

# EVOLUÇÃO ANUAL DA IRRADIAÇÃO GLOBAL INCIDENTE EM SUPERFÍCIES INCLINADAS PARA O NORTE, EM BOTUCATU-SP

**Adilson Pacheco de Souza** – adilsonpacheco@ufmt.br

Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Sinop, MT

**Alexandre Dal Pai** – alexandredalpai@yahoo.com.br

Faculdade de Tecnologia, Departamento de Informática, Botucatu, SP

**João Francisco Escobedo** – escobedo@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Ciências Ambientais, Botucatu, SP

**Resumo.** Este trabalho analisou a evolução anual da irradiação global média mensal diária incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com face voltada ao Norte, em Botucatu, SP. Foram utilizados dados de irradiações globais nas superfícies inclinadas e horizontais de 04/1998 a 08/2001 para a inclinação de 22,85°; de 09/2001 a 02/2003 para 12,85° e de 01/2004 a 12/2007 para a inclinação de 32,85°. Os níveis de irradiação global nos planos inclinados foram inferiores no período de verão e superiores entre os equinócios, com tendência de aumento das diferenças com o incremento da inclinação. Os picos máximos médios mensais verificados nas inclinações foram de 22,04; 22,64 e 21,82 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, ocorridos em setembro, abril e agosto, enquanto que os picos mínimos foram de 16,08; 17,00 e 16,39 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> nos meses de maio, junho e janeiro para 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Nas superfícies horizontais foram verificados máximos e mínimos de 23,64 e 12,95 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, em novembro e junho. Os valores médios mensais dos índices de claridade foram superiores nas superfícies inclinadas nos meses de primavera e verão e inferiores nos meses de outono e inverno.

**Palavras-chave:** Radiação Solar, Transmissividade atmosférica, Séries temporais

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por informações sobre a utilização da radiação solar como fonte suplementar e alternativa de energia, requer um conhecimento mais completo da incidência diferenciada da radiação solar sobre superfícies inclinadas. Esses estudos podem permitir aplicações em projetos para sistemas de conversão energética, arquitetura, planejamento urbano, estudos agrônômicos e micrometeorológicos sobre circulação local, dentre outras. Todavia, qualquer aplicação que pretenda desenvolver algum tipo de uso da energia solar deve começar pelo estudo das variações ao longo do ano em uma dada região, e se possível, em diferentes condições de exposição por um período mínimo de um ano (Scolar et al., 2003).

A maioria das estações meteorológicas mede de forma rotineira apenas a radiação solar global em planos horizontais, enquanto que, medidas das componentes direta e difusa são escassas devido ao elevado custos dos métodos de medidas e instrumentos envolvidos. Entraves como a dificuldade de manutenção e obtenção de uma rede solarimétrica que permita gerar informações sobre radiações solares em toda extensão continental ainda são evidentes, visto que, os monitoramentos e medições são restritos às Universidades (Souza et al., 2005; Tiba et al., 2005; Codato et al., 2008; Escobedo et al., 2009) e realizados com apenas uma ou duas das partições da radiação solar, inviabilizando assim o estudo variacional das radiações, até mesmo para uma única região.

Em Botucatu/SP (latitude 22°51' Sul, longitude 48°26' Oeste, altitude 786m) o Laboratório de Radiometria Solar da FCA/UNESP monitora a radiação global em superfícies inclinadas desde abril de 1998. Todavia, a base de dados existente não apresenta medidas concomitantes em diferentes ângulos de inclinação. No entanto é suficiente, em função do número de dados diários obtidos em cada inclinação, para geração de séries temporais mais curtas, que possibilitam indicar as tendências ao longo do ano.

A transmissividade atmosférica, ou índice de claridade  $\langle K_T \rangle$ , dada pela razão entre a irradiação global pela irradiação no topo da atmosfera, são obtidos normalmente em superfícies horizontais. Representa a quantidade de irradiação efetiva que chega à superfície terrestre em relação à quantidade disponível no topo da atmosfera, eliminando os efeitos das variações astronômicas e geográficas que afetam a sazonalidade da radiação global. Porém, o emprego de frações não permite a eliminação dos efeitos climáticos nos níveis de radiação global incidentes na superfície.

Considerando a necessidade do conhecimento da irradiação global diária incidente em superfícies inclinadas, para muitas áreas de pesquisa em atividade e desenvolvimento no Brasil, o presente trabalho objetiva: 1) elaborar a evolução anual dos níveis de irradiação global, incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face voltada para o Norte, comparando com as evoluções anuais em superfícies horizontais; e 2) analisar a evolução das frações  $\langle K_T \rangle$  diárias para superfícies inclinadas e horizontais;

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A base de dados da irradiação global diária empregada foi obtida nos anos de 1998 a 2007. As medidas nas superfícies inclinadas não ocorreram concomitantemente, sendo discretizadas nos seguintes períodos para cada inclinação: na inclinação de 12,45° (L-10) as medidas ocorreram entre 09/2001 e 02/2003; na inclinação de 22,85° (L) entre 04/1998 e 08/2001 e na inclinação de 32,45° (L+10) as medidas foram realizadas entre 01/2004 e 12/2007. Em cada período foram realizadas as medidas da radiação global na horizontal, permitindo assim, comparar o efeito da inclinação da superfície por meio de médias mensais diárias.

As medidas instantâneas (irradiâncias) da radiação global no plano horizontal ( $I_{GH}$ ) foram obtidas com auxílio de um piranômetro EPPLEY-PSP, com fator de calibração de  $7,45\mu V/Wm^{-2}$  e linearidade de  $\pm 0,5\%$  (0 a  $2800 W/m^2$ ). Para a irradiância global inclinada ( $I_{G\beta}$ ), o piranômetro foi posicionado paralelamente sobre os planos inclinados, com a face voltada para o Norte. Posteriormente, essas medidas foram integradas para obtenção de valores diários. As irradiações incidentes no topo da atmosfera para superfície horizontal  $\langle H_{OH}^d \rangle$  e inclinada  $\langle H_{O\beta}^d \rangle$  foram estimadas segundo IQBAL (1983). Foram obtidos os índices de claridade horizontal e inclinado com base nas razões entre a irradiação global e a irradiação no topo da atmosfera para cada plano, como segue:  $\langle K_{TH}^d \rangle = \langle H_{GH}^d \rangle / \langle H_{OH}^d \rangle$  e  $\langle K_{TB}^d \rangle = \langle H_{G\beta}^d \rangle / \langle H_{O\beta}^d \rangle$ .

Segundo a classificação de Köppen, o clima do município de Botucatu (SP) é do tipo Cwa, caracterizado como temperado quente, com chuvas no verão e inverno seco (Cepagri, 2012). Pela normal climatológica do município, os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, com temperaturas médias de  $23,20^\circ C$  e  $17,10^\circ C$ , enquanto que, fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,4% e 63,22%, respectivamente. As variáveis climáticas que estão relacionadas com as variações dos níveis das radiações nos diferentes períodos de medidas são apresentadas na Fig. 2. As maiores precipitações ocorrem no mês de janeiro (321,2 mm) e as mínimas em agosto com (38,2 mm). Todavia, no período de realização desse estudo (1998 a 2005), não foi observada essa tendência das precipitações, com somas mensais médias de  $329,7 \pm 74,8$  e  $38,7 \pm 32,8$  mm, como máxima e mínima, nos meses de janeiro e junho, respectivamente (Fig. 2c). A razão de nebulosidade refere-se à fração do dia, em que o céu ficou encoberto. A sua evolução infere que entre 1998 e 2005 verificou-se os valores mais elevados nos meses de janeiro (0,63), dezembro (0,55), fevereiro (0,49), novembro (0,48) e outubro (0,46), e os menores em abril (0,33), maio (0,33), julho (0,34), agosto (0,26) e setembro (0,39). Os maiores desvios são verificados nos meses de abril, maio e junho, sendo influenciados por conta das entradas das frentes frias vindas do sul do país, que trazem grandes quantidades de massas de ar frio, a partir da metade do outono. Meses com desvios pequenos indicam uma maior homogeneidade das condições atmosféricas ao longo dos dias.

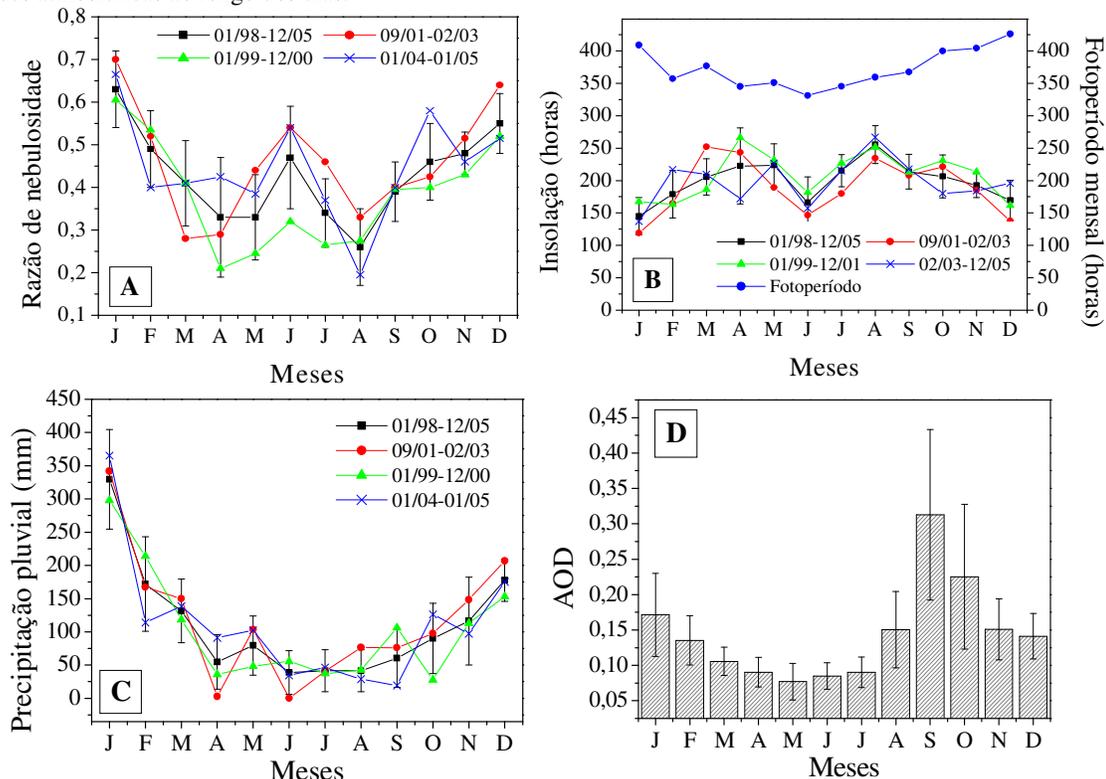


Figura 1 - Séries da razão de nebulosidade (A), insolação e fotoperíodo (B), precipitação (C) e aerossóis (D), em Botucatu-SP, para diferentes períodos de medidas.

Na média entre os anos de 1998 e 2005, os meses que apresentaram a maior e a menor insolação foram agosto e janeiro, totalizando respectivamente, 255,70 e 144,83 horas. Por conseguinte, o fotoperíodo cujo comportamento foi apresentado na Fig. 2b, apresentou valores máximos acumulados na região no mês de dezembro (412,88 horas) e o mínimo no mês de junho (320,45 horas). Nos períodos em que foram realizadas as medidas nas diferentes inclinações, como representado nas Fig. 2a-c, as evoluções anuais das variáveis climáticas permaneceram em grande parte dos meses dentro dos desvios da média geral do período, indicando que os possíveis efeitos nos níveis da irradiação global nos planos inclinados podem ser oriundos do efeito do ângulo de inclinação da superfície. Botucatu apresenta 4% de sua área territorial (1483 km<sup>2</sup>) ocupado por cana de açúcar, com rendimento aproximado de 420.000 toneladas de cana por ano. Porém, em sua circunvizinhança, em torno de 70 cidades são responsáveis por um rendimento aproximado de 36 milhões de toneladas de cana por ano. A evolução anual das médias mensais diárias da densidade óptica padrão (Fig. 2d), mostra 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= 0,31, equivalente a concentração de PM<sub>10</sub> de 70,00 µg cm<sup>-3</sup> (Codato et al., 2008). Em outubro a dezembro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, até atingir valores de AOD = 0,14 ou 20,00 µg cm<sup>-3</sup>. De janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir o menor nível de concentração AOD no mês de maio (0,08).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Evolução anual da irradiação global

Na Tab. 1 são mostradas as médias mensais das energias recebidas nas superfícies inclinadas e na horizontal (correspondente ao mesmo período de medidas). De uma maneira geral, a radiação incidente na superfície terrestre apresentou comportamento semelhante ao verificado no topo da atmosfera.

A energia global recebida pelo plano inclinado a 12,85° foi inferior ao plano horizontal entre novembro e fevereiro, com maiores diferenças em dezembro (0,77 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), enquanto que, os ganhos efetivos foram observados entre os equinócios (com destaque para junho de 3,44 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>). Para essas duas superfícies, os menores valores médios de irradiação global foram verificados no mês de maio, provavelmente em função da grande entrada de frentes frias na região de Botucatu, justificados pelo aumento da razão de nebulosidade (Fig. 1). As irradiações no topo da atmosfera para as duas superfícies apresentam seus picos mínimos coincidentes no mês de junho, todavia, foram registrados maiores valores de energia global incidente quando comparado com os meses de maio e agosto. Em junho, foram verificados valores médios superiores ao mês de maio em torno de 0,82; 0,37 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e de agosto em 1,85 e 0,79 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para as superfícies horizontal e inclinada, respectivamente.

A energia global recebida pelo plano inclinado a 22,85° (inclinação igual a latitude local) apresentou pouca variação ao longo do ano, em torno de 5,64 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> entre o pico máximo (abril) e o pico mínimo (junho). Nessa inclinação, os níveis energéticos globais são inferiores aos verificados para a condição horizontal nos meses de primavera e verão e superiores nos meses outono e inverno, sendo obtidos ganhos de energia global nos meses de maio, junho e julho superiores a 4,06 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> quando comparada com a superfície horizontal. Os valores de  $\langle H_{GB}^d \rangle$  na inclinação de 22,85°, dos meses de janeiro e fevereiro (17,53 e 18,75 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>) são semelhantes aos verificados em junho, julho e agosto que apresentaram variações de 17,00 a 18,87 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Já na superfície horizontal, semelhanças foram verificadas entre os meses de janeiro e fevereiro, com os meses de abril e setembro, cujos valores foram de 19,47; 19,58; 19,47; e 19,16 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Os valores observados para essas duas superfícies (horizontal e 22,85°) acompanharam os efeitos da sazonalidade verificada para a irradiação no topo da atmosfera, com influência das variáveis climáticas, principalmente no período do verão. No ano de 2000, no mês de abril foram verificadas reduções de 42,7 mm no regime pluviométrico médio entre 1999 e 2005 (Fig. 1), conjuntamente com a antecipação da entrada de frentes frias na região nos anos de 1999 e 2000, justificando assim essa variação com relação aos níveis de  $\langle H_{GH}^d \rangle$  e  $\langle H_{GB}^d \rangle$  em abril.

A energia global recebida pela superfície inclinada a 32,85°, também apresentou pouca variação ao longo do ano, com picos máximo (agosto) e mínimo (dezembro) médios de 21,82 e 14,38 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Entre os meses de fevereiro e julho, os valores de  $\langle H_{GB}^d \rangle$  se mantiveram praticamente constantes, oscilando entre 19,53 e 18,75 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> ou variação de 5,79%. Ainda, na inclinação de 32,85°, os níveis energéticos apresentaram a tendência de serem inferiores nos meses de primavera e verão e superiores nos meses outono e inverno, quando comparados com a superfície horizontal. Na superfície horizontal (nesse período de medidas), nos meses de novembro, dezembro e fevereiro os valores de  $\langle H_{GH}^d \rangle$  médios mensais foram superiores a 21,60 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Já nos meses de maio, junho e julho os níveis de  $\langle H_{GH}^d \rangle$  médios mensais foram inferiores a MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. No mês de outubro de 2004 e 2005 ocorreram nebulosidades e precipitações pluviométricas superiores às médias verificadas entre 1999 a 2005, reduzindo assim a tendência dos níveis de irradiação global para as duas superfícies (horizontal e 32,85°).

Os desvios diários acompanharam a tendência das superfícies inclinadas apresentarem valores superiores de irradiação global quando comparadas com as superfícies horizontais, durante o outono e o inverno e inferiores a partir

de meados da primavera e no verão (Fig. 2). Notadamente, ocorreu um aumento dos desvios médios mensais com o incremento da inclinação, todavia, esse comportamento é normal, visto que a disponibilidade de energia no topo da atmosfera também sofre variações sazonais semelhantes com a mudança da inclinação.

Tabela 1. Evolução anual das médias mensais diárias das irradiações global e do topo da atmosfera para a horizontal e para superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face para o Norte, em Botucatu, SP.

MESES	Radiação no topo da atmosfera inclinada	Radiação global inclinada	Radiação no topo da atmosfera horizontal	Radiação global horizontal
	12,85° (L-10)		HORIZONTAL	
Jan	39,65 ± 0,09	18,40 ± 5,63	42,28 ± 0,29	18,91 ± 5,92
Fev	39,74 ± 0,09	19,00 ± 6,79	40,59 ± 0,71	19,24 ± 6,96
Mar	38,72 ± 0,56	21,54 ± 5,21	37,09 ± 1,35	21,11 ± 5,13
Abr	36,09 ± 0,94	21,27 ± 2,15	32,04 ± 1,54	19,29 ± 2,03
Mai	32,89 ± 0,86	16,08 ± 5,14	27,23 ± 1,19	13,67 ± 3,98
Jun	31,05 ± 0,21	17,93 ± 1,28	24,74 ± 0,27	14,49 ± 0,89
Jul	31,77 ± 0,60	17,14 ± 4,48	25,70 ± 0,81	14,12 ± 3,42
Ago	34,63 ± 1,00	18,00 ± 5,58	29,74 ± 1,50	15,65 ± 4,67
Set	37,73 ± 0,75	19,49 ± 5,65	34,96 ± 1,47	18,14 ± 5,09
Out	39,48 ± 0,27	22,04 ± 4,83	39,32 ± 1,03	21,77 ± 4,85
Nov	39,74 ± 0,06	20,67 ± 5,36	41,80 ± 0,45	21,09 ± 5,54
Dez	39,51 ± 0,04	20,06 ± 6,15	42,65 ± 0,08	20,83 ± 6,60
	22,85° (L)		HORIZONTAL	
Jan	36,32 ± 0,37	17,53 ± 5,76	42,28 ± 0,29	19,47 ± 6,47
Fev	37,79 ± 0,43	18,76 ± 5,82	40,59 ± 0,71	19,59 ± 6,07
Mar	38,80 ± 0,13	21,02 ± 4,92	37,09 ± 1,35	20,26 ± 4,59
Abr	38,25 ± 0,41	22,64 ± 4,99	32,04 ± 1,54	19,47 ± 3,92
Mai	36,49 ± 0,54	19,88 ± 4,48	27,23 ± 1,19	15,79 ± 2,99
Jun	35,27 ± 0,14	17,00 ± 5,41	24,74 ± 0,27	12,94 ± 3,56
Jul	35,81 ± 0,42	18,47 ± 5,56	25,70 ± 0,81	14,33 ± 3,75
Ago	37,58 ± 0,54	18,87 ± 4,98	29,74 ± 1,50	16,87 ± 4,10
Set	38,77 ± 0,19	20,48 ± 6,17	34,97 ± 1,47	19,16 ± 5,63
Out	38,32 ± 0,37	20,97 ± 5,97	39,32 ± 1,02	21,40 ± 5,98
Nov	36,81 ± 0,45	21,44 ± 4,72	41,81 ± 0,44	23,64 ± 5,43
Dez	35,80 ± 0,12	19,41 ± 4,59	42,65 ± 0,08	21,98 ± 5,54
	32,85° (L+10)		HORIZONTAL	
Jan	32,05 ± 0,62	16,39 ± 4,51	42,28 ± 0,29	19,65 ± 5,88
Fev	34,77 ± 0,89	19,54 ± 4,76	40,59 ± 0,72	21,82 ± 5,40
Mar	37,73 ± 0,77	19,61 ± 5,07	37,09 ± 1,35	19,32 ± 4,59
Abr	39,30 ± 0,16	19,43 ± 4,20	32,04 ± 1,53	16,79 ± 3,08
Mai	39,03 ± 0,23	18,49 ± 5,63	27,22 ± 1,19	14,14 ± 3,54
Jun	38,43 ± 0,08	18,48 ± 4,91	24,73 ± 0,26	13,27 ± 2,78
Jul	38,72 ± 0,21	18,75 ± 6,59	25,70 ± 0,82	13,89 ± 4,10
Ago	39,34 ± 0,09	21,82 ± 4,45	29,97 ± 1,50	17,31 ± 2,99
Set	38,63 ± 0,52	20,03 ± 4,91	34,98 ± 1,46	18,54 ± 4,14
Out	36,01 ± 0,95	17,15 ± 4,98	39,32 ± 1,02	18,33 ± 5,12
Nov	32,91 ± 0,79	18,14 ± 4,67	41,81 ± 0,44	21,60 ± 5,97
Dez	31,20 ± 0,19	17,67 ± 3,98	42,65 ± 0,08	21,96 ± 5,60

Para a superfície inclinada a 12,85° os ganhos máximos de  $\langle H_{GB}^d \rangle$  estão em torno de 19,2%, enquanto que as perdas máximas estão por volta de -3,8% (Fig. 2a). Em valores energéticos, os valores máximos representam 4,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (obtidos no inverno) e os valores mínimos -2,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> (encontrados no verão). Na superfície inclinada a 22,85° (Fig 4b), os valores percentuais máximos (23,91%) e os mínimos (-13,05%), também ocorreram no inverno e verão, que por sua vez, permitiram diferenças entre  $\langle H_{GB}^d \rangle$  e  $\langle H_{GH}^d \rangle$  máximas em torno de 6,5 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> e mínimas de -4,5 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>.

Já para o plano inclinado a 32,85° (Fig. 2c), foram verificados valores percentuais máximos de ganhos equivalentes a 28,2% (junho) e mínimos de -24,3% (dezembro), seguindo a mesma tendência dos desvios verificados para as demais superfícies inclinadas. Entretanto, no mês de março, que compreende os dias próximos ao equinócio de outono, os desvios entre o plano inclinado e horizontal ficam em torno de 1,47%. Enquanto que, na inclinação de 22,85° os menores desvios relativos foram encontrados nos dias posteriores ao equinócio de primavera (-2,05%). Em valores absolutos, as variações ficaram em torno de 7,0 e 6,0 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> para os solstícios de inverno e verão.

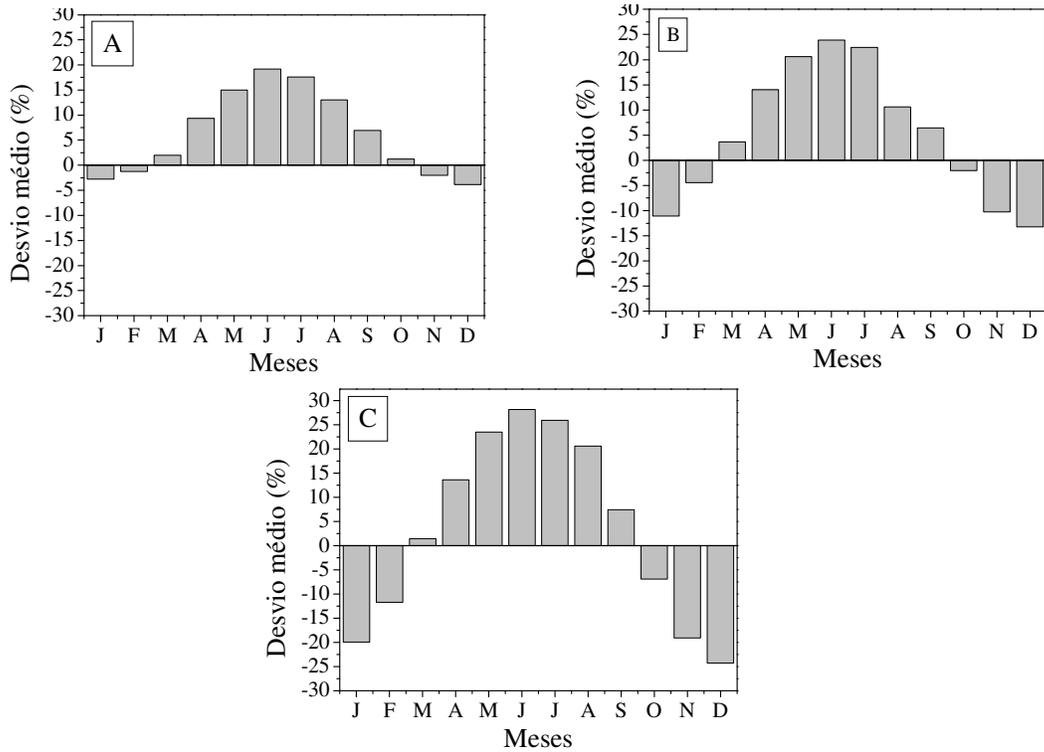


Figura 2 - Evolução anual dos desvios médios mensais das irradiações globais, usando as superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c) como referência em relação à superfícies horizontais, para as mesmas épocas de medidas.

Resguardadas as variações climáticas ocorridas nos períodos de medidas para cada uma das respectivas inclinações, observa-se que as razões entre os níveis de  $\langle H_{GB}^d \rangle$  e  $\langle H_{GH}^d \rangle$  permitem minimizar os efeitos das condições astronômicas e geográficas nos níveis de irradiação global para todas as superfícies (Fig. 3). Não existe uma simetria entre as curvas médias mensais das razões supracitadas, visto que para as três inclinações os valores nos meses de março e setembro (equinócios de outono e primavera) são diferentes (em março as razões foram de 1,02; 1,04 e 1,02 e em setembro de 1,08; 1,07; 1,08, para as inclinações iguais a 12,85; 22,85 e 32,85°, respectivamente). Essa ausência de simetria está relacionada com o aumento significativo das partículas em suspensão na atmosfera local, expressos na forma de densidade óptica padrão (AOD), cujo valor máximo é verificado em setembro  $0,31 \pm 0,12$  (Fig. 1d). A disponibilidade energética no topo da atmosfera é similar em março e setembro para superfícies inclinadas e horizontais, contudo, a maior concentração de aerossóis permite ao mês de setembro níveis energéticos globais superiores aos verificados em março, em função do aumento da componente difusa.

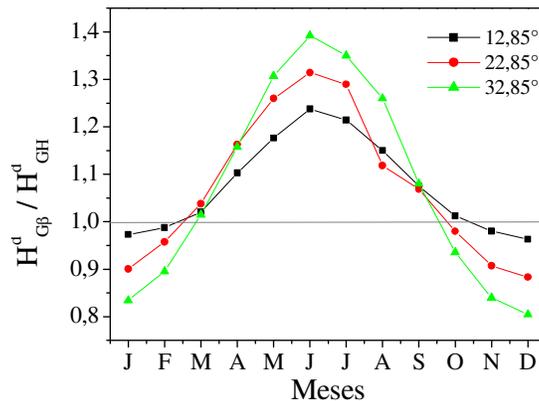


Figura 3 - Razões médias mensais entre a irradiação global inclinada e a irradiação global horizontal.

A evolução média mensal da irradiação global diária nas diferentes inclinações permite a elaboração de um plano para aplicação de ângulos de inclinação em superfícies coletoras (Tab. 2) que objetive aproveitar o máximo dos níveis energéticos disponíveis em cada mês na região de Botucatu – SP. Normalmente é recomendado que os coletores solares sejam inclinados com ângulos iguais à latitude local por permitirem boas eficiências de conversão ao longo do ano (Oladiran, 1995; Yahkup & Malik, 2001; Li & Lam, 2007; Michel set al., 2009). Sem modificações nos ângulos de inclinação dos coletores ao longo do ano, os totais anuais de irradiação global verificados são maiores para a inclinação

de  $22,85^\circ$  ( $7193,24 \text{ MJ m}^{-2}$ ), corroborando com o recomendado. Contudo, com a possibilidade de modificar a intensidade de inclinação ao longo do ano aumenta-se o ganho de irradiação global disponível em torno de  $324,92 \text{ MJ m}^{-2}$  (4,74%) quando comparado com a inclinação recomendada (latitude local). Ao longo do ano pode ser observada uma variação na quantidade de energia global disponível de  $169,26 \text{ MJ m}^{-2}$  para a inclinação de  $22,85^\circ$ , cujos valores acumulados máximos e mínimos mensais seriam obtidos em abril ( $679,26 \text{ MJ m}^{-2}$ ) e junho ( $510 \text{ MJ m}^{-2}$ ).

Por conseguinte, com a modificação da intensidade de inclinação ao longo dos meses, poderiam ser alcançados ganhos anuais nos níveis de energia global incidentes de  $473,95 \text{ MJ m}^{-2}$ ;  $663,16 \text{ MJ m}^{-2}$ ; e  $1017,29 \text{ MJ m}^{-2}$  em relação aos totais anuais verificados nas superfícies inclinadas a  $12,85^\circ$ ;  $32,85^\circ$  e para a superfície horizontal, respectivamente. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Oladiran (1995), que sugeriu inclinações iguais a L-10 e L+10 para coletores dependendo da estação do ano, para o Hemisfério Norte.

Tabela 2. Disponibilidade total mensal de irradiação global ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) em ângulos de inclinação da superfície.

Mês	Horizontal	$12,85^\circ$	$22,85^\circ$	$32,85^\circ$	Ângulo de Inclinação	Valores otimizados
Jan	582,20	570,46	543,44	508,02	horizontal	582,20
Fev	563,94	532,04	525,22	546,99	horizontal	563,94
Mar	606,00	667,70	651,76	608,00	$12,85^\circ$	667,70
Abr	526,28	638,10	679,26	582,90	$22,85^\circ$	679,26
Mai	442,90	498,44	616,36	573,15	$22,85^\circ$	616,36
Jun	395,68	537,81	510,00	554,31	$32,85^\circ$	554,31
Jul	423,83	531,40	572,70	581,24	$32,85^\circ$	581,24
Ago	505,25	558,10	585,07	676,27	$32,85^\circ$	676,27
Set	541,73	584,74	614,34	600,77	$22,85^\circ$	614,34
Out	618,14	683,23	650,07	531,62	$12,85^\circ$	683,23
Nov	638,89	620,21	643,28	544,08	$22,85^\circ$	643,28
Dez	656,03	621,98	601,74	547,63	horizontal	656,03
Total	6500,87	7044,21	7193,24	6854,99	-	7518,16

### 3.2. Evolução anual do índice de claridade

Independentemente do período de avaliação e da inclinação, os maiores valores dos coeficientes de transmissividade atmosférica  $\langle K_{TH}^d \rangle$  foram verificados no mês de abril (média geral de 0,595), com exceção apenas da inclinação de  $32,85^\circ$  (Fig. 4) que apresentou os maiores valores de  $\langle K_{TP}^d \rangle$  no mês de novembro (0,645). Essa tendência reflete claramente a diminuição da nebulosidade e das precipitações pluviométricas na região, permitindo que se tenha um maior número de dias com céu limpo durante o mês de abril. Por conseguinte, entre os equinócios as superfícies horizontais apresentaram valores de  $\langle K_{TH}^d \rangle$  superiores aos planos inclinados, pois, mesmo com o aumento dos níveis de  $\langle H_{GP}^d \rangle$  os incrementos de  $\langle H_{OB}^d \rangle$  diminuem as frações radiométricas.

Nos meses de verão os valores de  $\langle K_{TP}^d \rangle$  em  $12,85^\circ$  foram inferiores aos das demais inclinações, como em janeiro, com observações de 46,4; 48,8 e 54,5% de transmissividade da radiação global para L-10, L e L+10, respectivamente. Na inclinação de  $32,85^\circ$ , foram verificados níveis de irradiação global incidentes na superfície acima de 50% dos níveis esperados no topo da atmosfera, com exceção dos meses de junho e julho (inverno), ou seja, nessa inclinação são verificadas menores atenuações da irradiação na atmosfera ao longo do ano. Nas demais superfícies essas tendências são verificadas nos meses de janeiro e fevereiro, com índices de claridade acima de 0,46.

Nesse sentido, foram estabelecidos valores médios do índice de claridade em cada estação do ano para cada inclinação: verão – 0,480; 0,486; 0,509 e 0,564; outono – 0,575; 0,555; 0,561 e 0,545; inverno – 0,548; 0,545; 0,504 e 0,474; e na primavera – 0,538; 0,532; 0,553; e 0,573, para as superfícies horizontal e inclinadas a  $12,85^\circ$ ,  $22,85^\circ$  e  $32,85^\circ$ , respectivamente. Assim, durante o verão e a primavera são observadas tendências de aumento da transmissividade atmosférica com o incremento das inclinações.

Segundo Escobedo et al. (2009) a análise variacional das irradiações global, direta e difusa horizontal plotadas em função dos coeficientes de transmissividade permite adotar a seguinte classificação de cobertura de céu para a partição diária: i)  $(K_T) \leq 0,35$ : a irradiação direta é praticamente nula, sendo a irradiação global igual a irradiação difusa; ii)  $0,35 \leq (K_T) \leq 0,55$ : a irradiação global é composta principalmente pela fração difusa (que decresce acima desse intervalo) e em menor escala pela irradiação direta (crescente a partir desse intervalo). iii)  $0,55 \leq (K_T) \leq 0,65$ : é o inverso do segundo intervalo, sendo que a irradiação difusa diminui gradativamente nesse intervalo; iv)  $(K_T) > 0,65$ : a irradiação global possui a maior parcela composta pela irradiação direta e mínima difusa, portanto, a cobertura do céu é considerada aberta. Para valores de  $(K_T)$  acima de 0,80 não ocorre uma seqüência lógica de evolução das três irradiações em função da transmissividade atmosférica e por essa razão foram eliminados.

A Fig. 5 apresenta a frequência de dias em função do índice de claridade para as diferentes superfícies estudadas. Nessa análise foram considerados 544 dias (a), 731 dias (b) e 731 dias (c), correspondentes aos períodos de 09/2001 a

02/2003 (na inclinação de 12,85°), 01/1999 a 12/2000 (para a inclinação de 22,85°) e 01/2004 a 12/2005 (para a inclinação de 32,85°). Existem diferenças entre as freqüências de dias para as diferentes coberturas de céu para a superfície horizontal, traduzidas conseqüentemente pelos efeitos das mudanças do clima nos períodos de medidas.

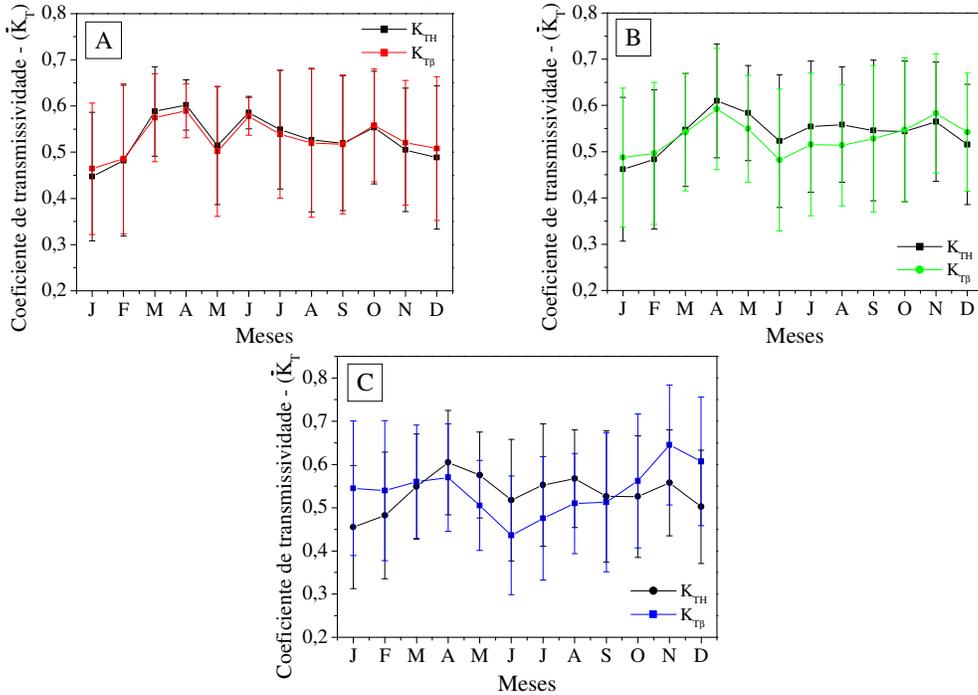


Figura 4 – Coeficientes de transmissividade atmosférica da irradiação global médios mensais para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Foram encontrados para as superfícies horizontais nos três períodos supracitados os seguintes valores: 74, 86 e 85 dias com céu nublado (I); 206, 209 e 230 dias com céu parcialmente nublado com predominância difusa (II); 203, 253 e 261 dias com céu parcialmente nublado com predominância direta (III); 61, 183 e 155 dias com céu aberto (IV). Considerando que as classes I e II são de céu tendem a céu nublado e as classes II e IV tendem a céu aberto, obtêm-se em valores percentuais 51,47%, 40,36% e 43,09% dos dias tendem a céu nublado para os períodos de medidas em L-10°, L e L+10° e 48,53%; 59,64% e 56,91% dos dias tendem a céu aberto nos respectivos períodos de medidas. Isso indica que Botucatu (SP) apresenta ao longo do ano, um número maior de dias com céu aberto, ou seja, na maioria dos dias a transmissividade atmosférica local é superior a 50% (Teramoto, 2010).

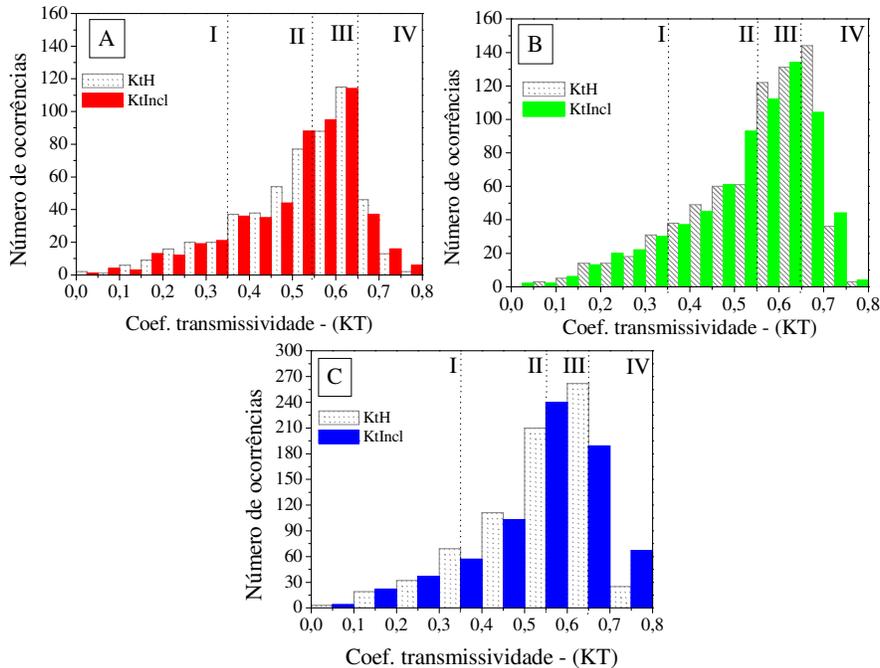


Figura 5 - Freqüência de distribuição diária dos valores de índice de claridade para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Na inclinação de 12,85°, a distribuição da frequência dos dias nas quatro classes é similar ao da horizontal, com 73, 203, 209 e 59 dias para as classes I, II, III e IV, respectivamente. Para a inclinação de 22,85°, são verificados aumentos de 10 dias com céu nublado e 28 dias com céu parcialmente nublado difuso, e reduções de 7 dias com céu parcialmente nublado direto e de 31 dias com aberto. Já na inclinação de 32,85°, ocorreu uma inversão da tendência encontrada em 22,85°, as reduções foram de 5 e 21 dias para as classes I e II e aumentos de 19 e 7 dias para as classes III e IV.

Essa tendência é decorrente da interação dos raios solares com as condições cobertura de céu das regiões circunvizinhas, visto que, ocorre uma mudança na exposição da superfície que predispõe uma maior interceptação de raios solares oriundos da direção Norte em face da diminuição do plano de horizonte para as superfícies inclinadas. Esse comportamento também permite que nas inclinações sejam verificados maiores níveis de irradiação difusa no solstício de inverno (Hemisfério Sul), pois os raios solares interagem com uma massa ótica maior devido a declinação no norte. Essa informação é pertinente, devido ao fato que muitos modelos de estimativa, relacionam outras frações da irradiação solar com o índice de claridade, em cada uma dessas condições de céu.

#### 4. CONCLUSÕES

As superfícies inclinadas com a face voltada para o Norte recebem uma quantidade maior de irradiação global do que a superfície horizontal durante os meses do inverno e outono, com ganhos em torno de 23,75%, 31,42% e 39,24% e uma quantidade menor de irradiação global durante a primavera e verão, com perdas em 3,69%, 11,70% e 19,55% para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°. Os coeficientes de transmissividade atmosférica apresentam comportamento inverso ao da radiação global, com maiores percentuais no verão para os planos inclinados e as suas distribuições em diferentes classes de cobertura de céu são inferiores aos verificados para horizontal.

#### REFERÊNCIAS

- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Pai, A. D., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil, *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 93, pp. 57-73.
- Escobedo, J. F., Gomes, E. N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 299-309.
- Iqbal, M. 1983. *An introduction to solar radiation*. Canadá: Academic Press, 390 p.
- Michels, R. N., Ricieiri, R. P., Gnoatto, E., Sousa, S. N. M., Silva, S. L., Fischborn, M., 2009. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos, *Engenharia Agrícola*, v.29, p.370-379.
- Oladiran, M. T., 1995. Mean global radiation captured by inclined collectors at various surface azimuth angles in Nigeria, *Applied Energy*, vol.52, pp.317-330.
- Scolar, J., Martins, D., Escobedo, J. F., 2003. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal, *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 21, pp. 249-258.
- Souza, J. L., Nicácio, R. M., Moura, M. A. L., 2005. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1203-1220.
- Tiba, C., Aguiar, R., Fraidenraich, N., 2005. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 957-966.
- Yahkup, M. A. B. H. M., Malik, A. Q., 2001. Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam, *Renewable Energy*, vol. 24, p.223-234.

#### **ANNUAL EVOLUTION OF GLOBAL RADIATION INCIDENT IN INCLINED SURFACES FOR THE NORTH IN BOTUCATU, SP**

**Abstract.** *This work evaluated the to annual evolution of the daily monthly medium global irradiances incident in tilted surfaces to 12.85°, 22.85° and 32.85°, facing towards the North, in Botucatu, São Paulo State, Brazil. They were utilized measures of global irradiances in the surfaces tilted and horizontal of 04/1998 to 08/2001 for 22.85°; 09/2001 to 02/2003 for 12.85° and 01/2004 to 12/2007 for 32.85°. The levels of global irradiation in the plan slanted were lower in the period of summer and upper between the equinoxes, with tendency of increase of the differences with the development of the inclination. The monthly medium maximum peaks verified in the inclinations were of 22.04; 22.64 and 21.82 MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, occurred in September, April and August, whereas the most minimum peaks were of 16.08; 17.00 and 16.39 MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup> in the months of May, June and January for 12.85°, 22.85° and 32.85°, respectively. In the horizontal surfaces were verified maximum and minimum of 23.64 and 12.95 MJ m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>, in November and June. The monthly medium values of clearness indexes were superiors in the tilted surfaces us months of spring and summer and lower in the months of fall and winter.*

**Key words:** *Solar radiation, Atmospheric transmissivity, Time series*