7 \text{ MJ/m}^2$ com maior percentual de 36,7% em $H_D = 0,1 \text{ MJ/m}^2$ e o segundo $H_D = 2,1 \text{ MJ/m}^2$, com 4,5% da radiação total; a distribuição de frequência horária radiação H_d variou de $0,25 \text{ MJ/m}^2$ a $2,55 \text{ MJ/m}^2$ com percentual de 14,1 % em $H_d = 0,05 \text{ MJ/m}^2$. A distribuição de frequência diária de H_G variou entre 1 MJ/m^2 a $33,0 \text{ MJ/m}^2$ com máximo em $H_G = 15 \text{ MJ/m}^2$ com 11,6% da radiação total. A distribuição de frequência da radiação diária H_D , variou de $1,0 \text{ MJ/m}^2$ a $29,0 \text{ MJ/m}^2$ com 16,9% em $H_D = 1,0 \text{ MJ/m}^2$ e o segundo em $H_D = 13,0 \text{ MJ/m}^2$, com 11,8% da radiação total; a distribuição de frequência a radiação diária H_d variou no intervalo de $0,5 \text{ MJ/m}^2$ a $7,5 \text{ MJ/m}^2$ com 10,0 % da radiação total em $H_d = 5,5 \text{ MJ/m}^2$.

A energia da radiação global média anual horária variou de $1,40 \text{ MJ/m}^2$ a $1,50 \text{ MJ/m}^2$ com média total de $(1,49 \pm 0,07) \text{ MJ/m}^2$ e a energia média anual diária de $17,20 \text{ MJ/m}^2$ a $18,39 \text{ MJ/m}^2$ com média total de $(17,74 \pm 0,48) \text{ MJ/m}^2$; a energia da radiação direta média anual horária variou de $0,82 \text{ MJ/m}^2$ a $1,0 \text{ MJ/m}^2$ com média $(0,90 \pm 0,07) \text{ MJ/m}^2$ e a energia média anual diária de $9,31 \text{ MJ/m}^2$ a $11,12 \text{ MJ/m}^2$ com média de $(10,74 \pm 0,48) \text{ MJ/m}^2$; a energia da radiação difusa média anual horária variou de $0,55 \text{ MJ/m}^2$ a $0,63 \text{ MJ/m}^2$ com média de $(0,57 \pm 0,04) \text{ MJ/m}^2$ e a energia média anual diária de $6,80 \text{ MJ/m}^2$ a $7,92 \text{ MJ/m}^2$ com média de $(7,09 \pm 0,05) \text{ MJ/m}^2$. A variabilidade anual das três radiações não foi muito elevada de um ano a outro: a radiação global horária variou entre -5,4% a 4,8% com média de $\pm 3,8\%$, e a diária entre -3,8% a 3,6% com média de $\pm 2,8\%$; a radiação direta horária variou de -6,2% a 11,6% com média de $\pm 6,4\%$, e diária entre -9,4% a 7,6% com média de $\pm 5,6\%$; e a radiação difusa horária variou de -5,8% a 8,0% com média de $\pm 4,8\%$, e a diária entre -8,3% a 16,2% com média de $\pm 8,5\%$.

BIBLIOGRAFIA.

- Cavalcanti, E.S.C., 1991. Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. *Solar Energy*, v.47, p.231-235.
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, Jacyra, Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Dal Pai, A., 2007. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v.1, p.12 - .
- Escobedo, J, Gomes, E, Oliveira, A, Soares, J., 2009. 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
- Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Furlan Junior, Carlos Roberto, Oliveira, A. P., Soares, J., 2007 . Estimativas das radiações global, direta e difusa horária, diária e mensal em função do índice de claridade (kt) e razão de insolação (n/N). In: Congresso Brasileiro De Energia Solar, 1, 2007, Fortaleza, CE. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2006. Radiações solares uv, par e iv: i-estimativa em função da global. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.10, p.79 - 86.
- Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2006. Radiações solares uv, par e iv: ii-estimativa das frações em função de kt. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.10, p.87 – 94.
- Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2009. Ratios uv, par and nir components of global solar radiation at surface measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v.2, p.10.
- Gomes, E.N., Escobedo, J. F., Oliveira, A. P., Soares, J., 2006. Evolução diurna e anual da radiação direta na incidência. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.10, p.129 – 136.
- Oliveira, A. P., et al., 2006. An Application of Neural Network Technique to Correct the Dome Temperature Effects on Pyrgometer Measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v.23, p.80 – 89
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., Soares, J., 2002. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, v.71, p.59-73.
- Oliveira, A.P., Machado, A.J., Escobedo, J.F., Soares, J., 2002. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theor. Appl. Clim.*, v.71, p.231-250.
- Soares, J., Oliveira, A.P., Boznar, M.Z., Mlakar, P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., 2004. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v.79, p.201-204.
- Souza, J.L., Nicácio, R.M., Moura, M.A.L., 2005. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.1203-1220.
- Tiba, C. Aguiar, R., Fraidenraich., 2005. N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.957-966

ANNUAL AVERAGE GLOBAL, DIRECT AND DIFFUSE SOLAR RADIATION IN THE PERIOD FROM 1996 TO 2006 IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

Summary. This paper presents a climatic and statistical analysis of global (G), direct horizontal (Dh) and diffuse (d) radiation from a data base of solar radiation measured in the period from 1996 to 2006 in the city of Botucatu, SP, Brazil. Radiation seasonality along the year is a result of astronomical and climatic changes: hourly and daily values of global radiation were higher in the spring and decreased in summer, autumn and winter, respectively; hourly values of direct radiation were higher in the winter and decreased in autumn, spring and summer, respectively, while daily values of direct radiation were higher in the spring and decreased in winter, summer and autumn, respectively; hourly and daily values of diffuse radiation were higher in spring and decreased in summer, winter and autumn, respectively. Concerning annual variability of radiations, no statistically significant difference was found in annual average values of global, direct and diffuse solar radiation among years. Energy of annual hourly average global radiation ranged from 1.40 MJ/m² to 1.50 MJ/m² with total average energy of (1.49 ± 0.07) MJ/m² and annual daily average energy ranged from 17.20 MJ/m² to 18.39 MJ/m² with total average of (17.74 ± 0.48) MJ/m²; energy of annual hourly average direct radiation ranged from 0.82MJ/m² to 1.0MJ/m² with average of (0.90 ± 0.07) MJ/m² and annual daily average energy ranged from 9.31 MJ/m² to 11.12 MJ/m² with average of (17.74 ± 0.48) MJ/m²; energy of annual hourly average diffuse radiation ranged from 0.55MJ/m² to 0.63MJ/m² with average of (0.57 ± 0.04) MJ/m² and annual daily average energy ranged from 6.80MJ/m² to 7.92 MJ/m² with average of (7.09 ± 0.05) MJ/m².

Key words: Global, direct and diffuse solar radiation