

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

**POTENCIAL SOLAR DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA
EM BOTUCATU**

THAIS INÁCIO

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

BOTUCATU – SP

Dezembro - 2009

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

**POTENCIAL SOLAR DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA
EM BOTUCATU**

THAIS INÁCIO

Orientador: Prof^o. Dr. João Francisco Escobedo

Co- Orientador: Prof^o. Dr. Eduardo Nardini Gomes

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

BOTUCATU – SP

Dezembro – 2009

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

I35p Inácio, Thais, 1984-
Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu / Thais Inácio. - Botucatu : [s.n.], 2009. viii, 72 f. : il. color., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2009
Orientador: João Francisco Escobedo
Co-orientador: Eduardo Nardini Gomes
Inclui bibliografia.

1. Radiação global. 2. Radiação difusa. 3. Radiação direta. 4. Séries de radiação solar. I. Escobedo, João Francisco. II. Gomes, Eduardo Nardini. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: POTENCIAL SOLAR DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIFUSA E DIRETA EM
BOTUCATU.

ALUNA: THAÍS INÁCIO

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO
Co-Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nardini Gomes

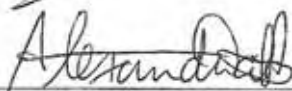
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



PROF. DR. DINIVAL MARTINS



PROF. DR. ALEXANDRE DAL PAI

Data da Realização: 27 de agosto de 2009.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por estar sempre presente na minha vida, iluminando o meu caminho e me dando forças pra seguir sempre em frente e por tornar tudo possível

Aos meus pais Julio e Neusa, aos meus irmãos Junior e Igor e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, me incentivaram e não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao meu orientador Profº. Dr. João Francisco Escobedo e ao meu co-orientador Profº. Dr. Eduardo Nardini Gomes, pela oportunidade oferecida, pelo apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram à execução e conclusão desta dissertação.

Aos colegas de laboratório Junior, Thiago, Enzo, Adilson e Erico pela espontaneidade e alegria na troca de idéias, conversas e boas risadas e pela amizade que se construiu ao longo desta jornada.

Aos colegas Ricardo Bonometo e Gustavo Lessa, pela troca de informações, realização de trabalhos, conversas, numa rara demonstração de amizade e solidariedade.

Ao meu namorado Ricardo que esteve ao meu lado, me apoiando e não me deixando desanimar.

Aos professores e funcionários do Departamento de Recursos Naturais, em especial à secretária Silvia, pelas conversas descontraídas nos intervalos de trabalho e pelo apoio e serviços prestados ao longo do curso.

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

A todos os funcionários da FCA/Unesp de Botucatu – SP, pela compreensão e pelos serviços prestados. Em especial às funcionárias da pós-graduação, pela paciência, pelos serviços e por todas as informações oferecidas no decorrer do curso.

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

Para não correr o risco da injustiça, agradeço a todos que de alguma forma passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje. E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação, os meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	1
SUMMARY	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Radiação Solar	7
2.2 Radiação no Topo da Atmosfera	8
2.3 Componentes da Radiação Solar ao interagir na atmosfera	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Descrição do Clima	15
3.2 Características do Local	18
3.3 Instrumentação	20
3.4 Método do Anel de Sombreamento	21
3.5 Controle de Qualidade dos Dados	23
3.6 Descrição da Base de Dados	24
3.7 Base de Dados Diária e Média Mensal	25
3.8 Cálculo das Médias Mensais Diárias	25
3.9 Cálculo das Frações	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 Radiações Global, Difusa e Direta Média Anual Diária	28
4.1.1 Radiação Global	28
4.1.2 Radiação Difusa	30
4.1.3 Radiação Direta	31
4.2 Séries Temporais das Radiações Global, Difusa e Direta das Médias Mensais Diárias	33
4.2.1 Radiação Global	33
4.2.2 Radiação Difusa	47
4.2.3 Radiação Direta	54

4.3 Séries Anuais das Radiações Global, Difusa e Direta Acumuladas Mensais	61
5 CONCLUSÕES	66
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Valores médios mensais (MJ/m ²), mínimos, máximos e médias anuais de Radiação Solar Global para cidades do Amapá/Brasil.	12
2 Características operacionais dos detectores da radiação global e difusa.	21
3 Variáveis meteorológicas e sensores de medidas.	21
4 Energia Média Mensal Diária (MJ/m ²) e Desvio Relativo da Radiação Global (%)	28
5 Energia Média Mensal Diária (MJ/m ²) e Desvio Relativo da Radiação Difusa (%)	30
6 Energia Média Mensal Diária (MJ/m ²) e Desvio Relativo da Radiação Direta (%)	31
7 Valores médios mensais (MJ/m ²) e Desvio Percentual (%) da Radiação Global $\overline{H_G^d}$, no período 1996 a 2005.	34
8 Valores médios mensais (MJ/m ²) e Desvio Percentual (%) da Radiação Difusa $\overline{H_d^d}$, no período de 1996 a 2005.	49
9 Valores médios mensais (MJ/m ²) e Desvio Percentual (%) da Radiação Direta $\overline{H_D^d}$, no período de 1996 à 2005.	57

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Intensidade de energia no topo da atmosfera em locais de diferentes latitudes.	9
2 a) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos. b) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos).	16
3 Evolução da nebulosidade média mensal da série de 10 anos no período de 1996 à 2005.	18
4 Aparelhos utilizados para o monitoramento da radiação solar no Laboratório de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu/SP. a) Piranômetro com anel de sombreamento ME que mede a irradiância difusa. b) Piranômetro que mede irradiação global.	20
5 Evolução da energia média anual diária da radiação global (MJ/m ²) e b) desvio relativo da radiação global (%).	29
6 a) Evolução da energia média anual diária da radiação difusa (MJ/m ²) e b) desvio relativo da radiação difusa (%).	30
7 a) Evolução da energia média anual diária da radiação direta (MJ/m ²) e b) desvio relativo da radiação direta (%).	32
8 a) Radiação Global de 1996 à 2005 b) Radiação Global c) Radiação no Topo da Atmosfera e Radiação Global d) Índice Radiométrico $\overline{K_t}$.	36
9 Evolução das médias mensais diárias de radiação global em Abu Dhabi e outras quatorze cidades da Arábia Saudita e Botucatu (Brasil).	39
10 Evolução das médias mensais diárias de radiação global para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil)	40
11 Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para Ankara, Istanbul e Izmir, Turquia) e Botucatu (Brasil).	41
12 Evolução das médias mensais diárias de radiação global em Adana (Turquia) e Botucatu (Brasil)	42
13 Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 20 cidades do	44

Zimbabwe (África) e Botucatu (Brasil).	
14 Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 7 cidades no Sudeste da Anatólia (Turquia) e para Botucatu (Brasil).	45
15 Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 12 cidades na Anatólia Central (Turquia) e Botucatu (Brasil).	46
16 Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global em Maceió e Botucatu (Brasil).	47
17 a) Radiação Difusa de 1996 à 2005 b) Radiação Difusa c) Radiação no Topo da Atmosfera, Radiação Difusa e Radiação Global d) Índice Radiométrico $\overline{K_d}$ e $\overline{K_d}'$.	51
18 Evolução das médias mensais diárias de radiação difusa para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).	54
19 a) Radiação Direta de 1996 à 2005 b) Radiação Direta c) Radiação no Topo da Atmosfera, Radiação Direta e Radiação Global d) Índice Radiométrico $\overline{K_D}$ e $\overline{K_D}'$.	58
20 Evolução das médias mensais diárias de radiação direta para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).	61
21 Séries Anuais das Radiações Global, Difusa e Direta Acumulados Mensais em MJ/m ² e kWh.	63

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{sc}	Constante Solar (1367 W/m ²)
E_o	Fator de correção da excentricidade da órbita da terra (u.a.)
δ	Declinação solar (graus)
ϕ	Latitude Local (graus)
ω	Ângulo Horário
θ_z	Ângulo Zenital
n	Número de horas de Brilho Solar (horas)
N	Fotoperíodo (horas)
FC	Fator de correção isotrópico
F_p	Fração de perda da radiação devido ao anel de sombreamento
(n/N)	Razão de Insolação
I_o	Irradiância no topo da atmosfera (W/m ²)
I_G	Irradiância global (W/m ²)
I_d	Irradiância difusa (W/m ²)
I_D	Irradiância direta (W/m ²)
H_G^d	Irradiação Global na superfície horizontal média mensal diária (MJ/m ² /dia)
H_d^d	Irradiação Difusa na superfície horizontal média mensal diária (MJ/m ² /dia)
H_D^d	Irradiação Direta na superfície horizontal média mensal diária (MJ/m ² /dia)
$\overline{H_o^d}$	Irradiação no topo da atmosfera média mensal diária (MJ/m ² /dia)
$\overline{H_G^d}$	Irradiação Global média mensal (MJ/m ² /mês)
$\overline{H_d^d}$	Irradiação Difusa média mensal (MJ/m ² /mês)
$\overline{H_D^d}$	Irradiação Direta na superfície horizontal média mensal (MJ/m ² /mês)
$[\overline{H_G^d}]$	Irradiação Global média anual (MJ/m ² /ano)

$[\overline{H_d^d}]$	Irradiação Difusa média anual (MJ/m ² /ano)
$[\overline{H_D^d}]$	Irradiação Direta na superfície horizontal média anual (MJ/m ² /ano)
$\langle \overline{H_G^d} \rangle$	Irradiação Global média entre meses (MJ/m ² /mês)
$\langle \overline{H_d^d} \rangle$	Irradiação Difusa média entre meses (MJ/m ² /mês)
$\langle \overline{H_D^d} \rangle$	Irradiação Direta na superfície horizontal média entre meses (MJ/m ² /mês)
$\overline{K_t}$	Índice de Claridade médio mensal diário
$\overline{K_d}$	Fração Difusa da radiação global média mensal diária
$\overline{K_D}$	Fração Direta da radiação global média mensal diária
$\overline{K_d}'$	Fração Difusa da radiação no topo da atmosfera média mensal diária
$\overline{K_D}'$	Fração Direta da radiação no topo da atmosfera média mensal diária
PM_{10}	Material Particulado (μgm^{-3})

RESUMO

No presente trabalho é apresentado o estudo do potencial da energia solar disponível no município de Botucatu, através das análises das séries temporais médias anuais diárias, médias mensais diárias e séries anuais dos acumulados mensais das radiações global, difusa e direta na horizontal do período de 1996 à 2005. As irradiações, em MJ/m², foram calculadas a partir das integrações diárias das irradiâncias global I_G , irradiância difusa I_d , irradiância direta na horizontal I_D e no topo da atmosfera I_o , determinando-se as irradiações diárias: H_G^d , H_d^d e H_D^d ; e médias mensais: $\overline{H_G^d}$, $\overline{H_d^d}$ e $\overline{H_D^d}$. A partir das médias mensais, determinou-se o índice de claridade $\overline{K_t}$ (razão da irradiação global pela do topo da atmosfera), e as demais frações das radiações: $\overline{K_d}$ (razão da irradiação difusa pela global), $\overline{K_d}'$ (razão da irradiação difusa pela do topo da atmosfera), $\overline{K_D}$ (razão da irradiação direta pela global), $\overline{K_D}'$ (razão da irradiação direta pela do topo da atmosfera). Realizou-se uma análise estatística dos dados de radiação solar, de forma a se obter os valores médios, desvios, máximos, mínimos, variação e acumulados, mensais e anuais. E apresentaram-se de forma gráfica os resultados estatísticos obtidos para compará-los com os valores médios mensais diários da precipitação, nebulosidade e insolação, para que se possam explicar os fenômenos que causam as variações nos valores da série temporal de radiação solar na superfície terrestre de Botucatu. Os valores médios mensais diários da radiação global variaram de 21,0 MJ/m² em novembro até 12,6 MJ/m² em junho. A fração $\overline{K_t}$ média anual foi de 53,0%. Os valores

médios mensais diários da radiação difusa variaram de 10,0 MJ/m² em dezembro até 3,7 MJ/m² em junho. A fração $\overline{K_d}$ média anual foi de 37% e a fração $\overline{K_d}'$ média anual foi de 19,7%. Os valores médios mensais diários da radiação direta variaram de 11,8 MJ/m² em novembro até 8,9 MJ/m² em janeiro e junho. A fração $\overline{K_D}$ média anual foi de 62% e a fração $\overline{K_D}'$ média anual foi de 3,37%. Nas séries anuais acumuladas mensais, a energia média acumulada anual da radiação global foi de 6440,054 MJ/m². A energia média difusa acumulada anual foi de 2472,658 MJ/m² e a energia média acumulada anual da radiação direta foi de 3938,955 MJ/m².

POTENTIAL OF SOLAR RADIATION GLOBAL, DIFFUSE AND DIRECT IN BOTUCATU. Botucatu, 2009. 72p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: THAIS INÁCIO

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Co-Adviser : EDUARDO NARDINI GOMES

SUMMARY

The present work presents the potential of solar energy available in the city of Botucatu, by analyzing time series of annual average daily, monthly averages of daily and cumulative monthly series of annual global radiation, diffuse and horizontal direct in the period of 1996 to 2005. The irradiation in MJ/m² were calculated from daily integrations of the global irradiance I_G , diffuse irradiance I_d , horizontal direct irradiance I_D and at the top of the atmosphere I_o , by providing daily the daily irradiation: H_G^d, H_d^d and H_D^d ; and monthly averages: $\overline{H_G^d}$, $\overline{H_d^d}$ and $\overline{H_D^d}$. From the monthly averages, it was determined the clearness index $\overline{K_t}$ (global/top of the atmosphere irradiation), and other fractions of radiation: $\overline{K_d}$ (diffuse/global irradiation), $\overline{K_d}'$ (diffuse/top of the atmosphere irradiation), $\overline{K_D}$ (direct/global irradiation), $\overline{K_D}'$ (direct/top of the atmosphere irradiation). Was held a statistical analysis of data on solar radiation in order to obtain the average values, deviation, minimum, maximum, variation and cumulative, monthly and yearly. And it showed in graphic statistical results obtained to compare them with the monthly average daily values of precipitation, cloudiness and sunshine, so that can explain the phenomena that cause variation in the values of time series of solar radiation on the Earth's surface of Botucatu. The values daily monthly average global radiation varied from 21.0 MJ/m² in november to 12,6 MJ/m² in june. The average annual $\overline{K_t}$ fraction was 53,0%. The values daily monthly average diffuse

radiation varied from 10,0 MJ/m² in december to 3,7 MJ/m² in june. The average annual $\overline{K_d}$ fraction was 37% and the average annual $\overline{K_d}'$ fraction was 19,7%. The values daily average monthly direct radiation varied from 11,8 MJ/m² in november to 8,9 MJ/m² in january and june. The average annual $\overline{K_D}$ fraction was 62% and the average annual $\overline{K_D}'$ fraction was 3,37%. In the monthly accumulated annual series, the energy annual accumulated average of global radiation was 6440,054 MJ/m². The energy annual accumulated diffuse average was 2472,658 MJ / m² and the energy annual accumulated average radiation direct was 3938,955 MJ / m².

Keywords: Global, Direct and Diffuse solar radiation, series of solar radiation

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol sob a forma de radiação eletromagnética, sendo a maior fonte de energia para a Terra, bem como o principal elemento meteorológico, pois é ela que desencadeia todo o processo meteorológico afetando todos os outros elementos: temperatura, pressão, vento, chuva, umidade, etc. (PEREIRA et al., 2002).

Após incidir no topo da atmosfera, a radiação solar interage com os elementos atmosféricos (gases, nuvens, partículas em suspensão, etc.), até atingir a superfície terrestre, por meio de processos de absorção e espalhamento. A radiação solar que atinge a superfície terrestre encontra-se dividida em duas componentes: difusa e direta. A radiação difusa é decorrente dos processos de espalhamento da radiação solar na atmosfera e, portanto, é oriunda de todas as direções do céu. A radiação direta é a componente que atinge a superfície e não sofre interações com a atmosfera. A soma das duas componentes resulta na radiação global.

O conhecimento da variabilidade da radiação solar global, difusa e direta de um determinado local é base para muitos estudos climáticos, sendo importante para o bom aproveitamento da energia solar, apresentando aplicações na meteorologia, climatologia, agricultura, biologia, engenharia, arquitetura (aquecimento e iluminação natural de ambientes), planejamento urbano, projetos ambientais e setor de energia, entre outros.

Os Estados Unidos, Japão e diversos países da Europa encontram-se em pleno desenvolvimento tecnológico na área de radiação solar e suas aplicações, principalmente após a crise do petróleo e com o aquecimento global e outros problemas ambientais, que atualmente tornaram-se muito relevantes.

O Brasil, por sua vez, também vem ganhando importância no mercado das fontes limpas e alternativas de energia. Entretanto, diversos são os problemas enfrentados na rede solarimétrica brasileira para a determinação do potencial de energia solar na superfície terrestre: poucas são as localidades que medem a radiação solar; o alto custo instrumental e a necessidade de pessoal especializado dificultam a implantação e operação de uma rede de estações de radiometria solar; existe grande dificuldade de se encontrar séries de radiação solar normais de 30 anos, encontrando-se apenas bases de dados inferiores à 10 anos.

De forma a se solucionar a problemática acima apontada, os objetivos deste trabalho são: 1) Realizar um estudo do potencial da energia solar para o município de Botucatu, por meio da análise da série temporal de 10 anos de medida das radiações global, difusa e direta diárias e índices radiométricos $\overline{K_t}$, $\overline{K_d}$, $\overline{K_D}$, $\overline{K_d}'$ e $\overline{K_D}'$; 2) Realizar uma análise estatística dos dados de radiação solar, de maneira a se obter os valores médios, desvios, máximos, mínimos, variação e acumulados, mensais e anuais; 3) Apresentar de forma gráfica os resultados estatísticos obtidos e compará-los com os valores médios mensais diários da precipitação, nebulosidade e insolação, para que se possam explicar os fenômenos que causam as variações nos valores da série temporal de radiação solar na superfície terrestre de Botucatu.

A Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu/SP monitora a radiação solar global, a radiação difusa e a radiação direta na horizontal desde 1996, apresentando uma base de dados suficientemente longa para geração de séries temporais mais curtas (10 anos). Estas informações são de grande importância para viabilizar a instalação de sistemas térmicos e fotovoltaicos para aquecimento de fluídos e ambientes, para geração de potência mecânica ou elétrica, para uma determinada região com características climáticas semelhantes à Botucatu, garantindo o máximo aproveitamento ao longo do ano, onde as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radiação Solar

A radiação solar é um importante elemento do clima, pois como a principal fonte de energia primária da terra, é responsável pela distribuição da fauna e da flora no planeta, influenciando diretamente as atividades fisiológicas dos seres vivos e os fenômenos climáticos. (ASSIS et al. 2004).

Segundo Pereira et. al. (2002) a radiação solar é a fonte primária de todos os fenômenos atmosféricos e de processos físicos, químicos e biológicos observados em ecossistemas agrícolas, podendo ser aproveitada sob várias formas, tais como a captura pela biomassa, o aquecimento de ar e água para fins domésticos e industriais, fotoeletricidade para pequenos potenciais e fontes para ciclos termodinâmicos variados.

Além da sua importância na caracterização climática das regiões, o conhecimento da incidência de radiação solar em escala local é fundamental para estudos agroclimatológicos. A sua disponibilidade e a sua previsão são essenciais no desenvolvimento de projetos de aproveitamento de energia solar para diversas finalidades (FILHO et. al. 2007).

O Brasil, por se tratar de um país tropical, com grandes porções de suas terras localizadas próximas à linha do Equador, recebe com maior intensidade os raios solares, e conseqüentemente, os valores médios de radiação solar ao longo do ano são mais elevados, principalmente quando o sol declina mais próximo à latitude local, se comparados com outros países do mundo. Fatores estes, muito relevantes para o aproveitamento e conversão de energia solar em energia elétrica, visto que a demanda por energia no mundo é crescente, principalmente as fontes limpas e renováveis, como é o caso da energia solar.

Segundo (Camargo et. al. 2000) as fontes não renováveis como o petróleo e o carvão esgotam-se e sua queima acelera os efeitos danosos do aquecimento global. Com isso, novas formas de gerar energia elétrica sem esses inconvenientes estão sendo paulatinamente introduzidas. Entre elas destaca-se a fotoeletricidade. A energia solar fotovoltaica transforma a radiação solar em eletricidade. Logo, países tropicais como o Brasil com regiões de ótima insolação são candidatos potenciais à utilização desse tipo de energia. Sendo uma energia renovável e não poluente quando de sua utilização, ela escapa das restrições ambientais que começam a ser impostas às fontes não renováveis como o petróleo, carvão e nuclear.

De acordo com estudos de Pereira et. al. (2002) o potencial de energia solar disponível compreende o máximo possível de radiação solar incidente sobre a superfície do solo, para um determinado dia e local, estando a atmosfera presente e completamente isenta de nuvens durante todo o dia. Seu conhecimento é importante na estimativa da demanda máxima de evaporação, evapotranspiração, e em artificios de engenharia solar, como aquecedores, secadores, fogões solares, refrigeradores, etc.

O conhecimento da trajetória da radiação solar até atingir a superfície terrestre é importante para diferenciarmos a intensidade, a quantidade e a qualidade da radiação incidente sobre determinada localidade e época do ano, que se diferenciam no topo da atmosfera (item 2.2) e na superfície da Terra, sendo que neste segundo caso, a radiação solar se divide em duas componentes de acordo com as alterações sofridas ao interagir com a atmosfera terrestre: a componente direta e a componente difusa, que serão mais detalhadas no item 2.3.

2.2 Radiação no Topo da Atmosfera

A radiação solar incidente no topo da atmosfera terrestre varia basicamente com a latitude, a declinação solar, ângulo horário e a excentricidade da órbita terrestre, fatores que, por sua vez, dependem dos movimentos de rotação, que fazem com que um local receba os raios solares com inclinação diferente ao longo do dia, e dos movimentos de translação ao redor do Sol, onde a Terra está sempre recebendo radiação.

A radiação solar que chega no topo da atmosfera é igual para os locais com latitudes semelhantes. Observa-se que a radiação no topo varia conforme a latitude, como mostra a Figura 1. Nas latitudes menores ocorrem menores oscilações energéticas, e para as latitudes maiores, há maiores amplitudes de energia. A radiação que chega no topo da atmosfera na latitude 0° varia de $35,69 \text{ MJ/m}^2$ à $38,90 \text{ MJ/m}^2$, e a radiação na latitude de 40° varia de $13,54 \text{ MJ/m}^2$ à $44,80 \text{ MJ/m}^2$.

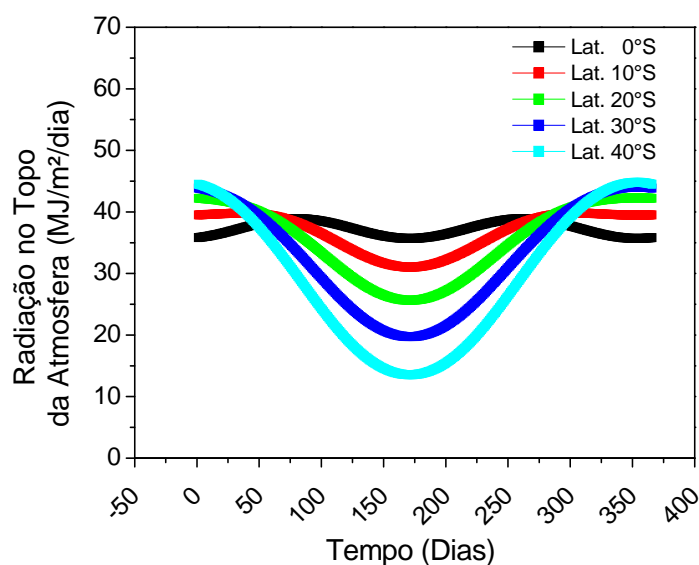


Figura 1 - Intensidade de energia no topo da atmosfera em locais de diferentes latitudes.

A irradiância no topo da atmosfera I_o foi calculada instantaneamente conforme Iqbal (1983) através da equação:

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (1)$$

Onde,

I_o = irradiância no topo da atmosfera (W/m^2);

I_{sc} = a constante solar equivalente a 1367 W/m^2 ;

E_o = é fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (u.a);

ϕ = é a latitude local, em graus;

δ = é a declinação solar, em graus;

ω = é o ângulo horário, em graus.

O valor da irradiância solar terrestre que chega no topo da atmosfera é definido por I_o , e este varia com a latitude e com o dia do ano, fatores esses que afetam o ângulo de incidência dos raios solares. Quanto maior a latitude, maior a amplitude de I_o entre o verão e inverno.

A constante solar I_{SC} define-se como a densidade de fluxo de radiação solar incidente numa superfície perpendicular aos raios solares, sem os efeitos atenuantes da atmosfera, e a uma distância equivalente a uma unidade astronômica. O valor de I_{SC} varia ligeiramente em função da emitância do Sol, sendo adotado um valor médio equivalente a 1367 W/m^2 . (Iqbal, 1983).

A latitude ϕ é a coordenada geográfica ou geodésica definida na esfera, no elipsóide de referência ou na superfície terrestre, que é o ângulo entre o plano do equador e a normal à superfície de referência.

A declinação solar δ depende apenas da posição relativa entre a Terra e o Sol, e seu valor é dado por tabelas fornecidas pelos observatórios astronômicos.

O ângulo horário ω é formado pelo meridiano onde se encontra o Sol e o meridiano local. A passagem do Sol pelo meridiano local divide o dia em duas partes simétricas. O período de rotação da Terra é de 24 horas, ou seja, este é o tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano local. Isso significa que são percorridos 360° em 24h, correspondendo a $15^\circ/\text{hora}$.

2.3 Componentes da Radiação Solar ao interagir na atmosfera

A radiação solar ao entrar na atmosfera, sofre algumas alterações causadas por moléculas de gases, vapor d'água, poeira, e outras partículas de aerossóis, resultando em modificações na quantidade, na qualidade e na direção dos raios solares que

atingem a superfície terrestre. O fruto da interação radiação-atmosfera ao interagir com seus componentes (naturais e artificiais) e incidir na superfície, é constituída da radiação solar difusa e radiação solar direta.

A radiação solar difusa é a radiação que chega à superfície terrestre, através do espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera. Segundo Pereira et al. (2002) esse processo é mais facilmente percebido em dias de céu nublado e em dias com alto teor de poeira, quando a radiação solar tem mais dificuldade de atingir diretamente a superfície.

A radiação solar difusa varia com o ângulo zenital do sol e sua estimativa é bastante complexa. Apesar disso costuma-se considerar que, para dias de céu claro, esta contribua com cerca de 15% do total de radiação que chega à superfície e é medida por um piranômetro com anel de sombreamento. (PEREIRA et al. 2002)

A radiação solar direta consiste na parcela da energia radiante incidente no topo da atmosfera e que chega diretamente à superfície terrestre e que não sofre desvios em sua trajetória. É medida em muitas estações por meios indiretos ou pelo método da diferença, e por modelos de estimativa, devido ao alto custo dos instrumentos.

A soma da radiação solar difusa e da radiação solar direta resulta na radiação solar global, que pode ser definida como o total de energia emitida pelo sol, que incide sobre a superfície terrestre. A radiação solar global é um elemento meteorológico de grande relevância, principalmente em atividades agropecuárias. Assim, é importante medir a disponibilidade de radiação solar global em um determinado local e período do ano. Seu monitoramento é realizado através de um piranômetro.

Diferentemente do total de radiação que chega no topo da atmosfera, que é igual para os locais de mesma latitude, a radiação global na superfície terrestre pode variar em locais de latitudes semelhantes. Essa situação ocorre devido ao efeito atenuador da atmosfera ser característico em cada local, dependendo da concentração dos constituintes atmosféricos variáveis em função do tipo de atividade humana de cada lugar (indústria, silvicultura, meio urbano, meio rural, poluição, partículas de aerossóis, emissão de CO₂, nuvens, etc).

De acordo com Marques et al. (2008), estudos realizados em três cidades do Estado do Amapá, Brasil, com latitudes próximas, Macapá (lat. 0.04° S e long.

51.06° O), Pacuí (lat. 0.96° S e long. 50.86° O) e Oiapoque (lat. 3.81° S e long. 51.86° O), mostram que os valores médios mensais de radiação solar global variam ao longo do ano, exemplificando que a intensidade de energia que incide na superfície terrestre sofre grandes variações temporais em função das condições atmosféricas de cada local. Esta área do país é caracterizada por um clima equatorial superúmido, grande quantidade de calor e umidade, devido à proximidade com o Oceano Atlântico. As temperaturas variam entre 20 °C a 36 °C, e existem duas estações bem definidas: verão e inverno. Os índices pluviométricos ocorrem anualmente em média superiores a 2.500 mm. Na tabela 1, são mostrados os valores médios mensais de radiação global para três cidades do Amapá.

Tabela 1 - Valores médios mensais (MJ/m²), mínimos, máximos e médias anuais de Radiação Solar Global para cidades do Amapá/Brasil.

Cidades	Lat.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Méd	Mín	Máx
Macapá	0,04°	18,4	15,8	14,0	14,4	16,6	18,0	19,4	21,2	26,7	22,0	20,9	15,1	18,5	14,0	22,7
Pacuí	0,96°	15,1	14,0	11,5	11,9	14,0	15,5	19,8	19,8	21,6	19,8	18,0	14,4	16,3	11,5	21,6
Oiapoque	3,81°	10,8	11,9	8,3	7,9	7,6	7,6	8,6	12,2	18,4	16,9	15,8	12,2	11,5	7,6	18,4

Segundo Pereira et. al (2002) a proporção entre a radiação solar direta e a radiação solar difusa varia ao longo do dia (ângulo de incidência dos raios solares), e também com as condições de nebulosidade. Quanto mais nublado, maior a proporção de radiação difusa, menor a proporção de radiação direta, e menor o valor de radiação global.

Muitos autores na literatura estrangeira mediram e analisaram as componentes da radiação solar ao redor do mundo, principalmente em países onde há um déficit de disponibilidade de energia, e grande necessidade de estudos na área. Em algumas localidades, como Arábia Saudita, Síria, Turquia, África, os autores estudaram diversas cidades, comparando dados de radiação em diferentes pontos de um mesmo país.

Islam et al. (2009) analisaram dados de radiação solar global média mensal diária em Abu Dhabi, UAE, (lat. 24.43° N e long. 54.45° L) e outras quatorze cidades da Arábia Saudita (Adu Dhabi, Amman, Bahrain, Tunis, Alger, Riadh, Baghddad, Sala(oman), Doha, Casablanca, Sana, Mosul, Damas, Jerusalém e Kuwait). Os valores médios de radiação global obtidos variaram de 16,17 MJ/m² em Alger à 21,54 MJ/m² em Abu Dhabi. Os valores

mínimos variam de 7,92 MJ/m² em Alger à 14,40 MJ/m² em Abu Dhabi. E os máximos variam de 20,88 MJ/m² em Sana a 30,24 MJ/m² em Amman.

Al-Mohamad (2004) analisou dados médios mensais diários de radiação solar global, direta e difusa para quatro localidades da Síria. As cidades foram escolhidas de acordo com as principais regiões do país: Hama (lat. 35.13° N e long. 36.75° L), Damascus (lat. 33.50° N e long. 36.28° L), Deir Al-Zor (lat. 35.33° N e long. 40.13° L) e Lattakia (lat. 35.51° N e long. 35.78° L). Os valores médios de radiação global obtidos variaram de 16,7 MJ/m² em Lattakia à 18,7 MJ/m² em Damascus, os valores mínimos variaram de 7,9 MJ/m² em Lattakia à 9,1 MJ/m² em Damascus, e os valores máximos variaram de 24,5 MJ/m² em Lattakia à 27,7 MJ/m² em Hama. Para a radiação difusa, os valores médios variaram de 4,8 MJ/m² em Damascus à 6,1 MJ/m² em Lattakia, os valores mínimos variaram de 3,3 MJ/m² em Deir Al-Zor à 3,7 MJ/m² em Hama, e os máximos variaram de 6,8 MJ/m² em Damascus à 8,9 MJ/m² em Hama. E os valores médios obtidos para a radiação direta variaram de 10,8 MJ/m² em Lattakia à 14,3 MJ/m² em Damascus, os valores mínimos variaram de 3,6 MJ/m² em Lattakia à 5,8 MJ/m² em Damascus, e os valores máximos variaram de 17,3 MJ/m² em Lattakia à 20,6 MJ/m² em Deir Al-Zor.

Ulgen & Hepbasli (2009) analisaram dados médios mensais diários de radiação solar global em três cidades da Turquia, Ankara (lat. 39.95° N e long. 32.88° L), Istanbul (lat. 40.96° N e long. 29.08° L) e Izmir (lat. 38.40° N e long. 27.16° L). Para Ankara foi obtido valor médio de 15,55 MJ/m², valor mínimo de 5,1 MJ/m² e valor máximo de 25,6 MJ/m². Em Istanbul foram obtidos valor médio de 14,08 MJ/m², mínimo de 4,3 MJ/m² e máximo de 23,9 MJ/m². E em Izmir o valor médio foi de 16,92 MJ/m², mínimo de 7,2 MJ/m² e máximo de 26,3 MJ/m².

Oğulata & Oğulata (2002) estudaram dados médios mensais diários de radiação solar global em Adana, localizada no sul da Turquia (lat. 37.00° N e long. 35.33° L). O valor médio obtido foi de 12,56 MJ/m², mínimo de 5,13 MJ/m² e máximo de 18,51 MJ/m².

Hove & Götsche (1999) analisaram dados de radiação solar global em vinte localidades no Zimbábue (lat. 17.83° S e long. 31.05° L), West Nicholson, Bulawayo, Mt. Darwin, Beit Bridge, Buffalo Rang, Marondera, Masvigo, Nyanga, Kariba, Harare, Victoria Fal, Binga, Grand Reef, Gweru, Kadoma, Karoi, Makoholi, Matopos, Tsholotsho e Mukandi. Os valores médios variaram de 20,64 MJ/m² em Harare à 23,40 MJ/m² em Victoria

Fal, os valores mínimos variaram de 15,00 MJ/m² em Buffalo Rang à 19,70 MJ/m² em Victoria Fal, e os valores máximos variaram de 23,20 MJ/m² em Mukandi à 27,00 MJ/m² em Buffalo Rang.

Bulut (2004) mediu dados médios mensais da radiação solar global diária no Sudeste da Anatólia, região da Turquia. Foram analisados dados de 7 cidades: Adiyaman (lat. 37.45° N e long. 38.17° L), Batman (lat. 37.52° N e long. 41.10° L), Diyarbakir (lat. 37.55° N e long. 40.12° L), Gaziantep (lat. 37.05° N e long. 37.22° L), Kilis (lat. 36.44° N e long. 37.05° L), Siirt (lat. 37.56° N e long. 41.56° L) e Sanliurfa (lat. 37.08° N e long. 38.46° L). Os valores médios variaram de 13,36 MJ/m² em Adiyaman à 17,77 em Diyarbakir, os valores mínimos variaram de 4,72 MJ/m² em Batman à 7,58 MJ/m² em Siirt, e os valores máximos variaram de 20,32 MJ/m² em Adiyaman à 28,18 MJ/m² em Diyarbakir.

Aras et al. (2006) também analisaram dados médios mensais diários da radiação solar global na Turquia (lat. 36.42° N e long. 26.45° L), medidos desde 1964, analisando 12 cidades da região da Anatólia Central: Afyon, Ankara, Cankiri, Corum, Eskisehir, Kayseri, Kırsehir, Konya, Nevsehir, Nigde, Sivas e Yozgat.

Na literatura brasileira, Souza et al. (2005) analisaram dados médios mensais diários de radiação solar global no Maceió (lat. 9.66° S e long. 35.70° O).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição do Clima

A Estação de Radiometria Solar está localizada na área rural de Botucatu, no Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônômicas, (FCA/UNESP), Universidade Estadual Paulista, a Lat. 22.85° S e Long. 48.45° O, e 786 metros acima do nível do mar e aproximadamente 221 km do Oceano Atlântico.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, temperado úmido, com inverno seco e verão quente. 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.

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, como mostrados na Figura 2. Analisando a evolução anual média mensal de 35 anos de dados, percebemos que os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,12 °C e 17,10 °C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,25% e 63,97% respectivamente. A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue as variações astronômicas do sol, 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.

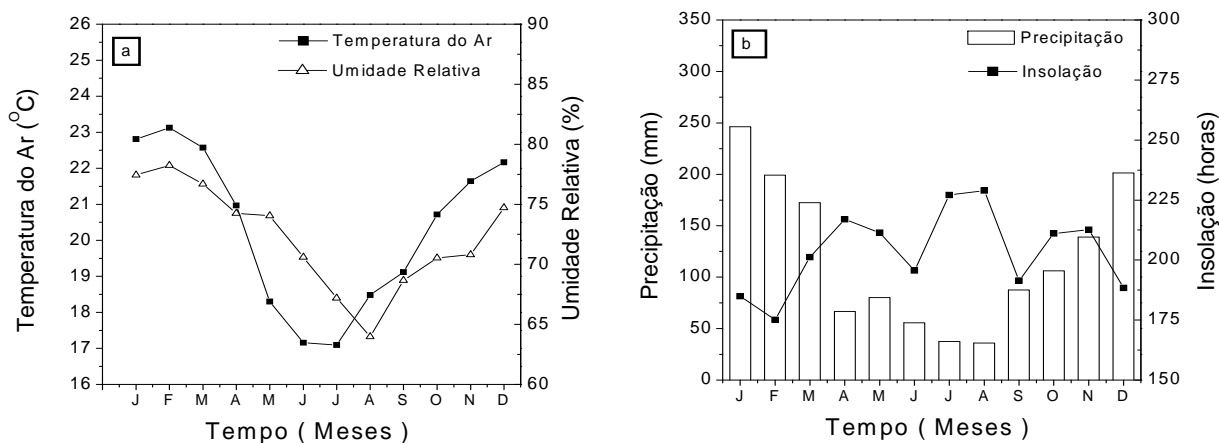


Figura 2 - a) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos.
b) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos).

A precipitação é mais elevada nos meses de janeiro (246,22mm), fevereiro (199,13mm), março (172,33mm), outubro (106,19mm), novembro (139,05mm), dezembro (201,42mm) e menores em abril (66,77mm), maio (80,24mm), junho (55,75mm), julho (37,54mm), agosto (36,10mm), setembro (87,54mm), como ilustra a Figura 2 b).

De acordo com a Figura 2b, o ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: o período chuvoso (outubro à março) e o período seco (abril à setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm.

No período chuvoso, de outubro a março, concentrado 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 do tipo localizada, 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 à 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 à setembro, nas estações de 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 do Brasil, típicas das latitudes médias. Por ser mais pesado, o ar frio faz o ar quente subir na atmosfera. Com a subida da massa de ar quente e úmida, há um resfriamento da mesma que condensa e forma a precipitação. 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.

Os meses com o maior número de horas de brilho solar (mês acima de 200 horas total) são março (201,1), abril (217,0), maio (211,3), julho (227,00), agosto (229,0), outubro (211,0) e novembro (212,7) e os meses com o menor número de horas de brilho solar (mês abaixo de 200 horas total) são janeiro (184,9), fevereiro (175,1), junho (195,6), setembro (191,3) e dezembro (188,3).

A nebulosidade é outro efeito climático que também afeta diretamente a radiação solar em Botucatu, e refere-se a fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular e foi calculada pela equação $f = 1 - n/N$ e expressa o número de horas que o sol ficou encoberto numa razão de insolação n/N , onde n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo.

A evolução temporal da nebulosidade apresenta-se em contraste ao número de horas de brilho solar e é proporcional às evoluções da temperatura e umidade relativa, na grande maioria dos meses, sendo mais elevada nos meses de janeiro com valor de (0,61), fevereiro (0,49), março (0,41), junho (0,43), setembro (0,41) outubro (0,46), novembro (0,48), dezembro (0,54) e menores em abril (0,33), maio (0,33), julho (0,30) e agosto (0,27), como mostra a Figura 3. A exceção ocorre por conta dos meses de maio e junho, nos quais a nebulosidade aumenta, a baixos níveis de temperatura e umidade. Essa singularidade ocorre por conta das entradas das frentes frias vindas do sul do país que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, a partir da metade do outono, nos meses de abril e maio.

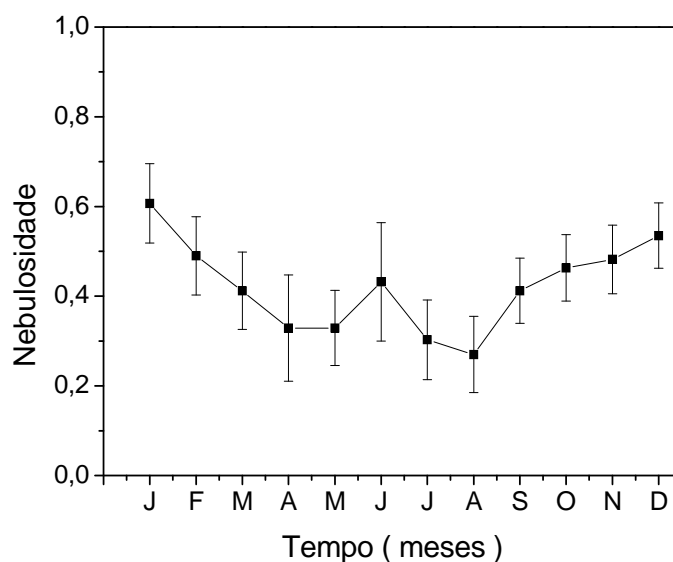


Figura 3 - Evolução da nebulosidade média mensal da série de 10 anos no período de 1996 à 2005.

3.2 Características do Local

De acordo com o censo demográfico 2007 realizado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Botucatu conta com 120.800 habitantes. É uma cidade do tipo universitária, inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucaliptos. Não possui grandes indústrias e nem possui um excesso de automóveis. De acordo com dados do IBGE (2007) a frota de veículos automotores para a cidade de Botucatu em 2005 é de 51.390, incluindo automóvel (36.977), caminhão (1.288), caminhonete (2.730), ônibus (360), micro-ônibus (181), motocicleta (8.634) e motoneta (1.220).

Botucatu conta com cerca de 4% de sua área territorial (1483 km²) ocupado por cana de açúcar, e rendimento aproximado de 420.000 toneladas de cana por ano, uma modesta quantia se comparado com as cidades vizinhas. Porém nos meses do período da seca, a partir de junho até novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar e das usinas que produzem açúcar e álcool. As cidades adjacentes (70 cidades dentro de um raio de 300 km)

incluindo aquelas cidades que tem medidas de material particulado (Limeira e Santa Gertrudes) totalizam aproximadamente 36 milhões de toneladas de cana de açúcar de rendimento por ano, extensão excedente cerca de 14% do total de área (CODATO et al., 2008). Portanto, ao redor de Botucatu, esta é uma significativa contribuição da poluição do ar pela queimada da biomassa.

Os poluentes atmosféricos conhecidos como “material particulado (também conhecido pela sigla em inglês PM)” não constituem uma espécie química definida, e sim um conjunto de partículas no estado sólido ou líquido com diâmetro menor que 100 μm que incluem pós, poeiras, fumaças e aerossóis emitidos para atmosfera de diversas maneiras. (Torres & Martins, 2005).

De acordo com a CETESB (2001), a notação PM_{10} pode ser definida de maneira simplificada como aquela cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 10 μm . As partículas inaláveis podem ainda ser classificadas como partículas inaláveis finas – $PM_{2.5}$ (<2,5 μm) e partículas inaláveis grossas (2,5 a 10 μm). Os efeitos dessas partículas podem variar muito em função de sua natureza química e de suas dimensões. As partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, já as grossas ficam retidas nas vias superiores do sistema respiratório.

A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (Aerossol Optical Depth) do período de 2000 a 2008, dados obtidos pelo satélite AQUA-MIR, mostram que a partir do início das queimadas da cana de açúcar em junho/julho, a concentração de aerossóis aumenta consideravelmente nos meses de agosto e setembro, onde passa pelo valor máximo de $AOD = 0.35$, que é o equivalente a concentração de PM_{10} de 70.0 $\mu\text{g m}^{-3}$ (CODATO et al., 2008).

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 valores $AOD = 0.16$ ou 20.0 $\mu\text{g m}^{-3}$. Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir o menor nível de concentração PM_{10} no mês de maio, antes de iniciar o novo ciclo.

3.3 Instrumentação

A irradiância global H_G^d é monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a difusa H_d^d por um piranômetro Eppley PSP, associado a um anel de sombreamento Melo-Escobedo (ME). A irradiação direta na horizontal H_D^d é gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiação global H_G^d e a irradiação difusa H_d^d , medida na mesma frequência, por meio da equação $H_D^d = H_G^d - H_d^d$. A figura 4 mostra os aparelhos de medidas da irradiação difusa (piranômetro com anel de sombreamento ME) e global (piranômetro).

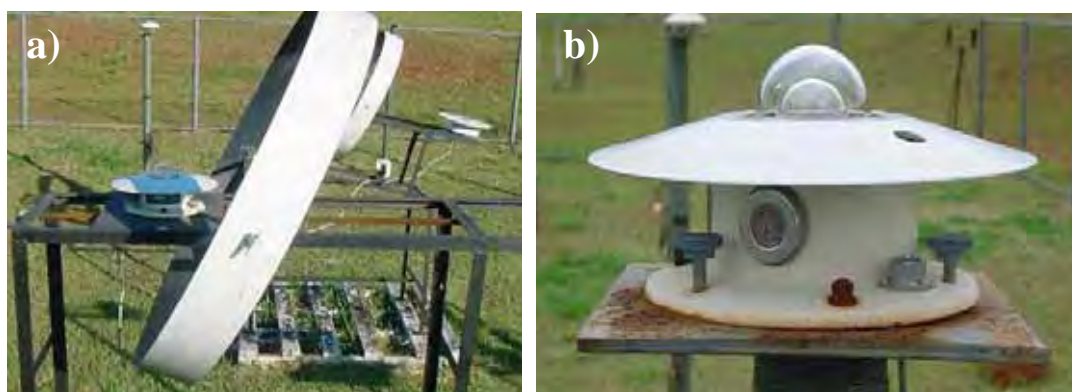


Figura 4 – Aparelhos utilizados para o monitoramento da radiação solar no Laboratório de Radiometria Solar da UNESP/Botucatu/SP. a) Piranômetro com anel de sombreamento ME que mede a irradiância difusa. b) Piranômetro que mede a irradiância global.

As 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 difusa estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características operacionais dos detectores da radiação global e difusa.

Radiação	Global	Difusa
Sensor- Marca	Piranômetro EPPLEY PSP	Piranômetro EPPLEY PSP c/ Anel de Sombreamento (R - 0,40m, L - 0,10m)
Fator de Calibração	$7,45\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	$7,67\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Intervalo Espectral	295-2800 nm	295-2800 nm
Tempo de Resposta	1s	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a 2800 W/m ²)	$\pm 0,5\%$ (0 a 2800 W/m ²)
Co-seno	$\pm 1\%$ ($0 < z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ < z < 80^\circ$)	$\pm 1\%$ ($0 < z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ < z < 80^\circ$)
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de - 20° C a 40° C	$\pm 1\%$ de - 20° C a 40° C

As outras variáveis meteorológicas com seus respectivos sensores de medidas, utilizadas neste trabalho para compará-las com os valores médios anuais diários, médias mensais diárias e acumulados mensais das séries de radiação global, difusa e direta em Botucatu, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Variáveis meteorológicas e sensores de medidas.

Variável	Sensor
Umidade Relativa	Higrógrafo - Filotécnica Milano
Temperatura do Ar	Termógrafo - Filotécnica Milano
Insolação	Heliógrafo - Campbell Strokes
Precipitação	Pluviógrafo Ota Keiki Seisakusho Co Ltda.

3.4 Método do anel de sombreamento

Segundo Dal Pai (2005) no método do anel de sombreamento, o anel, com seu eixo principal alinhado na direção do plano do horizonte local e inclinado com ângulo

igual a latitude local, obstrui a radiação direta sobre o piranômetro posicionado na área sombreada pelo anel, permitindo apenas a incidência da radiação difusa. O anel de sombreamento não necessita de rastreamento solar, exigindo apenas correções mecânicas diárias.

Diferentes montagens encontram-se citadas na literatura e as mais conhecidas são as de Drummond (1956) e Robinson e Stoch (1964). Na montagem de Drummond, o piranômetro mantém-se fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao plano do horizonte local para compensar as variações da declinação solar. Na montagem de Robinson e Stoch, o piranômetro mantém-se fixo no centro do anel, o qual é rotacionado em torno de seu centro para compensar as variações da declinação solar. Das duas montagens, a de Drummond é atualmente a mais utilizada e comercializada.

Segundo Dal Pai (2005) uma montagem alternativa, baixo custo, de fácil operação e manutenção foi proposta por Melo e Escobedo (1994) – montagem ME – cujo princípio operacional é inverso à montagem de Drummond. Nesse sistema, o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual a latitude local, e para compensar a declinação solar, o piranômetro translada paralelamente ao plano do horizonte local numa base móvel para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel.

O método do anel de sombreamento tem como desvantagem o uso de fatores de correção (FC) para compensar a parcela (F_p) da irradiância difusa barrada pelo anel de sombreamento (Drummond, 1956; Kasten et al, 1983; Dehne, 1984; Stanhill, 1985) dada pela equação (2). Para a montagem ME, Oliveira et al (2002) desenvolveu analiticamente a fração de perda para o anel (equação (3)) em função de parâmetros geométricos e geográficos. (Dal Pai, 2005).

$$FC = \frac{1}{1 - F_p} \quad (2)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos(\delta) \cdot \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \cdot \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (3)$$

onde b é a largura do anel, R o raio, δ a declinação solar, ϕ a latitude do local, ω o ângulo horário e θ_z o ângulo zenital.

São utilizados o modelo de correção isotrópico e o modelo de correção anisotrópico (em função da cobertura de céu). O primeiro não contempla os efeitos atmosféricos (poluição, vapor d'água, turbidez, etc.), e para o modelo de correção anisotrópico a base de dados de irradiação difusa medida pelo anel de sombreamento Melo - Escobedo foi separada e agrupada em função da transmissividade atmosférica K_t , seguindo os critérios de classificação de Liu e Jordan (1960), divididos em três intervalos distintos: $0 < K_t < 0,30$; $0,30 < K_t < 0,65$; $0,65 < K_t < 1$, representando as condições de céu nublado, parcialmente nublado e claro, respectivamente (Dal Pai, 2005).

3.5 Controle de qualidade dos dados

A calibração dos sensores de radiação solar são realizadas a cada 2 anos, usando os procedimentos recomendados pela Organização Mundial de Meteorologia (1965).

De 1996 a 2005 estes aparelhos operaram continuamente. Na aquisição de dados utilizou-se de um Microllogger da Campbell Scientific, Inc., CR23X operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 5 minutos ou 300 leituras. Os dados armazenados diariamente no módulo de memória SM192 da Campbell são transferidos para um microcomputador através de uma interface SC532 e do software PC208w da Campbell.

Os dados foram armazenados, e 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.

Numa outra etapa, os dados foram processados através de programas específicos para a geração de gráficos por meio do programa ORIGIN 6.0, determinando-se as séries temporais médias anuais diárias, médias mensais diárias e séries anuais dos acumulados mensais das radiações global, difusa e direta.

3.6 Descrição da Base de Dados

A Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP monitora a radiação solar global e a radiação difusa desde 1996, e a radiação direta é obtida pela diferença entre a radiação global e a radiação difusa. Outras variáveis meteorológicas também foram inspecionadas neste estudo, como precipitação, insolação e nebulosidade. Levando-se em consideração que para a determinação do clima de um determinado local, são analisados as variáveis meteorológicas de uma base de dados de 30 anos. Neste presente trabalho utilizou-se de uma base de dados suficientemente longa para a geração de séries temporais mais curtas (10 anos) de 1996 a 2005, que atendem para diversas finalidades, tais como agronômicas, meteorológicas, etc.

A série de dados foi inspecionada e os valores suspeitos foram removidos das séries. Fatores como períodos de calibração dos sensores, mal funcionamento do sistema de aquisição de dados, curto-circuito na fiação subterrânea que comunica os sensores ao Datalogger, entre outros, podem gerar dados inconsistentes que devem ser removidos do banco de dados. 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.

Para a radiação difusa foram removidos 20 dias em 1996, 5 dias em 1997, 6 dias em 1998, 29 dias em 1999, 6 dias em 2000, 12 dias em 2001, 9 dias em 2002, 4 dias em 2003, 16 dias em 2004 e 7 dias em 2005.

Na radiação direta 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.

Para a insolação foram removidos 9 dias em 1996, 3 dias em 1997, 4 dias em 1998, 22 dias em 1999, 3 dias em 2000, 4 dias em 2001 e 2002, 1 dia em 2003, 6 dias em 2004 e 5 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.

Os dias em que se tiveram medidas perdidas foram estimados na base de dados média mensal através da multiplicação do número de dias do mês pela média mensal, de forma a que o calculo dos somatórios anuais não fossem prejudicados, para que a série de dados de 10 anos não ficasse comprometida.

3.7 Base de Dados Diária e Média Mensal

As irradiações, em MJ/m², foram calculadas a partir das integrações diárias das irradiâncias global I_G e irradiância difusa I_d . A radiação direta na horizontal I_D foi obtida pela diferença entre a irradiação global H_G^d e a irradiação difusa H_d^d , por meio da equação $H_D^d = H_G^d - H_d^d$, obtidas em MJ/m². Determinando-se as irradiações diárias: H_G^d , H_d^d e H_D^d ; e médias mensais: $\overline{H_G^d}$, $\overline{H_d^d}$ e $\overline{H_D^d}$, onde o símbolo H^d representa energia integrada no intervalo de tempo diário e $\overline{H^d}$ representa energia média mensal diária, e os símbolos, G , d e D representam as irradiações global, difusa e direta na horizontal.

A irradiação no topo da atmosfera H_o^d foi determinada a partir da integração diária de I_o .

3.8 Cálculo das Médias Mensais Diárias

Na evolução anual das radiações global, difusa e direta na horizontal, calcularam-se as médias mensais das energias integradas de cada dia:

$$\overline{H_x^d} = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j H_x^d \quad (4)$$

Onde $\overline{H_x^d}$ é a média mensal da radiação diária, onde x representa as radiações global G , difusa d e direta D , e j é o número de dias do mês.

A partir das energias médias mensais diárias, determinaram-se as médias mensais de 10 anos da radiação global G , difusa d e direta D (diária) através da expressão:

$$\langle \overline{H_x^d} \rangle = \sum_{i=1996}^{j=2005} \overline{H_x^d} \quad (5)$$

onde $\langle \overline{H_x^d} \rangle$ é a média mensal diária de 10 anos da radiação G , d e D .

3.9 Cálculo das Frações

O índice de claridade $\overline{K_t}$ foi obtido através da relação entre a irradiação global $\overline{H_G^d}$, e a irradiação no topo da atmosfera $\overline{H_O^d}$, pela equação:

$$\overline{K_t} = \overline{H_G^d} / \overline{H_O^d} \quad (6)$$

A fração difusa da irradiação global $\overline{K_d}$, foi calculada mensalmente, através da relação entre a irradiação difusa $\overline{H_d^d}$ pela irradiação global $\overline{H_G^d}$, conforme segue:

$$\overline{K_d} = \overline{H_d^d} / \overline{H_G^d} \quad (7)$$

A fração difusa da irradiação no topo da atmosfera $\overline{K_d}'$, foi obtida através da relação entre a irradiação difusa $\overline{H_d^d}$ e a irradiação no topo da atmosfera $\overline{H_O^d}$, através da equação:

$$\overline{K_d}' = \overline{H_d^d} / \overline{H_O^d} \quad (8)$$

A fração direta da irradiação global $\overline{K_D}$, foi obtida pela relação entre a irradiação direta $\overline{H_D^d}$ e a irradiação global $\overline{H_G^d}$, conforme a equação:

$$\overline{K_D} = \overline{H_D^d} / \overline{H_G^d} \quad (9)$$

A fração da radiação direta no topo da atmosfera $\overline{K_D}'$, foi calculada mensalmente, através da relação entre a irradiação direta $\overline{H_D^d}$ e a irradiação no topo da atmosfera $\overline{H_O^d}$, pela equação:

$$\overline{K_D}' = \overline{H_D^d} / \overline{H_O^d} \quad (10)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Radiações Global, Difusa e Direta Média Anual Diária.

4.1.1 Radiação Global

A Tabela 4 e a Figura 5 a) mostram a evolução da energia média anual da radiação global diária, para o período de 1996 a 2005 em Botucatu, a linha mostrada na Figura 5 a) representa a média anual da radiação global diária entre os anos.

A energia média mínima ocorreu no ano de 1998 com valor de 16,72 MJ/m² e a energia média máxima no ano de 1999 com valor de 18,32 MJ/m². O valor médio da energia sobre todos os anos foi de 17,60 MJ/m².

A comparação da energia média anual em relação a energia média anual do período de 10 anos, calculada pela expressão (11), mostra a variabilidade da radiação por ano, como mostrada na Figura 5 b).

$$D(\%) = \left(\frac{\text{Energia média do ano} - \text{Energia média total}}{\text{Energia média total}} \right) * 100, \quad (11)$$

Tabela 4 – Energia Média Mensal Diária (MJ/m²) e Desvio Relativo da Radiação Global (%)

	Anos	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
GLOBAL	Média	16,93	17,93	16,72	18,32	18,04	18,16	17,71	17,77	17,21	17,25
	Desvio	-3,81	1,87	-5,00	4,09	2,50	3,18	0,62	0,97	-2,22	-1,99

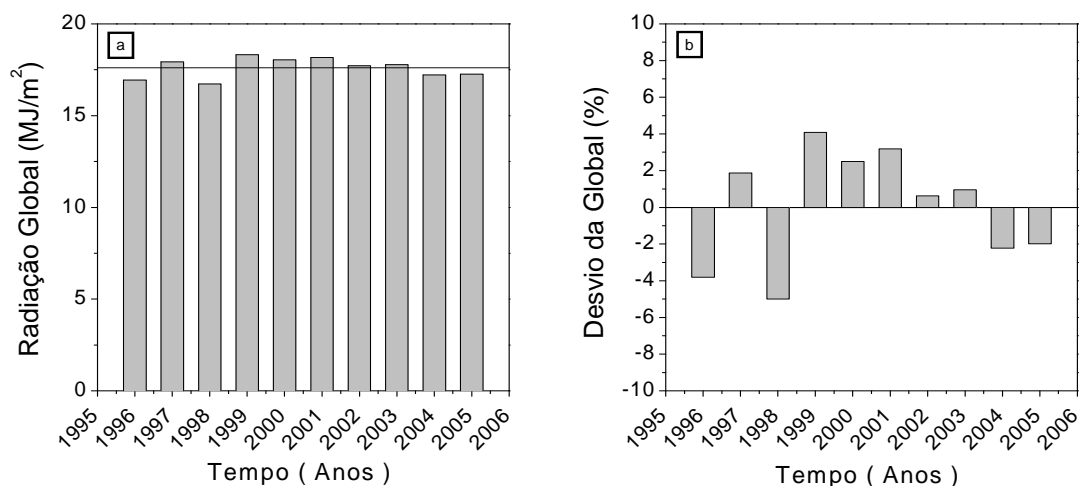


Figura 5 - a) Evolução da energia média anual diária da radiação global (MJ/m²) e **b)** desvio relativo da radiação global (%).

Os desvios inferiores a 5% mostram que a variação é pequena entre os anos. Os resultados demonstram que os eventos climáticos característicos locais como: a precipitação convectiva de setembro a março, entrada de frentes frias com aumento da nebulosidade em maio e junho e poluição das queimadas com aumento de aerossóis na atmosfera a partir de agosto até junho do ano seguinte, como mostram as séries climáticas da figura (2 e 3), se repetem anualmente com mesma intensidade, atenuando a radiação global.

Os maiores desvios positivos, que representam energia média do ano superior a energia média total, ocorreram no ano de 1999 e 2001 com valores de 4,09% e 3,18 % e os maiores desvios negativos, representam energia média do ano inferior a energia média total, ocorreram nos anos de 1996 e 1998, com valores de -3,81% e -5,00%.

4.1.2 Radiação Difusa

A Tabela 5 e a Figura 6 a) mostra a evolução da energia média anual da radiação difusa para o período de 1996 a 2005 em Botucatu. A energia mínima ocorreu no ano de 2002 com valor de 6,49 MJ/m² e a energia máxima no ano de 1996 com valor de 7,04 MJ/m². A média sobre todos os anos foi de 6,69 MJ/m².

Tabela 5 – Energia Média Mensal Diária (MJ/m²) e Desvio Relativo da Radiação Difusa (%)

	Anos	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
DIFUSA	Média	7,04	6,83	6,76	6,7	6,89	6,67	6,49	6,7	6,84	6,82
	Desvio	4,33	2,09	1,05	0,15	2,99	-0,30	-2,99	0,15	2,24	1,94

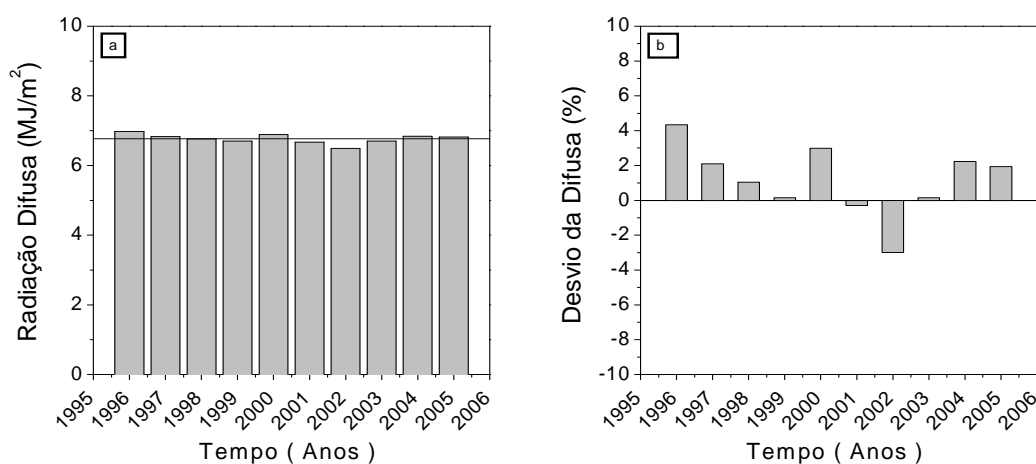


Figura 6 - a) Evolução da energia média anual diária da radiação difusa (MJ/m²) e **b)** desvio relativo da radiação difusa (%).

A comparação da energia da radiação difusa média anual em relação a energia da radiação difusa média total do período de 10 anos, calculada pela expressão (11) mostra na Figura 6 b) que de forma geral os desvios foram inferiores a 5%.

O maior desvio positivo ocorreu no ano de 1996, com valor de 4,33% e o maior desvio negativo ocorreu no ano de 2002, com valor de -2,99%.

Os anos de 1996, 1997, 2000 e 2004, com valores de 4,33%, 2,09%, 2,99% e 2,24% são os anos com os maiores desvios positivos, e os anos de 2001 e 2002, com valores de -0,30% e -2,99% são os anos com os maiores desvios negativos.

4.1.3 Radiação Direta

A Tabela 6 e a Figura 7 a) mostram a evolução da energia média anual da radiação direta diária para o período de 1996 a 2005 em Botucatu. A energia média máxima ocorreu no ano de 1999 com valor de 11,62 MJ/m² e a energia média mínima no ano de 1996 com valor de 9,95 MJ/m². O valor médio mensal sobre os 10 anos foi de 10,68 MJ/m².

A comparação da energia da radiação direta média anual em relação a energia da radiação direta média total do período de 10 anos, calculada pela expressão (11) mostra na figura 7 b) que os desvios foram inferiores a 10%.

Tabela 6 – Energia Média Mensal Diária (MJ/m²) e Desvio Relativo da Radiação Direta (%)

	Anos	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
DIRETA	Média	9,95	10,7	10	11,62	11,15	11,49	11,01	11,27	10,28	10,43
	Desvio	-6,84	0,19	-6,37	8,80	4,40	7,58	3,09	5,52	-3,75	-2,34

O maior desvio ocorreu no ano de 1999, com valor de 8,80%, e o menor desvio ocorreu no ano de 1996 com valor de -6,84%.

Os anos de 1999, 2001 e 2003, com valores de 8,80%, 7,58% e 5,52% são os anos com os maiores valores positivos, e os anos de 1996 e 1998, com valores de -6,84% e -6,37% são os anos com os menores valores negativos.

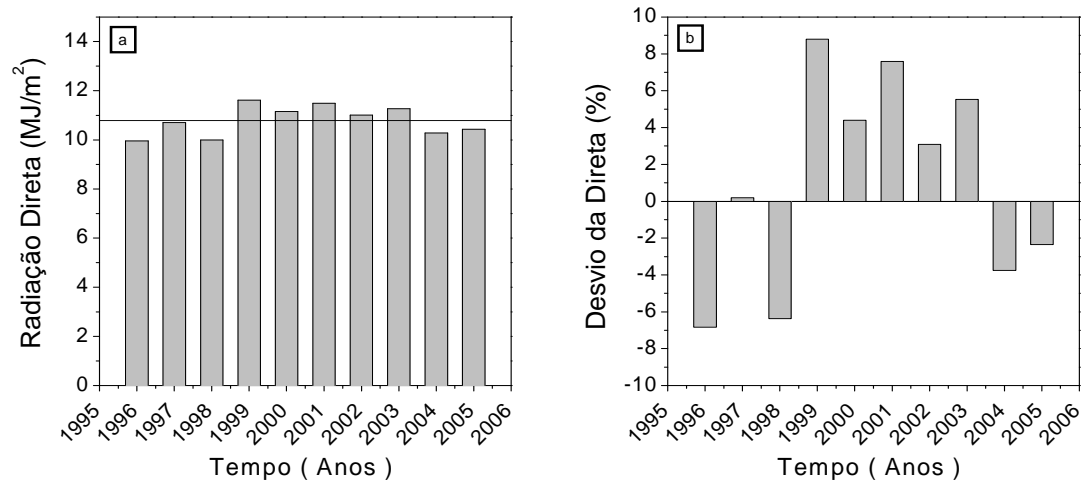


Figura 7 a) Evolução da energia média anual diária da radiação direta (MJ/m²) e **b)** desvio relativo da radiação direta (%).

Os desvios da radiação direta são relativamente proporcionais aos desvios da radiação global, sendo que nos anos de 1996, 1998, 2004 e 2005 eles são negativos em ambas as radiações, e nos anos de 1997, 1999, 2000, 2001, 2002 e 2003 os desvios são positivos nas duas radiações.

4.2 Séries Temporais das Radiações Global, Difusa e Direta das Médias Mensais Diárias.

4.2.1 Radiação Global

A tabela 7 mostra: as evoluções anuais dos valores médios mensais diários (MJ/m^2) e desvios relativos (%) da média para a radiação global $\overline{H_G^d}$ do período de 1996 a 2005; a evolução anual dos valores médios mensais diários (MJ/m^2) e desvios relativos da média (%), entre os valores médios mensais diários anuais da radiação global $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta$ $\langle \overline{H_G^d} \rangle$ dos 10 anos; a evolução anual dos valores médios mensais diários (MJ/m^2) da radiação no topo da atmosfera; a evolução anual dos valores médios mensais diários (%) do índice de claridade $\overline{K_t}$.

As evoluções anuais dos valores médios mensais diários e desvios relativos de cada ano para a radiação global, representadas pelas colunas $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta$ $\langle \overline{H_G^d} \rangle$ do período de 1996 a 2005, mostram que as variações ao longo do ano são de naturezas astronômicas, geográficas e climáticas.

Os valores das energias médias são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local (hemisfério sul) nos meses de janeiro, dezembro, fevereiro, novembro, outubro e março, durante as estações do verão e primavera. Em contraste, os valores das energias médias são menores quando o sol declina no hemisfério norte, mais distante da latitude local, nos meses de setembro, abril, maio, agosto, junho e julho, nas estações do outono e inverno.

Tabela 7 - Valores médios mensais (MJ/m²) e Desvio Percentual (%) da Radiação Global $\overline{H_G^d}$, no período 1996 a 2005.

Mês/Ano	$\overline{H_G^d}$ 1996	$\overline{H_G^d}$ 1997	$\overline{H_G^d}$ 1998	$\overline{H_G^d}$ 1999	$\overline{H_G^d}$ 2000	$\overline{H_G^d}$ 2001	$\overline{H_G^d}$ 2002	$\overline{H_G^d}$ 2003	$\overline{H_G^d}$ 2004	$\overline{H_G^d}$ 2005	$\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$	$\overline{H_O^d}$	$\overline{K_t}$
1	18,7 ± 7,3	22,5 ± 5,3	20,8 ± 5,7	17,2 ± 6,7	19,3 ± 7,2	22,5 ± 4,6	19,4 ± 6,1	15,6 ± 6,7	17,4 ± 7,8	16,4 ± 7,5	19,0 ± 2,4	42,3	0,45 ± 0,06
2	18,8 ± 4,2	21,4 ± 5,8	16,7 ± 6,5	18,4 ± 6,0	19,3 ± 7,4	20,1 ± 5,6	15,7 ± 7,8	21,9 ± 6,4	20,5 ± 6,3	22,8 ± 5,1	19,6 ± 2,2	39,9	0,49 ± 0,06
3	17,7 ± 4,8	20,0 ± 5,7	18,5 ± 4,4	21,8 ± 5,1	17,9 ± 4,7	20,0 ± 5,0	21,2 ± 4,8	19,2 ± 5,1	19,1 ± 5,0	18,4 ± 6,2	19,4 ± 1,4	35,5	0,55 ± 0,04
4	17,0 ± 4,3	17,2 ± 3,6	15,8 ± 5,5	19,1 ± 4,2	19,8 ± 3,6	18,9 ± 3,1	19,3 ± 2,0	16,9 ± 5,2	15,4 ± 4,5	17,1 ± 4,2	17,7 ± 1,5	30,0	0,59 ± 0,05
5	13,8 ± 3,2	13,7 ± 4,9	13,1 ± 5,0	15,4 ± 4,0	15,3 ± 3,1	13,2 ± 5,1	13,4 ± 4,3	15,4 ± 4,0	12,9 ± 4,0	14,0 ± 4,6	14,0 ± 1,0	25,0	0,56 ± 0,04
6	10,7 ± 5,9	11,0 ± 5,0	13,4 ± 2,5	12,4 ± 4,3	13,4 ± 2,5	12,0 ± 4,6	14,4 ± 0,9	13,6 ± 2,6	12,1 ± 4,2	12,9 ± 3,3	12,6 ± 1,2	22,7	0,56 ± 0,05
7	14,3 ± 2,9	14,3 ± 2,9	13,4 ± 2,5	14,4 ± 3,4	14,2 ± 4,1	14,1 ± 2,9	13,1 ± 4,7	14,1 ± 2,9	12,7 ± 4,6	13,7 ± 3,5	13,8 ± 0,6	23,6	0,59 ± 0,03
8	17,1 ± 3,5	16,5 ± 4,9	13,6 ± 5,0	18,3 ± 2,5	14,9 ± 5,3	16,8 ± 3,6	15,7 ± 4,7	16,1 ± 5,2	17,9 ± 3,1	16,7 ± 2,9	16,3 ± 1,4	27,7	0,59 ± 0,05
9	16,5 ± 6,9	17,7 ± 5,1	14,6 ± 6,5	19,3 ± 6,6	17,6 ± 6,5	18,9 ± 5,0	17,8 ± 5,5	18,1 ± 6,1	19,5 ± 3,5	16,4 ± 5,6	17,7 ± 1,5	33,1	0,53 ± 0,05
10	20,1 ± 5,1	18,8 ± 7,4	17,8 ± 7,8	20,7 ± 6,4	22,0 ± 5,6	22,1 ± 6,7	21,4 ± 4,2	19,8 ± 7,6	17,1 ± 8,4	16,5 ± 5,4	19,6 ± 2,0	38,0	0,52 ± 0,05
11	19,8 ± 7,1	19,3 ± 6,5	22,9 ± 6,6	22,1 ± 7,2	21,9 ± 6,6	21,4 ± 6,4	19,6 ± 7,2	20,5 ± 6,4	21,0 ± 7,3	21,1 ± 5,9	21,0 ± 1,2	41,2	0,51 ± 0,03
12	18,2 ± 5,7	22,5 ± 5,3	19,7 ± 7,6	20,2 ± 6,2	20,5 ± 5,8	17,6 ± 7,1	21,2 ± 5,5	21,7 ± 6,0	20,9 ± 6,5	20,6 ± 6,6	20,4 ± 1,5	42,6	0,48 ± 0,03
Média	16,93 ± 2,8	17,93 ± 3,6	16,73 ± 3,3	18,32 ± 3,0	18,04 ± 3,0	18,16 ± 3,5	17,71 ± 3,1	17,77 ± 2,9	17,21 ± 3,3	17,25 ± 3,0	17,60 ± 2,8	33,46	0,53 ± 0,04
Acumulados	6194,36	6559,17	6121,42	6704,48	6600,01	6644,81	6486,20	6495,60	6292,34	6302,15	6435,90		

Os efeitos climáticos podem ser observados por meio das comparações das variações dos valores médios mensais diários nos mesmos meses entre os anos, e entre os meses nos períodos da seca (outono e inverno) e úmido (verão e primavera). Para o mês de janeiro, os valores médios mensais diários variaram desde 15,6 MJ/m² em 2004 até 22,5 MJ/m² nos anos de 2001 e 1997; fevereiro de 15,7 MJ/m² em 2002 até 22,8 MJ/m² em 2005; março de 17,7 MJ/m² em 1996 até 21,8 MJ/m² em 1999; abril de 15,4 MJ/m² em 2004 à 19,8 MJ/m² em 2000, maio de 12,9 MJ/m² em 2004 à 15,4 MJ/m² em 1999 e 2003; junho de 10,7 MJ/m² em 1996 à 14,4 MJ/m² em 2002; julho de 12,7 MJ/m² em 2004 à 14, 4 MJ/m² em 1999; agosto de 13,6 MJ/m² em 1998 à 17,9 MJ/m² em 2004; setembro de 14,6 MJ/m² em 1998 à 19,5 MJ/m² em 2004; em outubro de 16,5 MJ/m² em 2005 à 22,1 MJ/m² em 2001; em novembro de 19,3 MJ/m² em 1997 à 22,9 MJ/m² em 1998; em dezembro de 17,6 MJ/m² em 2003 à 22,5 MJ/m² em 1997.

A evolução anual dos valores médios mensais diários de cada ano da radiação global $\overline{H_G^d}$ dos 10 anos é mostrada na Figura 8 a). A Figura 8 b) mostra a sazonalidade da radiação global $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$ com maiores valores nas estações verão/primavera e menores no outono/inverno. A evolução dos valores médios e desvios relativos na superfície terrestre tende a acompanhar a radiação do topo da atmosfera mostrado na Figura 8 c), decrescendo de janeiro até junho e crescendo de julho até dezembro. Os valores médios mensais diários e desvios relativos $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$ variaram de 21,0 MJ/m² em novembro até 12,6 MJ/m² em junho.

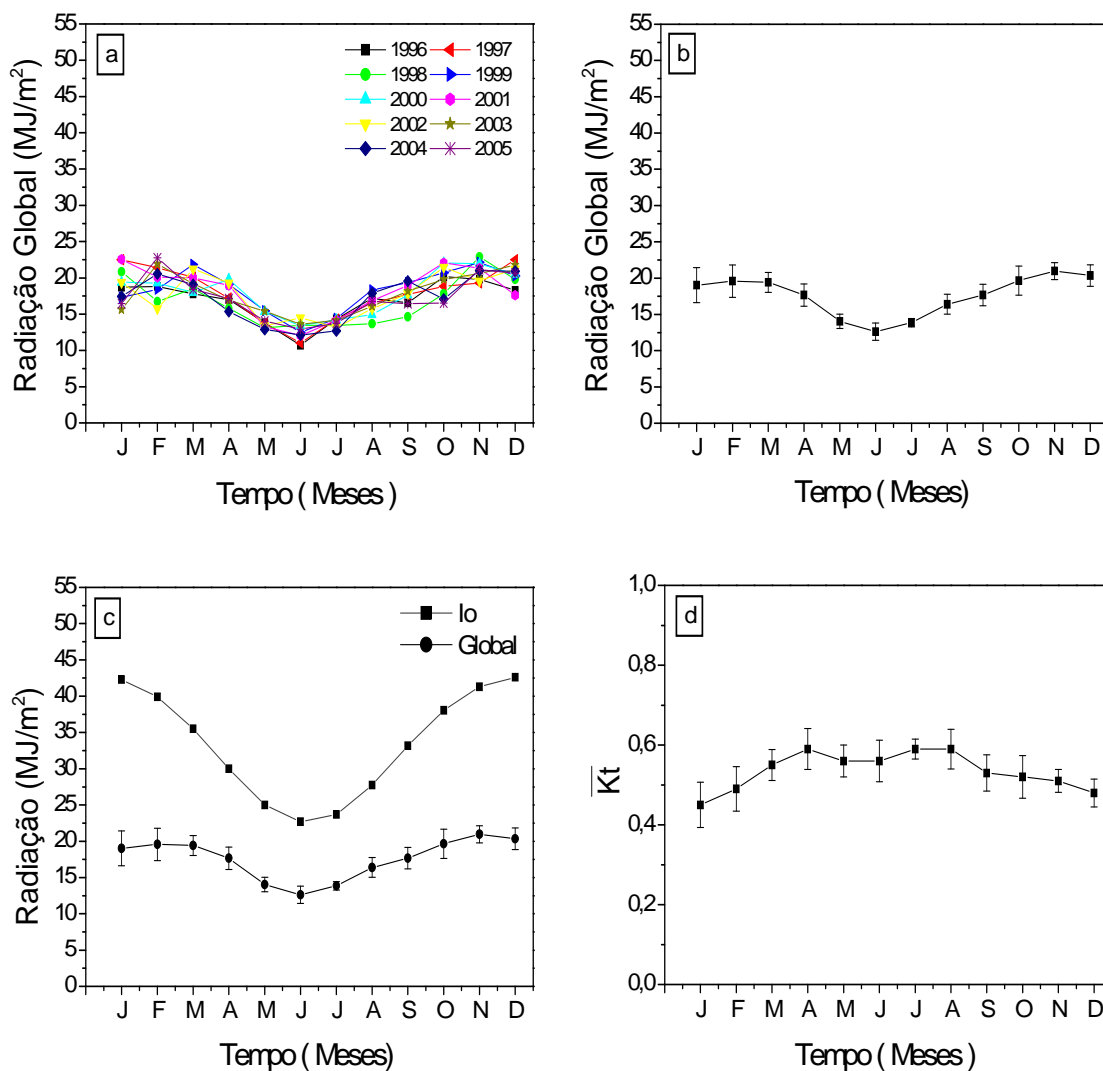


Figura 8 – a) Radiação Global de 1996 à 2005 b) Radiação Global c) Radiação no Topo da Atmosfera e Radiação Global d) Índice Radiométrico $\overline{K_t}$.

A comparação dos valores médios da energia entre as estações do ano verão e primavera, mostram que na primavera os valores energéticos são mais elevados que no verão, numa clara evidência que os efeitos do vapor d'água devido ao período chuvoso e da nebulosidade é mais acentuado na absorção e espalhamento da radiação global, no verão que na primavera. Entre os valores médios nas estações do ano, outono e inverno, não há uma diferença significativa. A única anomalia ocorreu em junho, cujo valor médio diminuiu rapidamente e aumentou em julho em relação a maio. A evolução dos valores médios do outono deveria decrescer sistematicamente de abril a junho, e crescer no inverno de julho a setembro. O decréscimo do valor médio em junho deve-se as entradas das frentes frias vindas do sudeste que aumentam em muito a nebulosidade na atmosfera.

Os desvios percentuais variaram de 2,5% em janeiro até 0,6% em junho e expressam numericamente os efeitos climáticos da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atenuação por absorção e espalhamento da radiação global na atmosfera, diminuindo seus valores na superfície terrestre. Os desvios relativos dos valores médios entre os anos foram maiores nos meses em que apresentam maiores concentrações de nebulosidade e vapor d'água como janeiro, fevereiro e dezembro, e foram menores nos meses mais secos, menos nebulosos e com concentração elevada de aerossóis como junho, julho e agosto.

A evolução anual dos valores médios mensais diários do índice de claridade atmosférica \overline{K}_t , calculada mensalmente pela equação: $\overline{K}_t = \overline{H}_G^d / \overline{H}_O^d$, mostrada na Tabela 7 com respectivos desvios relativos da média e na Figura 8 d), expressa a transmissão da radiação global em Botucatu. Os valores de \overline{K}_t variaram de 45,0% à 59,0% e os resultados confirmam a dependência da cobertura de céu na transmissão da radiação global, meses com maiores concentrações de nuvens e vapor d'água apresentam menores valores de \overline{K}_t , e meses com menores concentrações de nebulosidade e vapor d'água, possuem maiores valores de \overline{K}_t .

No período chuvoso e nebuloso, os meses de janeiro, fevereiro e dezembro apresentam valores inferiores a 50.0%: janeiro com 45,0%; dezembro com 48,0% e fevereiro com 49,0%. No período seco e sem nuvens, os meses de julho e agosto apresentam

maiores valores: 59,0%. Uma exceção ocorreu em abril cuja estação é intermediária entre os períodos com e sem nuvens e vapor d'água, porém o resultado de 59,0% foi um pouco elevado e indica que houve uma predominância de dias claros neste mês. A consequência foi que a radiação global na superfície terrestre decresceu numa taxa menor que a radiação do topo da atmosfera neste período. A fração $\overline{K_t}$ média anual foi de 53,0%.

Utilizando-se de dados de radiação solar global de outras localidades do mundo, encontrados na literatura estrangeira, pode-se fazer uma comparação com os dados de radiação solar global em Botucatu.

Islam et al. (2009) analisaram dados de radiação solar global média mensal diária em Abu Dhabi, UAE, (lat. 24.43° N e long. 54.45° L) e outras quatorze cidades da Arábia Saudita (Abu Dhabi, Amman, Bahrain, Tunis, Alger, Riadh, Bagdad, Sala(oman), Doha, Casablanca, Sana, Mosul, Damas, Jerusalém e Kuwait). O clima nessa região é seco no verão, com precipitação mínima entre os meses de maio a outubro, e inverno de novembro a abril, com precipitação máxima concentrada nos meses de fevereiro e março. Dentre essas localidades com latitudes semelhantes, os valores médios de radiação global obtidos variaram de 16,17 MJ/m² em Alger à 21,54 MJ/m² em Abu Dhabi. Os valores mínimos variam de 7,92 MJ/m² em Alger à 14,40 MJ/m² em Abu Dhabi. E os máximos variam de 20,88 MJ/m² em Sana a 30,24 MJ/m² em Amman. Podemos perceber que a evolução média mensal diária de radiação solar global em Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) não acompanha a evolução dos demais países da Arábia Saudita apresentados na Figura 9, que mostra os valores médios mensais diários de radiação solar global em Abu Dhabi e outras quatorze cidades da Arábia Saudita e para Botucatu. A radiação solar global em Botucatu (hemisfério sul) é mais elevada na primavera e verão, de outubro a março, com valor mínimo de 12,60 MJ/m², máximo de 21,00 MJ/m² e média de 17,62 MJ/m², em contraste com os países da Arábia Saudita (hemisfério norte), que apresentam valores elevados de radiação solar nas estações de outono e inverno, nos meses de abril à setembro, quando o sol declina mais próximo da latitude local neste hemisfério (levando em consideração que as estações do ano são inversas em ambos os hemisférios).

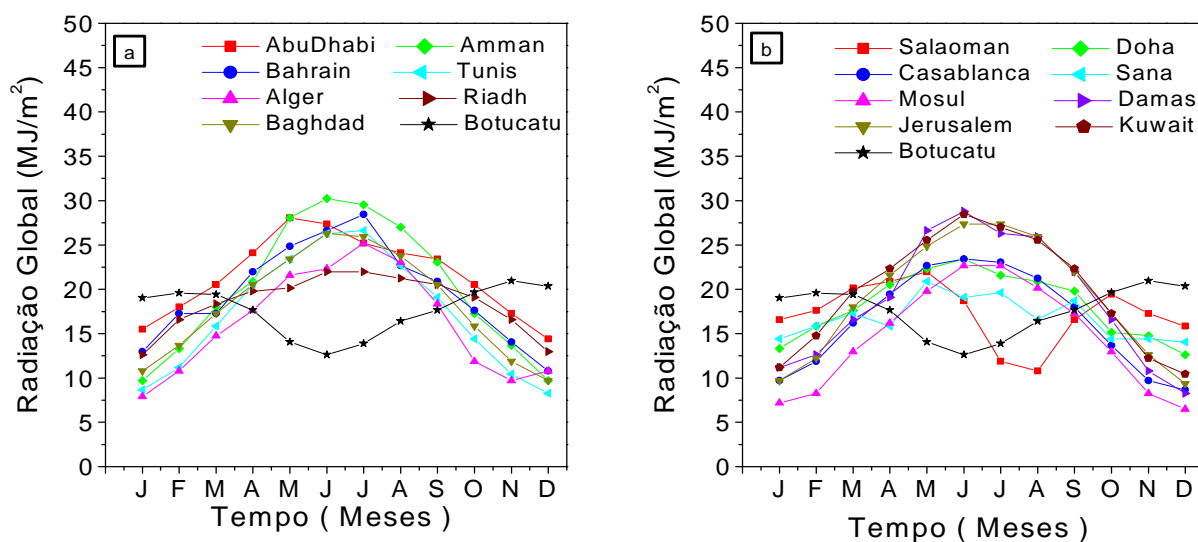


Figura 9 – Evolução das médias mensais diárias de radiação global em Abu Dhabi e outras quatorze cidades da Arábia Saudita e Botucatu (Brasil).

Al-Mohamad (2004) analisou dados médios mensais diários de radiação solar global para quatro localidades da Síria, país de clima com verões secos de maio a setembro, e invernos chuvosos de outubro a abril. As cidades foram escolhidas de acordo com as principais regiões do país: Hama (lat. 35.13° N e long. 36.75° L), Damascus (lat. 33.50° N e long. 36.28° L), Deir Al-Zor (lat. 35.33° N e long. 40.13° L) e Lattakia (lat. 35.51° N e long. 35.78° L). Com relação aos dados de radiação global, os valores médios para estas quatro localidades com latitudes próximas, variaram de $16,7 \text{ MJ/m}^2$ em Lattakia à $18,7 \text{ MJ/m}^2$ em Damascus, os valores mínimos variaram de $7,9 \text{ MJ/m}^2$ em Lattakia à $9,1 \text{ MJ/m}^2$ em Damascus, e os valores máximos variaram de $24,5 \text{ MJ/m}^2$ em Lattakia à $27,7 \text{ MJ/m}^2$ em Hama. Em comparação com Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O), o valor médio de radiação global foi de $17,8 \text{ MJ/m}^2$, mínimo de $13,6 \text{ MJ/m}^2$ e o máximo de $21,9 \text{ MJ/m}^2$. Os dados de radiação solar global na Síria (hemisfério norte) e em Botucatu (hemisfério sul) são

inversos, levando-se em consideração a posição geográfica das localidades. Nos meses de primavera e verão em Botucatu (hemisfério sul), a intensidade que energia que chega na superfície terrestre da cidade é mais elevada do que nas localidades da Síria (hemisfério norte), que no mesmo período encontram-se no outono e inverno, quando o sol declina mais distante da latitude local, e a intensidade de energia que chega na superfície terrestre da Síria é menor. A Figura 10 mostra a evolução das médias mensais diárias de radiação global para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

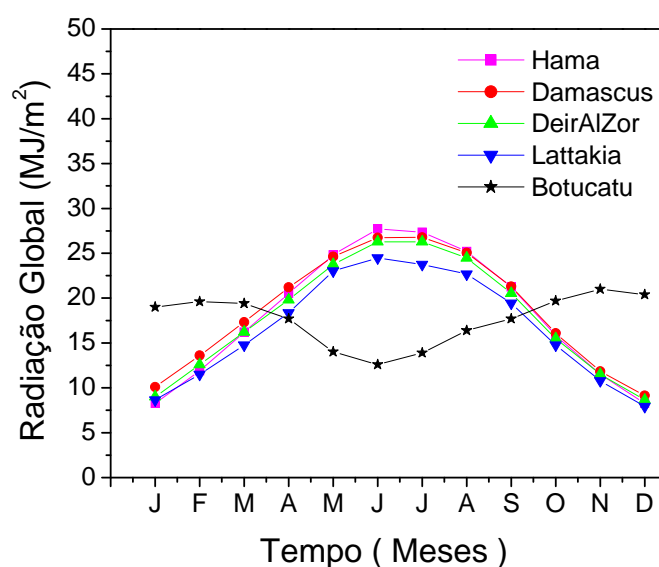


Figura 10 - Evolução das médias mensais diárias de radiação global para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

Ulgen & Hepbasli (2009) analisaram dados médios mensais diários de radiação solar global em três cidades da Turquia, Ankara (lat. 39.95° N e long. 32.88° L), Istanbul (lat. 40.96° N e long. 29.08° L) e Izmir (lat. 38.40° N e long. 27.16° L). O clima nestas localidades da Turquia caracteriza-se por verão quente e relativamente seco (junho a setembro) e inverno chuvoso (outubro a maio). Dos dados analisados de radiação global, para Ankara foi obtido valor médio de 15,55 MJ/m², valor mínimo de 5,1 MJ/m² e valor máximo de 25,6 MJ/m². Em Istanbul foram obtidos valor médio de 14,08 MJ/m², mínimo de 4,3 MJ/m² e máximo de 23,9 MJ/m². E em Izmir o valor médio foi de 16,92 MJ/m², mínimo de 7,2 MJ/m² e

máximo de 26,3 MJ/m². Comparando os dados de radiação global dessas três cidades da Turquia, com os dados de Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O), podemos observar que os valores de radiação foram opostos ao longo dos meses do ano. Enquanto em Ankara, Istanbul e Izmir os valores de radiação foram mais elevados nos meses de abril à setembro (primavera e verão no hemisfério norte), o valor de radiação em Botucatu para estes meses foi o menos elevado (outono e inverno no hemisfério sul), pois o sol declina no hemisfério norte, mais próximo da latitude da Turquia. O valor médio de radiação global em Botucatu foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo foi de 21,00 MJ/m², como mostra a Figura 11.

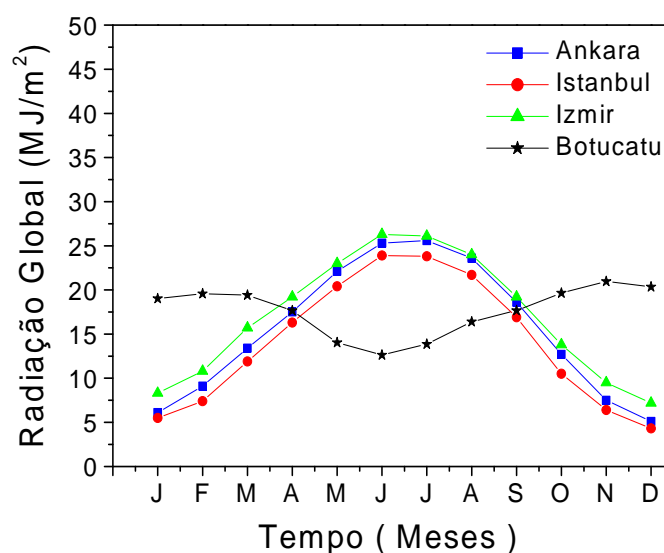


Figura 11– Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para Ankara, Istanbul e Izmir (Turquia), e Botucatu (Brasil).

Oğulata & Oğulata (2002) estudaram dados médios mensais diários de radiação solar global em Adana, localizada no sul da Turquia (lat. 37.00° N e long. 35.33° L). É uma região mediterrânea, e o verão é quente e úmido e a média de temperatura do mês mais quente (agosto) varia em torno de 28 °C e do mês mais frio (janeiro) varia em torno de 9,2 °C. Dos dados analisados de radiação global em Adana (Turquia), o valor médio obtido foi de 12,56 MJ/m², mínimo de 5,13 MJ/m² e máximo de 18,51 MJ/m². Analisando a Figura 12 e

comparando os dados de radiação global entre Adana e Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O), podemos observar que os valores são opostos entre as duas localidades, estando relacionados a fenômenos geográficos, devido às diferenças de latitudes (hemisfério norte e hemisfério sul), ocasionando variações nas características climáticas de cada local; na diferença de concentração dos constituintes atmosféricos variáveis em função do tipo de atividade humana de cada lugar, etc; e à fenômenos astronômicos, alterando a intensidade da incidência de raios solares ao longo do ano, dependendo da localização de cada cidade na superfície terrestre. O valor médio de radiação global em Botucatu foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo foi de 21,00 MJ/m².

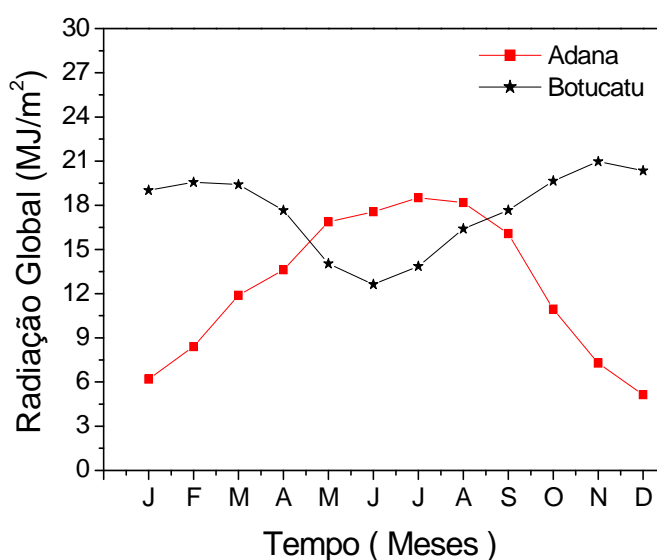


Figura 12 – Evolução das médias mensais diárias de radiação global em Adana (Turquia) e Botucatu (Brasil).

Hove & Göttsche (1999) analisaram dados de radiação solar global em vinte localidades no Zimbábue (lat. 17.83° S e long. 31.05° L), West Nicholson, Bulawayo, Mt. Darwin, Beit Bridge, Buffalo Rang, Marondera, Masvigo, Nyanga, Kariba, Harare, Victoria Fal, Binga, Grand Reef, Gweru, Kadoma, Karoi, Makoholi, Matopos, Tsholotsho e Mukandi., no período de 1971 à 1993, como mostra a Figura 13. O país é caracterizado por

clima com verões quentes e chuvosos (dezembro à março) e invernos secos (abril à outubro). Dos dados analisados, os valores médios variaram de 20,64 MJ/m² em Harare à 23,40 MJ/m² em Victoria Fal, os valores mínimos variaram de 15,00 MJ/m² em Buffalo Rang à 19,70 MJ/m² em Victoria Fal, e os valores máximos variaram de 23,20 MJ/m² em Mukandi à 27,00 MJ/m² em Buffalo Rang. Em comparação com Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) o valor médio de radiação global foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo de 21,00 MJ/m². Em Botucatu, nos meses de primavera e verão os meses apresentam maiores concentrações de nebulosidade e vapor d'água, e no outono e inverno, os meses são mais secos, menos nebulosos e com concentração elevada de aerossóis.

A evolução das médias mensais diárias de radiação solar global nas localidades do Zimbabwe acompanha de forma semelhante a evolução das médias mensais diárias de radiação solar global em Botucatu, levando-se em consideração que as localidades analisadas encontram-se no mesmo hemisfério. Observa-se na Figura 13 que os valores de radiação global nas localidades do Zimbabwe são mais elevados ao longo dos meses do ano, se comparados com Botucatu, fator que pode ser atribuído às características climáticas de cada local e na diferença de concentração dos constituintes atmosféricos variáveis em função do tipo de atividade humana de cada lugar, e por estar localizado mais próximo à linha do Equador.

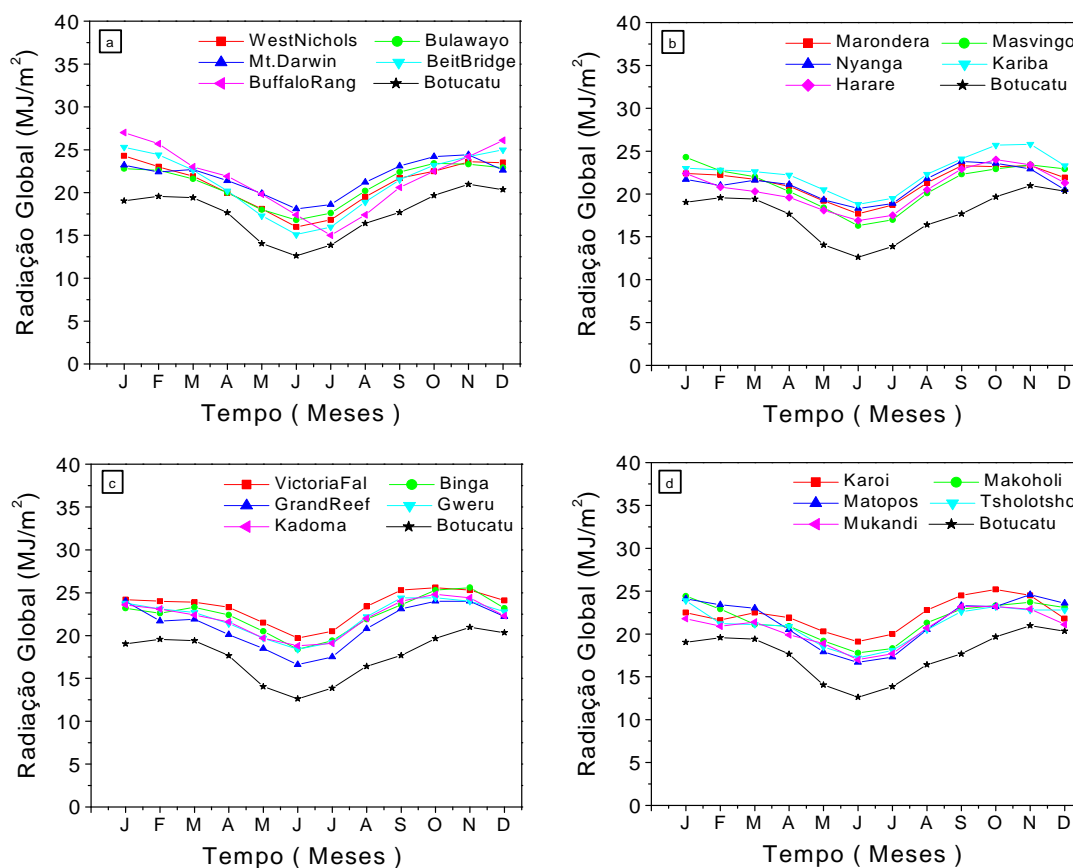


Figura 13 - Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 20 cidades do Zimbabwe (África) e Botucatu (Brasil).

Bulut (2004) mediu dados médios mensais da radiação solar global diária no Sudeste da Anatólia, região da Turquia, caracterizada por verões quentes e invernos chuvosos e frios. Foram analisados dados de 7 cidades: Adiyaman (lat. 37.45° N e long. 38.17° L), Batman (lat. 37.52° N e long. 41.10° L), Diyarbakir (lat. 37.55° N e long. 40.12° L), Gaziantep (lat. 37.05° N e long. 37.22° L), Kilis (lat. 36.44° N e long. 37.05° L), Siirt (lat. 37.56° N e long. 41.56° L) e Sanliurfa (lat. 37.08° N e long. 38.46° L), no período de 1981 à 2001. Dos dados analisados, os valores médios variaram de 13,36 MJ/m² em Adiyaman à 17,77 em Diyarbakir, os valores mínimos variaram de 4,72 MJ/m² em Batman à 7,58 MJ/m²

em Siirt, e os valores máximos variaram de 20,32 MJ/m² em Adiyaman à 28,18 MJ/m² em Diyarbakir. A Figura 14 mostra as diferenças de radiação global em Botucatu e sete localidades na Turquia, ao longo dos meses do ano. Percebemos que a radiação em Botucatu é inversa à radiação na Turquia. Em Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) o valor médio de radiação global foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo de 21,00 MJ/m².

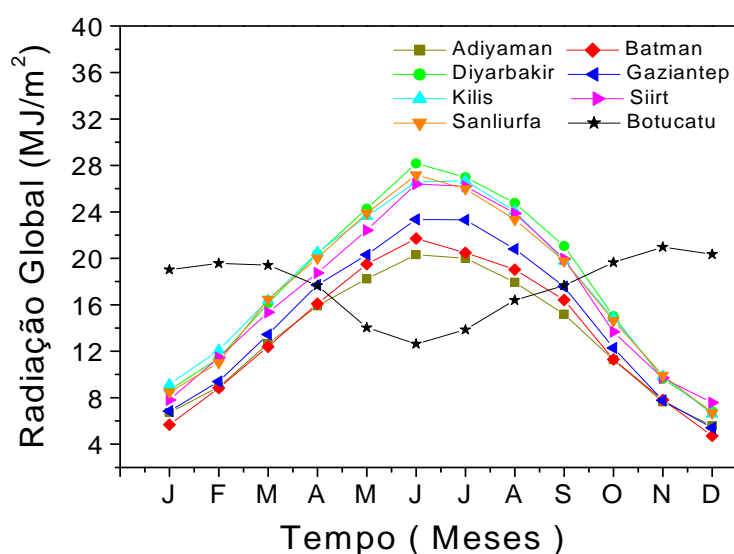


Figura 14 – Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 7 cidades no Sudeste da Anatólia (Turquia) e para Botucatu (Brasil).

Aras et. al. (2006) analisaram dados médios mensais diários da radiação solar global na Turquia (lat. 36.42° N e long. 26.45° L), medidos desde 1964, analisando 12 cidades da região da Anatólia Central: Afyon, Ankara, Cankiri, Corum, Eskisehir, Kayseri, Kırsehir, Konya, Nevsehir, Nigde, Sivas e Yozgat, como mostra a Figura 15. Foi registrada que a média total anual de radiação solar varia a partir de uma baixa de 4032 MJ/m² (1120 kwh/m²) por ano na região do Mar Vermelho com uma duração anual de brilho solar de 1971h para uma alta de 5256 MJ/m² (1460 kwh/m²) por ano na região sudeste da Anatólia com duração anual de brilho solar de 1311 kw/h/m²/ por ano. Comparando os valores de radiação solar global, em Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) o valor médio de

radiação global foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo de 21,00 MJ/m².

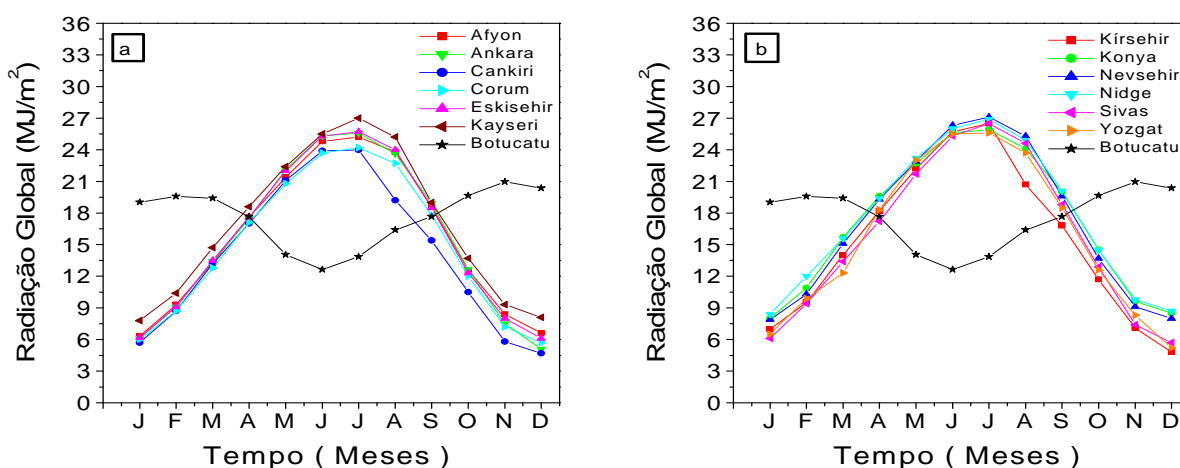


Figura 15 – Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global para 12 cidades na Anatólia Central (Turquia) e Botucatu (Brasil).

Na literatura brasileira, Souza et al. (2005) analisaram dados médios mensais diários da radiação solar global no Maceió (lat. 9.66° S e long. 35.70° O), área do Brasil caracterizada por um clima quente e semi-úmido com um período chuvoso entre março e agosto (78% da precipitação total anual ocorre durante este período) e um período de seca de setembro a fevereiro. Isto também é influenciado pelas massas de ar marítimo tropicais trazidas pelos ventos alísios, e zona de convergência intertropical e pelos efeitos do El Niño / Oscilação Sul que influenciam no clima geral do nordeste, além de sistemas climáticos locais, tais como brisa mar / terra. A temperatura do ar variou de 19,3 °C anualmente em agosto para 31,7 °C em janeiro, durante o período de 1972-1999, com uma média anual de 25,4 °C. A média mensal mostra os valores de umidade relativa do ar acima de 70%. A precipitação obteve um total mínimo de 41mm em dezembro e um máximo de 294mm em julho. Com relação aos valores de radiação global obtidos em Maceió, a média foi de 20,00 MJ/m², o

mínimo foi de 14,80 MJ/m², e o máximo foi de 24,00 MJ/m². Em Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) o valor médio de radiação global em foi de 17,62 MJ/m², o valor mínimo foi de 12,60 MJ/m² e o máximo de 21,00 MJ/m². Os valores de radiação global em Maceió são mais elevados ao longo dos meses do ano se comparados com os valores de Botucatu, levando em consideração fatores geográficos e astronômicos, conforme mostra a Figura 16.

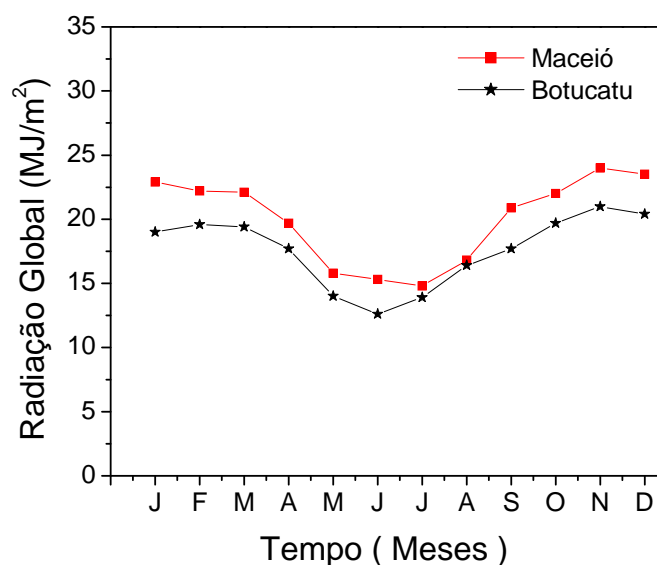


Figura 16 – Evolução das médias mensais diárias de radiação solar global em Maceió e Botucatu (Brasil).

4.2.2 Radiação Difusa

A tabela 8 mostra: as evoluções anuais dos valores médios mensais diários e desvios relativos das médias $\overline{H_d^d}$, para a radiação difusa do período de 1996 a 2005; a evolução anual dos valores médios mensais diários e desvios relativos da média entre os valores médios mensais diários anuais da radiação difusa dos 10 anos $\langle \overline{H_d^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_d^d} \rangle$; a evolução anual dos valores médios mensais diários da radiação global $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$;

evolução anual dos valores médios mensais diários da fração da radiação difusa em relação a radiação global na superfície terrestre, $\overline{K_d}$; a evolução anual dos valores médios mensais diários da fração da radiação difusa em relação a radiação no topo da atmosfera, $\overline{K_d}'$.

Os valores médios mensais diários e desvios relativos para a radiação difusa, representadas pelas colunas $\overline{H_d^d}$ nas evoluções anuais do período de 1996 à 2005, mostram que a radiação difusa também apresentam variações ao longo do ano devido as variações astronômicas e climáticas local.

Tabela 8 - Valores médios mensais (MJ/m^2) e Desvio Percentual (%) da Radiação Difusa $\overline{H_d^d}$, no período de 1996 a 2005.

Mês/Ano	$\overline{H_d^d}$ 1996	$\overline{H_d^d}$ 1997	$\overline{H_d^d}$ 1998	$\overline{H_d^d}$ 1999	$\overline{H_d^d}$ 2000	$\overline{H_d^d}$ 2001	$\overline{H_d^d}$ 2002	$\overline{H_d^d}$ 2003	$\overline{H_d^d}$ 2004	$\overline{H_d^d}$ 2005	$\langle \overline{H_d^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_d^d} \rangle$	$\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$	$\overline{K_d}$	$\overline{K_d}'$
1	9,7 ± 3	11,5 ± 2,3	9,1 ± 2,1	8,8 ± 4,1	9,2 ± 2,9	10,1 ± 2,6	9,9 ± 3,0	10,5 ± 3,0	9,1 ± 3,0	9,5 ± 3,0	9,7 ± 0,8	19,0 ± 2,4	0,51 ± 0,04	0,229 ± 0,020
2	9,8 ± 2,5	7,7 ± 3,0	8,7 ± 2,2	9,3 ± 2,6	8,7 ± 3,0	9,1 ± 2,9	7,4 ± 2,7	8,4 ± 2,7	8,2 ± 2,6	7,8 ± 2,7	8,5 ± 0,8	19,6 ± 2,2	0,43 ± 0,04	0,213 ± 0,019
3	8,0 ± 2,7	7,2 ± 2,8	7,8 ± 3,0	6,3 ± 2,7	8,9 ± 2,5	6,3 ± 3,1	7,5 ± 2,6	5,9 ± 2,6	6,7 ± 2,6	7,5 ± 2,8	7,2 ± 0,9	19,4 ± 1,4	0,37 ± 0,05	0,203 ± 0,026
4	5,4 ± 2,2	5,4 ± 2,0	5,8 ± 2,5	5,1 ± 2,2	4,1 ± 2,0	5,0 ± 3,1	5,2 ± 2,7	4,3 ± 2,7	7,7 ± 4,0	5,2 ± 1,9	5,3 ± 1,0	17,7 ± 1,5	0,30 ± 0,06	0,177 ± 0,034
5	4,8 ± 1,9	4,0 ± 1,6	4,2 ± 2,1	4,2 ± 2,1	4,2 ± 1,9	4,5 ± 2,0	3,5 ± 1,6	4,7 ± 1,6	5,2 ± 2,1	3,8 ± 1,7	4,3 ± 0,5	14,0 ± 1,0	0,31 ± 0,03	0,172 ± 0,020
6	3,4 ± 1,7	3,5 ± 2,0	4,2 ± 2,0	4,0 ± 2,0	4,0 ± 1,8	3,7 ± 1,8	3,5 ± 1,8	3,1 ± 1,8	3,9 ± 1,7	3,6 ± 1,9	3,7 ± 0,4	12,6 ± 1,2	0,29 ± 0,03	0,163 ± 0,016
7	3,5 ± 1,3	3,9 ± 1,6	4,1 ± 1,7	4,2 ± 1,7	3,7 ± 1,9	4,2 ± 2,1	4,2 ± 2,2	3,8 ± 2,2	4,5 ± 2,2	3,9 ± 1,9	4,0 ± 0,3	13,8 ± 0,6	0,29 ± 0,02	0,169 ± 0,012
8	4,2 ± 2,4	4 ± 2,3	5,7 ± 1,8	4,7 ± 2,0	5,2 ± 2,7	4,5 ± 2,3	4,2 ± 2,3	4,2 ± 2,3	3,7 ± 1,9	4,4 ± 2,2	4,5 ± 0,6	16,3 ± 1,4	0,27 ± 0,04	0,161 ± 0,021
9	6,5 ± 2,7	6,8 ± 2,3	6,7 ± 2,5	6,3 ± 2,2	7,0 ± 2,8	6,9 ± 2,8	5,4 ± 1,9	6,9 ± 1,9	6,6 ± 2,5	7,7 ± 2,5	6,7 ± 0,6	17,7 ± 1,5	0,38 ± 0,03	0,202 ± 0,018
10	8,8 ± 2,5	8,4 ± 2,9	7,6 ± 3,4	8,9 ± 2,9	7,8 ± 2,9	7,5 ± 2,9	7,0 ± 3,3	8,5 ± 3,3	7,7 ± 3,0	9,2 ± 2,9	8,2 ± 0,7	19,6 ± 2,0	0,41 ± 0,04	0,215 ± 0,019
11	9,7 ± 4,0	10,2 ± 3,5	8,0 ± 2,9	9,1 ± 2,8	9,1 ± 2,9	8,0 ± 3,3	9,6 ± 3,0	9,5 ± 3,0	8,7 ± 3,5	9,6 ± 3,4	9,2 ± 0,7	21,0 ± 1,2	0,44 ± 0,03	0,222 ± 0,017
12	10,6 ± 2,1	9,4 ± 3,4	9,1 ± 2,0	9,5 ± 2,4	10,8 ± 2,2	10,2 ± 2,7	10,5 ± 3,1	10,6 ± 3,1	10,2 ± 2,6	9,4 ± 2,6	10,0 ± 0,6	20,4 ± 1,5	0,49 ± 0,03	0,235 ± 0,014
Média	7,04 ± 2,7	6,83 ± 2,7	6,76 ± 1,9	6,70 ± 2,2	6,89 ± 2,5	6,67 ± 2,3	6,49 ± 2,5	6,70 ± 2,7	6,84 ± 2,1	6,82 ± 2,4	6,78 ± 2,3	17,60 ± 2,8	0,37 ± 0,08	0,197 ± 0,027
Acumulado	2525,44	2500,96	2470,86	2449,78	2522,80	2440,10	2376,86	2453,02	2501,68	2485,08	2478,40	6435,90		

Os valores das energias médias na superfície terrestre acompanham os valores das energias da radiação no topo da atmosfera e são maiores nos meses de janeiro, dezembro, fevereiro, novembro, outubro e março, durante as estações do verão e primavera, os quais a concentração de nuvens é elevada e a de aerossóis é baixa. Os valores das energias médias são menores nos meses de setembro, abril, maio, agosto, junho e julho, nas estações do outono e inverno, os quais a concentração de nuvens é pequena e de aerossóis é elevada.

Para o mês de janeiro, os valores médios mensais diários variaram desde 8,8 MJ/m² em 1999 à 11,5 MJ/m² em 1997; fevereiro de 7,4 MJ/m² em 2002 até 9,8 MJ/m² em 1996; março de 6,3 MJ/m² em 1999 e 2001 até 8,9 MJ/m² em 2000; abril de 4,1 MJ/m² em 2000 a 7,7 MJ/m² em 2004; maio de 3,5 MJ/m² em 2002 à 4,8 MJ/m² em 1996; junho de 3,1 MJ/m² em 2003 à 4,2 MJ/m² em 1998; julho de 3,5 MJ/m² em 1996 à 4,5 MJ/m² em 2004; agosto de 3,7 MJ/m² em 2004 à 5,7 MJ/m² em 1998; setembro de 5,4 MJ/m² em 2002 à 7,7 MJ/m² em 2005; em outubro de 7,0 MJ/m² em 2002 à 9,2 MJ/m² em 2005; em novembro de 8,0 MJ/m² em 1998 à 10,2 MJ/m² em 1997; em dezembro de 9,1 MJ/m² em 1998 à 10,8 MJ/m² em 2000.

A evolução anual dos valores médios mensais diários de cada ano da radiação difusa $\overline{H_d^d}$ dos 10 anos é mostrada na Figura 17 a). A Figura 17 b) mostra a evolução anual dos valores médios mensais diários e desvios relativos, entre os valores médios mensais diários anual da radiação difusa representadas na tabela pela coluna $\langle \overline{H_d^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_d^d} \rangle$.

Similarmente, às evoluções de cada ano, a evolução dos valores médios e desvios relativos na superfície terrestre, seguem a radiação do topo da atmosfera conforme mostrado na Figura 17 c). A energia média decresce de janeiro até junho e cresce de julho até dezembro. O mês mais elevado foi dezembro com valor de 10,0 MJ/m², seguido de janeiro com 9,7 MJ/m²; novembro com 9,2 MJ/m², fevereiro com 8,5 MJ/m²; outubro 8,2 MJ/m²; março 7,2 MJ/m²; setembro com 6,7 MJ/m²; abril com 5,3 MJ/m²; agosto com 4,5 MJ/m²; maio com 4,3 MJ/m², julho com 4,0 MJ/m² e junho com 3,7 MJ/m².

Os desvios relativos da média variaram de 2,4% em janeiro até 0,6% em julho e também expressam a variabilidade dos efeitos climáticos da nebulosidade, aerossóis no espalhamento da radiação direta em difusa na atmosfera. Os desvios relativos dos valores

médios entre anos foram maiores nos meses em que apresentam maiores concentrações de nebulosidade como janeiro, fevereiro, março e outubro, e foram menores nos meses mais secos, menos nebulosos e com concentração elevada de aerossóis como maio, junho, julho e agosto.

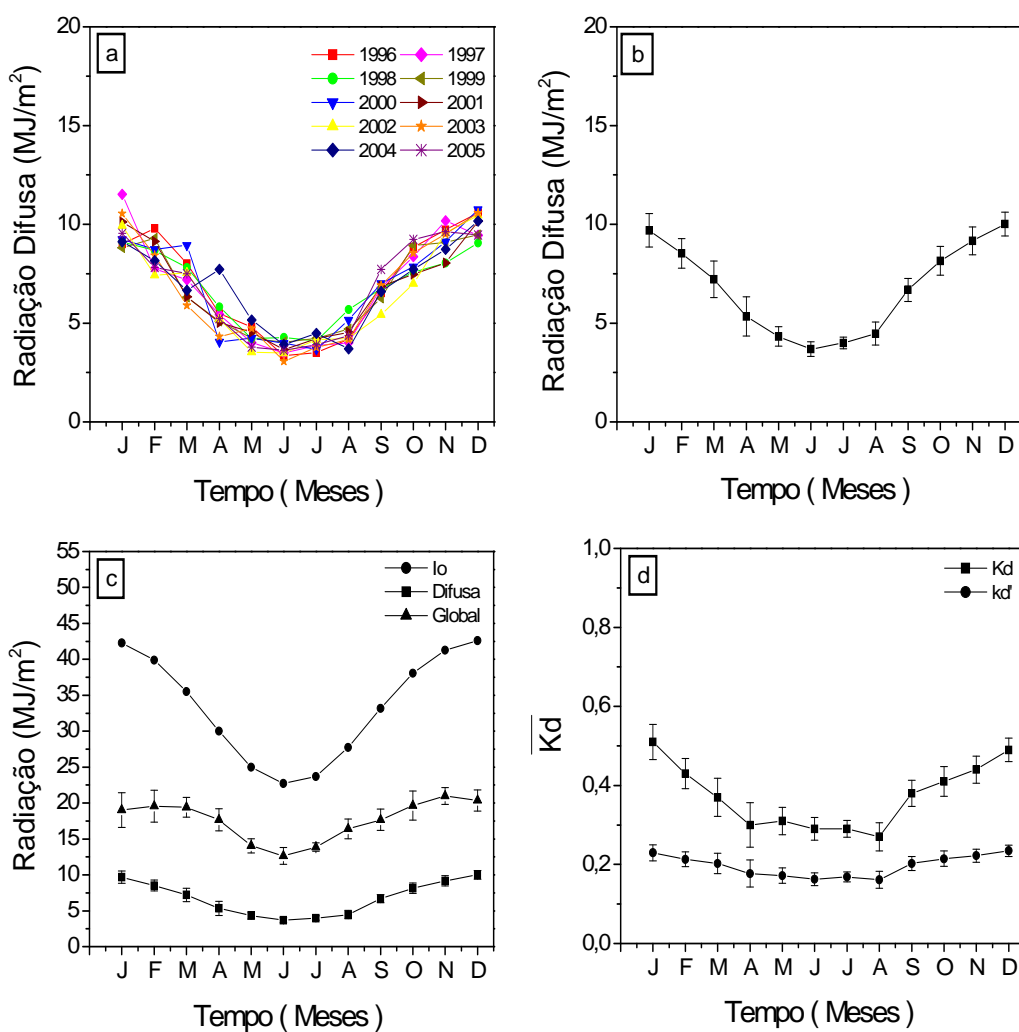


Figura 17 – a) Radiação Difusa de 1996 à 2005 b) Radiação Difusa c) Radiação no Topo da Atmosfera, Radiação Difusa e Radiação Global d) Índices Radiométricos $\overline{K_d}$ e $\overline{K_d}'$

A evolução anual dos valores da fração $\overline{K_d}$ médios mensais diários, calculada mensalmente pela equação: $\overline{K_d} = \overline{H_G^d} / \overline{H_d^d}$, mostrada na Tabela 8 com respectivos desvios relativos da média e na Figura 17 d), expressa a fração da radiação difusa em relação a radiação global incidente na superfície terrestre em Botucatu.

Os valores de $\overline{K_d}$ variaram de 27% à 51,0% e os resultados confirmam a dependência da cobertura de céu na transmissão da radiação global, meses com maiores concentrações de nuvens apresentam maiores valores de $\overline{K_d}$, e meses com menores concentrações de nebulosidade possuem menores valores de $\overline{K_d}$. No período chuvoso o mês de janeiro com 51% foi o único mês que apresentou valor superior a 50,0%, sendo que os demais meses do período úmido, apresentaram frações inferiores a 50,0% : dezembro com 49,0%; fevereiro com 43%; novembro com 44,0%; outubro com 41,0%; setembro com 41,0% e março com 37,0%. No período seco e sem nuvens, o mês que apresentou a maior fração difusa da radiação global foi maio com 31% e o menor foi agosto com 27,0%. Os demais meses, junho e julho, as frações difusas médias foram iguais com 29,0%.

A evolução anual dos valores da fração $\overline{K_d}'$ médios mensais diários na superfície terrestre, calculada mensalmente pela equação: $\overline{K_d}' = \overline{H_d^d} / \overline{H_o^d}$, mostrada na tabela 8 com respectivos desvios relativos da média e na Figura 17 d), expressa a fração transmissão da radiação difusa em relação a radiação incidente no topo da atmosfera em Botucatu.

Os valores de $\overline{K_d}'$ variaram de 16,1% em agosto à 23,5% em dezembro. Os resultados mostram a dependência da cobertura de céu na transmissão da radiação global. Os meses com maiores concentrações de nuvens apresentam maiores valores de $\overline{K_d}'$, e meses com menores concentrações de nebulosidade possuem menores valores de $\overline{K_d}'$.

No período chuvoso, o mês de dezembro com 23,5% foi o mais elevado, os demais meses do período úmido, apresentaram frações $\overline{K_d}'$ inferiores: janeiro com 22,9%; novembro com 22,2%; fevereiro com 21,3%; outubro com 21,5%; março com

20,3%; setembro com 20,2%. No período seco e sem nuvens, o mês que apresentou a maior fração difusa $\overline{K_d}'$ foi maio com 17,7% e o menor foi agosto com 16,1%. Os demais meses, junho e julho, os valores da fração difusa $\overline{K_d}'$ foram praticamente iguais e próximas a 16,9%. A fração $\overline{K_d}'$ média anual foi de 19,7%.

Utilizando-se de dados de radiação solar difusa de outras localidades do mundo, encontrados na literatura estrangeira, pode-se fazer uma comparação com os dados de radiação solar difusa em Botucatu.

Al-Mohamad (2004) analisou dados médios mensais diários de radiação solar difusa para quatro localidades da Síria, país de clima com verões secos de maio a setembro, e invernos chuvosos de outubro a abril. As cidades foram escolhidas de acordo com as principais regiões do país: Hama (lat. 35.13° N e long. 36.75° L), Damascus (lat. 33.50° N e long. 36.28° L), Deir Al-Zor (lat. 35.33° N e long. 40.13° L) e Lattakia (lat. 35.51° N e long. 35.78° L). Para a radiação difusa, os valores médios variaram de 4,8 MJ/m² em Damascus à 6,1 MJ/m² em Lattakia, os valores mínimos variaram de 3,3 MJ/m² em Deir Al-Zor à 3,7 MJ/m² em Hama, e os máximos variaram de 6,8 MJ/m² em Damascus à 8,9 MJ/m² em Hama. A radiação solar difusa em Botucatu, localizado no hemisfério sul (lat. 22.85° S e long. 48.45° O) é mais elevada na primavera e verão, de outubro a março, com valor mínimo de 3,1 MJ/m², máximo de 10,6 MJ/m² e média de 6,7 MJ/m², em contraste com as localidades da Síria (hemisfério norte), que apresentam valores elevados de radiação solar difusa nas estações de outono e inverno na Síria, nos meses de abril à setembro, quando o sol declina mais próximo da latitude local neste hemisfério. A figura 18 mostra a evolução das médias mensais diárias de radiação difusa para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

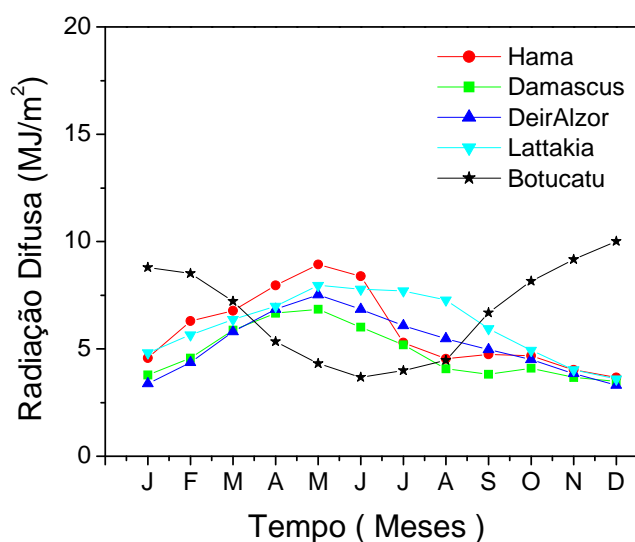


Figura 18- Evolução das médias mensais diárias de radiação difusa para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

4.2.3 Radiação Direta

A tabela 9 mostra: as evoluções anuais dos valores médios mensais diários e desvios relativos das médias $\overline{H_D^d}$, para cada ano, para a radiação direta na horizontal do período de 1996 a 2005; a evolução anual dos valores médios mensais diários e desvios relativos da média entre os valores médios mensais diários anuais da radiação direta na horizontal dos 10 anos $\langle \overline{H_D^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_D^d} \rangle$; a evolução anual dos valores médios mensais diários da radiação global $\langle \overline{H_G^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_G^d} \rangle$; a evolução anual dos valores médios mensais diários da fração da radiação direta na superfície terrestre $\overline{K_D}$; a evolução anual dos valores médios mensais diários da fração da radiação direta em relação a radiação no topo da atmosfera $\overline{K_D}'$.

Os valores médios mensais diários e desvios relativos para a radiação direta na horizontal em cada ano, representadas pelas colunas $\overline{H_D^d}$ e ilustrados na Figura 19 a) sem os desvios, para as evoluções anuais do período de 1996 à 2005, mostram que a radiação direta na horizontal, igualmente à radiação global e à difusa, apresentam variações ao longo do ano devido às variações astronômicas e climáticas local.

Os valores das energias médias na superfície terrestre acompanham os valores das energias da radiação no topo da atmosfera e deveriam ser maiores nos meses janeiro, dezembro, fevereiro, novembro, outubro e março, durante as estações do verão e primavera, e as energias médias menores nos meses de setembro, abril, maio, agosto, junho e julho, nas estações do outono e inverno. No entanto, os resultados mostram, na grande maioria dos anos, que o efeito na nebulosidade e do vapor d'água, é fundamental na atenuação da radiação direta no período chuvoso, reduzindo a níveis inferiores ao período da seca e de baixa nebulosidade.

Para o mês de janeiro, os valores médios mensais diários variaram desde 5,7 MJ/m² em 2003 à 12,4 MJ/m² em 2001; fevereiro de 7,3 MJ/m² em 2002 até 14,9 MJ/m² em 2005; março de 9,0 MJ/m² em 2000 até 15,4 MJ/m² em 2002; abril de 6,0 MJ/m² em 2004 à 15,8 MJ/m² em 2000; maio de 7,7 MJ/m² em 2004 à 11,9 MJ/m² em 2003; junho de 7,4 MJ/m² em 1996 à 11,4 MJ/m² em 2002; julho de 8,2 MJ/m² em 2004 à 10,8 MJ/m² em 1996; agosto de 8,0 MJ/m² em 1998 à 14,2 MJ/m² em 2004; setembro de 7,9 MJ/m² em 1998 à 13,1 MJ/m² em 1999; em outubro de 7,3 MJ/m² em 2005 à 14,6 MJ/m² em 2001; em novembro de 9,1 MJ/m² em 1997 à 14,9 MJ/m² em 1998; em dezembro de 7,5 MJ/m² em 2001 à 13,1 MJ/m² em 1997.

A evolução anual dos valores médios mensais diários de cada ano da radiação direta $\overline{H_D^d}$ dos 10 anos é mostrada na Figura 19 a). A Figura 19 b) mostra a evolução anual dos valores médios mensais diários e desvios relativos, entre os valores médios mensais diários anual da radiação direta representadas na tabela pela coluna $\langle \overline{H_D^d} \rangle \pm \delta \langle \overline{H_D^d} \rangle$.

Assim como as evoluções anuais, a evolução dos valores médios e desvios relativos na superfície terrestre deveriam acompanhar a radiação do topo da atmosfera, decrescendo de janeiro até junho e crescendo de julho até dezembro, conforme mostrado na

Figura 19 c). No entanto, em função das variações climáticas predominarem sobre as variações astronômicas, a evolução alternou valores médios mais elevados da radiação direta em todas as estações do ano, como mostrado na Figura 19 a). Os meses com valores médios mais elevados foram março e abril com $12,2 \text{ MJ/m}^2$, seguidos de agosto, novembro, outubro e fevereiro com valores ao redor de $11,5 \text{ MJ/m}^2$. Os meses com valores médios menos elevados foram junho com $8,9 \text{ MJ/m}^2$, maio com $9,7 \text{ MJ/m}^2$, janeiro com $8,9 \text{ MJ/m}^2$; julho com $9,9 \text{ MJ/m}^2$ e dezembro com $10,3 \text{ MJ/m}^2$.

Tabela 9 - Valores médios mensais (MJ/m^2) e Desvio Percentual (%) da Radiação Direta \overline{H}_D^d , no período de 1996 à 2005.

Mês/Ano	\overline{H}_D^d 1996	\overline{H}_D^d 1997	\overline{H}_D^d 1998	\overline{H}_D^d 1999	\overline{H}_D^d 2000	\overline{H}_D^d 2001	\overline{H}_D^d 2002	\overline{H}_D^d 2003	\overline{H}_D^d 2004	\overline{H}_D^d 2005	$\langle \overline{H}_D^d \rangle \pm$ $\delta \langle \overline{H}_D^d \rangle$	$\langle \overline{H}_G^d \rangle \pm$ $\delta \langle \overline{H}_G^d \rangle$	\overline{K}_D	$\frac{1}{\overline{K}_D}$
1	9,7 ± 8,7	6,2 ± 5,2	11,7 ± 7,0	8,5 ± 7,7	10,1 ± 7,8	12,4 ± 6,1	8,9 ± 6,7	5,7 ± 6,0	8,3 ± 8,1	6,9 ± 7,9	8,9 ± 2,2	19,0 ± 2,4	0,46 ± 0,12	0,209 ± 0,053
2	9,1 ± 5,4	13,7 ± 7,4	8,1 ± 6,4	9,1 ± 7,5	10,6 ± 8,7	10,9 ± 7,1	7,3 ± 6,8	14,5 ± 7,6	12,4 ± 7,3	14,9 ± 6,8	11,1 ± 2,7	19,6 ± 2,2	0,56 ± 0,14	0,277 ± 0,068
3	9,8 ± 6,2	12,9 ± 7,1	10,7 ± 6,6	15,5 ± 7,3	9,0 ± 6,1	13,7 ± 6,8	15,4 ± 6,0	11,7 ± 7,2	12,4 ± 6,4	10,9 ± 7,7	12,2 ± 2,2	19,4 ± 1,4	0,63 ± 0,11	0,343 ± 0,063
4	11,5 ± 6,0	11,8 ± 5,0	10,0 ± 7,0	14,0 ± 5,7	15,8 ± 5,0	14,0 ± 4,8	15,0 ± 2,4	11,7 ± 7,0	6,6 ± 6,9	11,9 ± 5,3	12,2 ± 2,7	17,7 ± 1,5	0,69 ± 0,15	0,407 ± 0,088
5	9,0 ± 4,7	9,7 ± 5,7	8,9 ± 5,9	11,2 ± 5,7	11,1 ± 4,6	8,7 ± 6,1	8,7 ± 5,4	11,9 ± 4,6	7,7 ± 5,5	10,3 ± 5,5	9,7 ± 1,3	14,0 ± 1,0	0,69 ± 0,10	0,385 ± 0,054
6	7,4 ± 6,6	7,6 ± 6,1	9,2 ± 4,2	8,4 ± 5,3	9,4 ± 4,1	8,4 ± 5,5	11,4 ± 1,8	10,2 ± 4,0	8,2 ± 5,2	9,3 ± 4,8	8,9 ± 1,2	12,6 ± 1,2	0,71 ± 0,10	0,407 ± 0,050
7	10,8 ± 3,8	10,5 ± 3,9	9,7 ± 3,7	10,2 ± 4,4	10,6 ± 5,5	9,9 ± 4,7	9,4 ± 5,6	10,0 ± 4,3	8,2 ± 5,6	9,8 ± 5,0	9,9 ± 0,7	13,8 ± 0,6	0,71 ± 0,05	0,419 ± 0,032
8	13,0 ± 5,1	12,6 ± 6,8	8,0 ± 5,1	13,6 ± 3,9	9,8 ± 6,8	12,3 ± 5,1	11,6 ± 5,5	11,9 ± 6,2	14,2 ± 4,6	12,4 ± 4,7	11,9 ± 1,8	16,3 ± 1,4	0,73 ± 0,11	0,433 ± 0,068
9	10,0 ± 7,6	10,9 ± 6,7	7,9 ± 7,1	13,1 ± 7,5	10,6 ± 7,5	12,0 ± 6,3	10,9 ± 7,3	12,7 ± 7,1	12,9 ± 5,2	8,8 ± 6,9	11,0 ± 1,8	17,7 ± 1,5	0,63 ± 0,10	0,334 ± 0,054
10	11,3 ± 6,7	10,5 ± 8,4	10,3 ± 8,7	11,8 ± 8,1	14,2 ± 7,3	14,6 ± 8,5	12,9 ± 5,4	12,8 ± 8,7	9,4 ± 9,1	7,3 ± 5,9	11,5 ± 2,3	19,6 ± 2,0	0,58 ± 0,12	0,304 ± 0,059
11	10,1 ± 9,6	9,1 ± 8,2	14,9 ± 8,2	13,1 ± 8,3	12,8 ± 8,0	13,3 ± 8,0	10,1 ± 8,5	11,0 ± 8,2	12,3 ± 9,2	11,5 ± 7,9	11,8 ± 1,8	21,0 ± 1,2	0,56 ± 0,08	0,286 ± 0,042
12	7,7 ± 6,0	13,1 ± 7,4	10,7 ± 8,2	10,8 ± 7,2	9,7 ± 7,2	7,5 ± 7,1	10,7 ± 8,0	11,3 ± 7,0	10,7 ± 7,7	11,2 ± 7,4	10,3 ± 1,7	20,4 ± 1,5	0,51 ± 0,08	0,242 ± 0,039
Média	9,95 ± 1,6	10,70 ± 2,3	10,00 ± 1,9	11,62 ± 2,3	11,15 ± 2,1	11,49 ± 2,4	11,01 ± 2,5	11,27 ± 2,1	10,28 ± 2,5	10,43 ± 2,2	10,78 ± 1,2	17,60 ± 2,8	0,62 ± 0,08	0,337 ± 0,07
Acumulado	3643,33	3899,74	3653,77	4245,59	4077,12	4194,11	4025,94	4104,18	3759,59	3786,18	3945,30	6435,90		

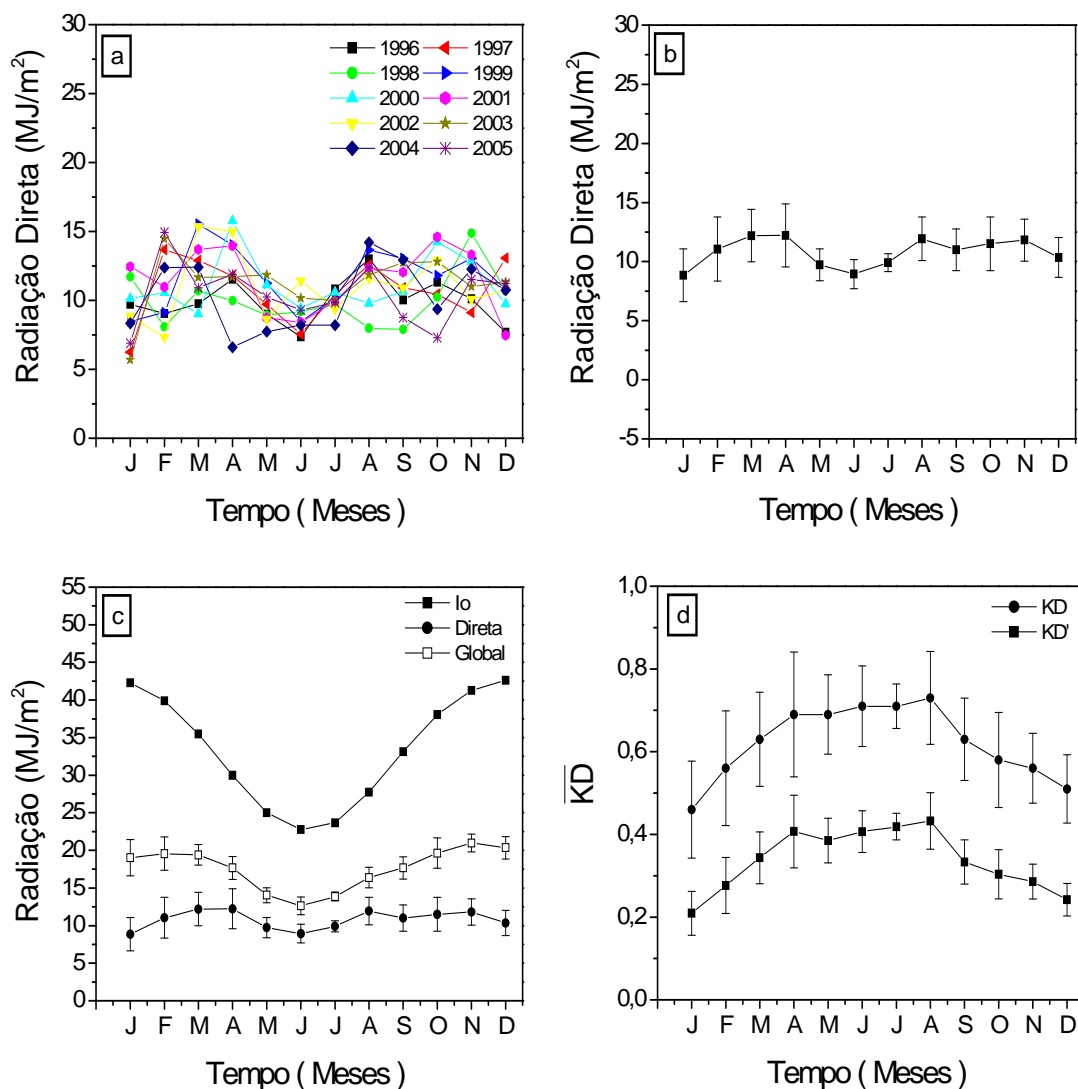


Figura 19 – a) Radiación Direta de 1996 à 2005 b) Radiación Direta c) Radiación no Topo da Atmosfera, Radiación Direta e Radiación Global d) Índices Radiométricos $\overline{K_D}$ e $\overline{K_D}'$

Os desvios percentuais variaram de 2,7% em janeiro até 0,7% em julho e expressam a variabilidade dos efeitos climáticos da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atenuação por absorção e espalhamento da radiação direta na atmosfera, diminuindo seus valores na superfície terrestre. Os desvios relativos dos valores médios entre os anos foram maiores nos meses em que apresentam maiores concentrações de nebulosidade e vapor d'água como janeiro, fevereiro, março e outubro, e foram menores nos meses mais secos, menos nebulosos e com concentração elevada de aerossóis como maio, junho, julho e agosto.

A evolução anual dos valores do índice de claridade atmosférica $\overline{K_D}$ médios mensais diários, calculada mensalmente pela equação: $\overline{K_D} = \overline{H_G^d} / \overline{H_D^d}$, mostrada na Tabela 9 com respectivos desvios relativos da média e na Figura 19 d), expressa a fração transmissão da radiação direta em relação a radiação global incidente na superfície terrestre em Botucatu.

Os valores de $\overline{K_D}$ variaram de 46,0% à 73,0% e os resultados confirmam a dependência da cobertura de céu na transmissão da radiação global, meses com maiores concentrações de nuvens e vapor d'água apresentam menores valores de $\overline{K_D}$, e meses com menores concentrações de nebulosidade e vapor d'água, possuem maiores valores de $\overline{K_D}$. No período chuvoso, o mês de janeiro com 46% foi o único mês que apresentou valor inferior a 50,0%, sendo que os demais meses do período úmido, apresentaram frações superiores a 50,0%: dezembro com 51,0%; fevereiro e novembro com 56,0%; outubro com 58,0% e março e setembro com 63,0%. No período seco e sem nuvens, o mês que apresentou a maior fração da radiação global foi agosto com 73%; os demais meses, junho e julho com 71,0% e abril e maio com 69,0%.

A evolução anual dos valores da fração $\overline{K_D}'$ médios mensais diários na superfície terrestre, calculada mensalmente pela equação: $\overline{K_D}' = \overline{H_D^d} / \overline{H_O^d}$, mostrada na Tabela 9 com respectivos desvios relativos da média e na Figura 19 d), expressa a fração transmissão da radiação direta em relação a radiação incidente no topo da atmosfera em Botucatu.

Os valores de $\overline{K_D}'$ variaram de 20,9% em janeiro à 43,3% em agosto, e os resultados confirmam a dependência da cobertura de céu na transmissão da radiação global, meses com maiores concentrações de nuvens e vapor d'água apresentam menores valores de $\overline{K_D}'$, e meses com menores concentrações de nebulosidade e vapor d'água, possuem maiores valores de $\overline{K_D}'$.

No período chuvoso, os valores de $\overline{K_D}'$ apresentaram valores inferiores à 34,3%, e no período seco e sem nuvens, como os meses de abril, maio, junho julho e agosto, os valores foram superiores a 38,5%. A fração $\overline{K_D}'$ média anual foi de 33,4%.

Utilizando-se de dados de radiação solar direta de outras localidades do mundo, encontrados na literatura estrangeira, pode-se fazer uma comparação com os dados de radiação direta em Botucatu.

Al-Mohamad (2004) analisou dados médios mensais diários de radiação solar direta para quatro localidades da Síria, país de clima com verões secos de maio a setembro, e invernos chuvosos de outubro a abril. As cidades foram escolhidas de acordo com as principais regiões do país: Hama (lat. 35.13° N e long. 36.75° L), Damascus (lat. 33.50° N e long. 36.28° L), Deir Al-Zor (lat. 35.33° N e long. 40.13° L) e Lattakia (lat. 35.51° N e long. 35.78° L). Os valores médios obtidos para a radiação direta nestas quatro localidades, variaram de 10,8 MJ/m² em Lattakia à 14,3 MJ/m² em Damascus, os valores mínimos variaram de 3,6 MJ/m² em Lattakia à 5,8 MJ/m² em Damascus, e os valores máximos variaram de 17,3 MJ/m² em Lattakia à 20,6 MJ/m² em Deir Al-Zor. Em comparação com Botucatu (lat. 22.85° S e long. 48.45°), o valor médio para a radiação direta foi de 11,3 MJ/m², o mínimo foi de 5,7 MJ/m² e o máximo foi de 14,5 MJ/m². A radiação solar direta em Botucatu (hemisfério sul) é mais elevada na primavera e verão, de outubro a março, em contraste com as localidades da Síria (hemisfério norte), que apresentam valores elevados de radiação solar direta nas estações de outono e inverno na Síria, nos meses de abril à setembro, quando o sol declina mais próximo da latitude local neste hemisfério. A figura 20 mostra a evolução das médias mensais diárias de radiação direta para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

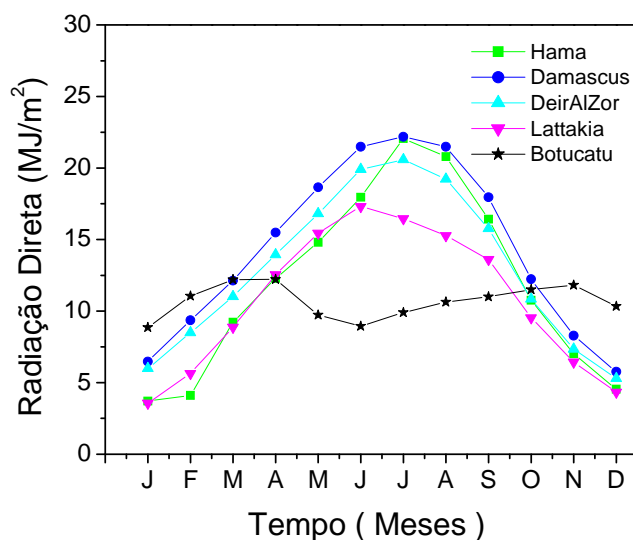


Figura 20 - Evolução das médias mensais diárias de radiação direta para as cidades de Hama, Damascus, Deir Al-Zor e Lattakia (Síria), e Botucatu (Brasil).

4.3 Séries Anuais das Radiações Global, Difusa e Direta Acumuladas Mensais.

Os valores das energias acumuladas por ano no período de 1996 a 2005 das radiações global, difusa e direta, estão apresentados nas Tabelas (7 a 9). As Figuras (21 a, b, c) mostram as evoluções anuais dos valores de energias acumuladas médias mensais das radiações global, difusa e direta, com os desvios relativos no período de 1996 a 2005. Os valores de energias médias acumuladas mensais em MJ/m^2 expressam a quantidade média de energia integrada ou totalizada das radiações global, difusa e direta, em cada mês do ano em Botucatu. As Figuras (21 d, e, f) mostram os valores de energias médias acumuladas mensais em kWh, unidade normalmente utilizada nos processos de conversão fotovoltaicos.

O valor das energias médias acumuladas da radiação global varia mês a mês, em função das variações diárias e do clima, similarmente as energias médias mensais analisadas na secção anterior. A radiação global acumulada variou de 378 MJ/m^2 em julho a 630 MJ/m^2 no mês de dezembro. Os meses de janeiro e fevereiro, meses mais chuvosos,

apresentaram valores de 590 MJ/m² e 567 MJ/m²; de março a junho a radiação global acumulada decresceu de 600 MJ/m² à 378 MJ/m² e de julho à dezembro a radiação global acumulada cresceu de 430 MJ/m² à 630 MJ/m². A energia média acumulada anual da radiação global foi de 6440,054 MJ/m².

As estações do ano com maior poder energético de radiação global foram na seqüência: primavera, verão, inverno e outono. O poder energético no verão diminui consideravelmente em relação à primavera, ambas estações com a declinação mais próxima da latitude local, porque o período chuvoso e nebuloso no verão, é mais acentuado que o da primavera. Já o poder energético do outono é menor que o do inverno, porque no outono as entradas das frentes frias aumentam a nebulosidade nos meses de maio e junho.

O desvio relativo da média mostra a variabilidade do valor médio das energias acumuladas mensalmente entre os anos, devido às variações climáticas de cada mês. Os desvios tendem a serem mais elevados nos meses com maiores nebulosidade e precipitação como são os casos de janeiro com 12,5% e fevereiro com 11,3%, e menos elevados nos meses com menores nebulosidade e precipitação como é o caso de maio com 7,1% e julho com 4,3%. Os desvios relativos observados em agosto e setembro, meses tipicamente característicos como seco e sem nebulosidade, ambos com 8,5% são elevados, isto ocorre devido à variabilidade das concentrações de aerossóis, durante as queimadas de cana de açúcar.

Os valores das energias acumuladas da radiação difusa, a exemplo das radiações global e direta, também variaram mensalmente em função das variações do clima. O valor médio acumulado decresceu de janeiro a junho, onde passou por um mínimo, e cresceu de julho a dezembro, onde atingiu o valor máximo. A radiação difusa acumulada variou de 110 MJ/m² em junho à 310 MJ/m² no mês de dezembro.

A evolução da radiação difusa acumulada acompanhou a evolução da nebulosidade (que só foi menor no mês de junho devido a entrada de frentes frias e fenômenos característicos do local) (Figura 3), apresentando os valores de energias mais elevadas nos meses mais nebulosos e menos elevadas nos meses com maior número de dias de céu claro. Os valores acumulados nos demais meses foram: janeiro com 300 MJ/m²; fevereiro com 247 MJ/m²; março com 224 MJ/m²; abril com 160 MJ/m²; maio com 134 MJ/m²; julho com 124 MJ/m²; agosto com 138 MJ/m²; setembro com 200 MJ/m²; outubro com 251 MJ/m²; novembro com 275 MJ/m². A energia média difusa acumulada anual foi de 2472,658 MJ/m².

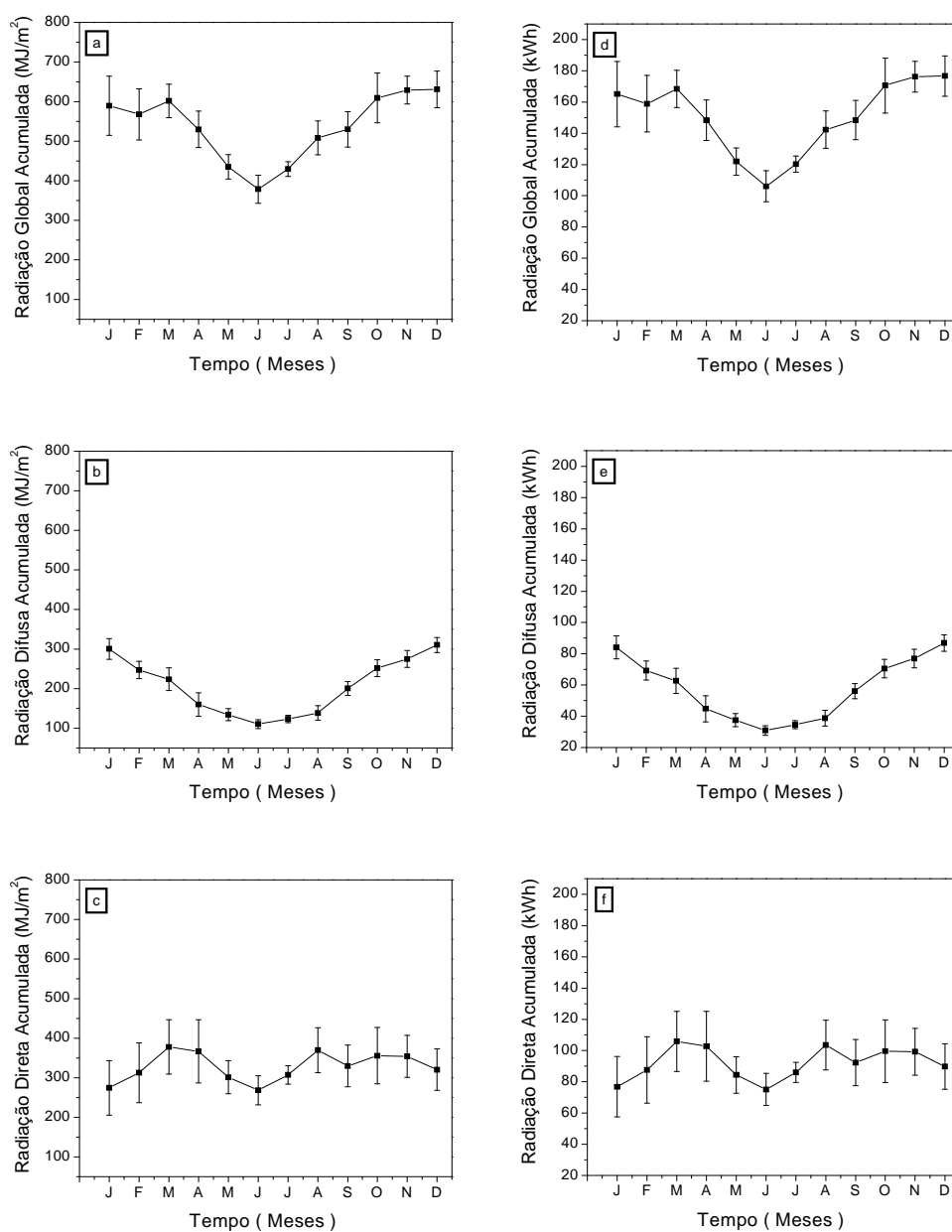


Figura 21 – Séries Anuais das Radiações Global, Difusa e Direta Acumulados Mensais em MJ/m² e kWh.

As estações do ano com maior poder energético de radiação difusa foram na seqüência: primavera, verão, inverno e outono. O poder energético no verão em torno de 771 MJ/m^2 é pouco inferior ao da primavera 836 MJ/m^2 . Já o poder energético acumulado do inverno 463 MJ/m^2 é maior que o do outono 404 MJ/m^2 .

O desvio relativo da média da radiação difusa é inferior e mostra que a variabilidade do valor médio das energias acumuladas entre os anos devido às variações climáticas de cada mês, é menor que o da radiação direta. Os desvios também foram mais elevados nos meses de março, abril, maio e junho com valores de 12,9%, 18,6%, 11,3% e 9,9% respectivamente, os quais marcam o final do verão e outono, épocas de muita variação de nebulosidade devido à entrada das frentes frias. Os desvios relativos observados nos demais meses foram aproximadamente iguais, entre o período característico seco e sem nuvens, do período úmido e nebuloso.

A dependência climática é muito evidente na evolução anual da radiação direta acumulada mensal, pois podem ser observados baixos valores médios tanto no período seco no qual o sol declina mais distante e a radiação é menor, como no período chuvoso no qual a energia da radiação é maior. A radiação direta na horizontal acumulada variou de 270 MJ/m^2 em junho, período seco, à 378 MJ/m^2 no mês de março, fim do período chuvoso. Nos demais meses, janeiro com valor de 275 MJ/m^2 e fevereiro com 312 MJ/m^2 foram os menos elevados do período chuvoso; maio e junho foram os menos elevados do período seco com 301 MJ/m^2 e 307 MJ/m^2 respectivamente; os meses de abril, agosto e setembro foram os mais elevados do período seco com 367 MJ/m^2 , 370 MJ/m^2 e 330 MJ/m^2 respectivamente. A energia média acumulada anual da radiação direta foi de $3938,955 \text{ MJ/m}^2$.

As estações do ano com maior poder energético de radiação direta foram na seqüência: primavera, inverno, outono e verão. O poder energético no verão diminui consideravelmente em relação à primavera, porque o período chuvoso e nebuloso no verão é mais elevado que o da primavera. Já o poder energético do inverno é maior que o do outono, porque no outono as entradas das frentes frias aumentam a nebulosidade nos meses de maio e junho, enquanto que, em julho, agosto e grande parte de setembro tem-se a maior freqüência de dias de céu aberto no ano.

O desvio relativo da média da radiação direta mostra que a variabilidade do valor médio das energias acumuladas entre os anos, devido às variações climáticas de cada mês, é maior que da radiação global. Os desvios também foram mais elevados nos meses com maiores nebulosidade e precipitação como é o caso de janeiro com 25,1% e fevereiro com 24,2%, e menos elevado nos meses com menor nebulosidade e precipitação como é o caso de julho com 7,5%. Os desvios relativos observados nos demais meses, característicos como seco e sem nebulosidade, foram menos elevados que os valores dos meses úmidos e nebulosos.

5 CONCLUSÕES

O monitoramento da radiação solar global e da radiação solar difusa em Botucatu é realizado desde 1996, e a radiação direta é obtida pela diferença entre a radiação global e a radiação difusa. As medidas são usadas para caracterizar a evolução sazonal diária e mensal dos valores da radiação global, difusa e direta, e os índices de transmissividade atmosférica.

Dos resultados discutidos sobre o efeito do clima nas variações das radiações global e direta conclui-se que:

I) A evolução anual dos valores médios mensais de radiação na superfície indica a existência de dois períodos sazonais bem definidos: (a) outono e inverno, período de abril à agosto, e (b) primavera e verão, período de setembro à março. Nos meses do período da seca, a partir de junho até novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar e das usinas que produzem açúcar e álcool, eventos que contribuem para a redução de valores de radiação global e direta na superfície de Botucatu, principalmente entre os meses de agosto e setembro. Nos meses do período das chuvas, de outubro a março, a atmosfera local apresenta elevada concentração de nebulosidade, precipitação e vapor d'água, que contribuem mais acentuadamente para a redução de valores de radiação global e direta na superfície, principalmente entre os meses de janeiro, fevereiro e dezembro.

Dos resultados discutidos sobre o efeito do clima nas variações da radiação difusa conclui-se que:

I) A partir de junho até novembro, no período da seca, a atmosfera local apresenta elevada concentração de aerossóis, o que contribui para o aumento de valores de radiação difusa na superfície de Botucatu, principalmente entre os meses de agosto e setembro. Nos meses chuvosos de outubro a março, principalmente nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de nebulosidade, precipitação e vapor d'água, que contribuem mais acentuadamente para o aumento de valores de radiação difusa na superfície.

Dos resultados discutidos sobre a evolução da energia média anual diária das radiações global, difusa e direta conclui-se que:

I) A evolução da energia média anual diária da radiação global apresentou poucas variações anualmente, variando de 16,72 MJ/m² no ano de 1998 à 18,32 MJ/m² no ano de 1999, confirmadas pelos desvios inferiores a 5%, e atenuadas pelos eventos climáticos característicos do local.

II) A evolução da energia média anual diária da radiação difusa também apresentou poucas variações ao longo dos 10 anos, com valores de 6,49 MJ/m² ano de 2002 à 7,04 MJ/m² no ano de 1996, e os desvios também foram inferiores a 5%, o que mostra que a variação é pequena entre os anos.

III) A evolução da energia média anual diária da radiação direta apresentou variações singulares, de 9,95 MJ/m² em 1996 à 9,95 MJ/m² em 1999, variações dependentes das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade e precipitação para cada ano.

Dos resultados discutidos sobre as séries temporais médias mensais diárias das radiações global, difusa e direta conclui-se que:

I) A série temporal média mensal diária da radiação global apresentou valores médios anuais de 17,60 MJ/m² ± 2,8 %. As energias médias, desvios relativos e valores de $\overline{K_t}$ foram menores quando o sol declina mais próximo da latitude local (hemisfério sul) durante as estações do verão e primavera, evidenciando que os efeitos do vapor d'água devido ao período chuvoso e da nebulosidade é mais acentuado na absorção e espalhamento da radiação global, e maiores quando o sol declina no hemisfério norte, mais distante da latitude local, durante as estações do outono e inverno.

II) A série temporal média mensal diária da radiação difusa apresentou valores médios anuais de $6,78 \text{ MJ/m}^2 \pm 2,3 \%$. Nas estações do verão e primavera as energias médias e desvios relativos são maiores e os valores de $\overline{K_d}$ e $\overline{K_d}'$ são maiores, período no qual a concentração de nuvens é elevada e a de aerossóis é baixa. Nas estações do outono e inverno, os valores da energia média e desvios relativos são menores e os valores de $\overline{K_d}$ e $\overline{K_d}'$ são menores, período onde a concentração de nuvens é pequena e de aerossóis é elevada.

III) A série temporal média mensal diária da radiação direta apresentou variações sazonais, alternando valores mais elevados em todas as estações do ano. Os valores médios anuais foram de $10,78 \text{ MJ/m}^2 \pm 1,2 \%$. Nos meses em que apresentam maiores concentrações de nebulosidade e vapor d'água os desvios relativos dos valores médios entre os anos foram maiores e os valores de $\overline{K_D}$ e $\overline{K_D}'$ foram menores. Nos meses mais secos, menos nebulosos e com concentração elevada de aerossóis, os desvios relativos dos valores médios entre os anos foram menores e os valores de $\overline{K_D}$ e $\overline{K_D}'$ foram maiores.

Dos resultados discutidos sobre as séries anuais dos acumulados mensais das radiações global, difusa e direta conclui-se que:

I) A série anual dos acumulados mensais da radiação global apresentou variações mês a mês em função das variações diárias e do clima (precipitação, insolação, nebulosidade, temperatura). O acumulado anual da radiação global foi de $6,4359 \text{ GJ/m}^2$. As estações do ano com maior poder energético de radiação global foram na seqüência: primavera, verão, inverno e outono. O poder energético no verão diminuiu consideravelmente em relação à primavera, porque o período chuvoso e nebuloso no verão, é mais acentuado que o da primavera. Já o poder energético do outono é menor que o do inverno, porque no outono as entradas das frentes frias aumentam a nebulosidade nos meses de maio e junho. Os desvios relativos foram mais elevados nos meses com maior nebulosidade e precipitação e menos elevados nos meses com menor nebulosidade e precipitação.

II) A série anual dos acumulados mensais da radiação difusa apresentou variações das energias acumuladas mensalmente em função das variações do clima. O acumulado anual da radiação difusa foi de $2,4784 \text{ GJ/m}^2$. Os valores de energias acumuladas

foram mais elevados nos meses mais nebulosos e menos elevados nos meses com maior número de dias de céu claro, acompanhando a evolução da nebulosidade. Os desvios relativos da média da radiação difusa foram menores que os desvios da radiação global e direta, devido às variações do clima mês a mês.

III) A série anual dos acumulados mensais da radiação direta apresentou grande variabilidade na evolução anual da radiação direta acumulada mensal demonstrando que a dependência climática é evidente, pois podem ser observados baixos valores médios tanto no período seco no qual o sol declina mais distante e a radiação é menor, como no período chuvoso no qual a energia da radiação é maior. Os desvios relativos foram mais elevados nos meses com maiores nebulosidade e precipitação e menos elevado nos meses com menor nebulosidade e precipitação. O acumulado anual da radiação direta foi de 3,9453 GJ/m².

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-MOHAMAD, A. Global, direct and diffuse solar-radiation in Syria. **Applied Energy**, Damascus, Syria, v. 79, p.191-200, 2004.

ARAS, H.; BALLI, O.; HEPBASLI, A. Estimating the horizontal diffuse solar radiation over the Central Anatolia Region of Turkey. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 2240-2249, 2006.

ASSIS, J. P.; NETO, D. D.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N.; SPAROVEK, G.; TIMM, L. C. Ajuste de séries históricas de temperatura e radiação solar global diária às funções densidade de probabilidade normal e log-normal, em Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.12, n.1, p. 113-121, 2004.

BULUT, H. Typical solar radiation year for southeastern Anatolia. **Renewable Energy**, v. 29, p. 1477-1488, 2004.

CAMARGO, J. C.; SILVA, E. P.; APOLINÁRIO, F. R. Potencial fotovoltaico no uso rural para o Estado de São Paulo. In: Agrener - Encontro de Energia no Meio Rural, 2000, Campinas. Agrener, 2000.

CETESB. **Clima e Poluição do Ar no Estado de São Paulo**, 2001.

CODATO, G., OLIVEIRA, A. P., SOARES, J., ESCOBEDO, J. F., GOMES, E.N., PAI, A.D. Global and diffuse solar irradiances in urban e rural áreas in southeast Brazil. **Theor. Appl. Climatol**, v. 93, p. 57-73, 2008.

DAL PAI, Alexandre. Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. Botucatu- SP, 2005. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdades de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

DEHNE, K. Diffuse solar radiation measured by the shade ring method improved by a correction formula. Instruments and observing methods, Report n. 15, **World Meteorological Organization**, p. 263-267, 1984.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v. 7, p. 413-436, 1956.

FILHO, E. I. F., SÁ, M. M. F. Influência das variáveis do terreno na radiação solar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. INPE, 2007. p. 5751-5753.

HOVE, T., GÖTTSCHE, J. Mapping Global, Diffuse and beam solar radiation over Zimbabwe. **Renewable Energy**, Zimbabwe, v. 18, p. 535-556, 1999.

IBGE (2007). Cidades do Brasil. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>>. Acesso em 10 jan 2009.

ISLAM, M. D.; KUBO, I.; OHADI, M.; ALILI, A. A. Measurement of solar energy radiation in Abu Dhabi, UAE. **Applied Energy**, v. 86, p. 511-515, 2009.

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

KASTEN, F., DEHNE, K., BRETTSCHEIDER, W. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. **Solar radiation data**, série F, n. 2, p. 221-225, D. Redel, Dordrecht, 1983.

LIU, B. Y. H. e 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.

MARQUES, D. D.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. Estudo comparativo da radiação solar no Amapá: análise comparativa entre os municípios de Macapá, Pacuí e Oiapoque em 2007. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2008, São Paulo. CD-ROM.

MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 1994, Vigo, Espanha. **Anais do VII Congresso Ibérico de Energia Solar**, Vigo, 1994. v. 1, p. 47-52.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, Boston, v. 19, p. 698-708, 2002.

OĞULATA, R T.; OĞULATA, S. N. Solar radiation on Adana, Turkey. **Applied Energy**, v. 71, p. 351-358, 2002.

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

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

ROBINSON, H., STOCH, L. Sky radiation and measurements and corrections. **Journal of Applied Meteorology**, v. 3, p. 179-81, 1964.

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1203-1220, 2005.

STANHILL, G. Observations of shade-ring correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 111, p. 1125-30, 1985.

TORRES, F. T. P.; MARTINS, L. A. Fatores que influenciam na concentração do material particulado inalável na cidade de Juiz de Fora (MG). *Caminhos da Geografia*, 4 (16) 23 - 39, out/2005.

ULGEN, K.; HEPBASLI, A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p.149-156, 2009.