

EQUAÇÃO DE ÅNGSTRÖM PARA ESTUFA DE POLIETILENO

Enzo Dal Pai – edalpai@fca.unesp.br

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

UNESP/FCA-Lageado, Departamento de Recursos Naturais-Setor Ambiental

Resumo. O trabalho descreve o estudo do brilho solar (n^{IN}) em estufa de polietileno tipo túnel, e suas relações com o do brilho solar externo (n^{EX}), fotoperíodo (N), radiação global interna (H_G^{IN}) e global externa (H_G^{EX}), para uma base de dados de medida no período de março de 2008 a fevereiro de 2009 em Botucatu. Foi calculada a evolução anual da média mensal do índice de claridade K_t da atmosfera que variou de 39,6% a 62,7%, com média anual de 50,0%; da transmissividade da radiação global na cobertura de polietileno ($\tau_G = G^{IN} / G^{EX}$) que variou de 79,4% a 71,2%, com médio anual de 75,6%; da razão do número de horas de brilho solar dentro e fora da estufa de polietileno (n^{IN} / n^{EX}), que variou de 65,0% a 82,0% com média anual de 76,0%, e da relação entre a razão da insolação dentro e fora da estufa de polietileno $(n / N)^{IN} / (n / N)^{EX}$, que variou de 65,0% a 82,0% com média anual de 75,0%. Para o agrupamento dos dados anual diários, foi determinado a equação de estimativa linear entre as razões de insolação dentro e fora da estufa de polietileno como sendo $(n / N)^{IN} = 0,768 (n / N)^{EX}$, com elevado nível de correlação $R^2 = 0,9384$. Foi obtido ainda por regressão linear a equação de Ångström para H_G^{IN} em função da razão de insolação interna $(n / N)^{IN}$ e externa $(n / N)^{EX}$ como sendo: $H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,35 (n / N)^{IN}$ e $H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,28 (n / N)^{EX}$ com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9104$ e $R^2 = 0,8543$ respectivamente.

Palavras-chave: estufa de polietileno, equação de Ångström, razão de insolação.

1. INTRODUÇÃO

A vantagem da utilização de estufas ou ambiente protegido com polietileno na agricultura consiste no aumento de produção de hortaliças e flores, principalmente nos períodos de entressafra, permitindo maior regularização de oferta e melhor qualidade dos produtos. A estufa permite precocidade de culturas, possibilidade de utilização de menor consumo de mão-de-obra, aumento de produtividade e menor índice de lixiviação do solo. Através do manejo correto deste micro ambiente, o produtor pode alcançar aumento significativo do rendimento e produtividade das culturas. A literatura tem mostrado que países que dependiam de volumosas importações passaram a ocupar lugares de destaque tanto na produção agrícola interna quanto na exportação.

A radiação solar é um importante elemento na produção vegetal sendo a fonte primária de energia para o desenvolvimento e produção de uma cultura. O estudo da insolação (número de horas de brilho solar n) se faz útil, pois permite rápida estimativa da radiação global a partir da equação de Ångström-PreScott, (Ångström 1924; Prescott 1940), sem necessidade da aquisição de equipamentos de alto custo, visto que a medição da radiação global ainda não é de prática comum em todas as estações meteorológicas do Brasil (Pilau et al. 2007).

A equação de Ångström-PreScott (Eq. 1) associa o índice de claridade do céu $K_t(H_G / H_0)$ com a relação n/N (relação entre o número de horas de brilho solar n com o fotoperíodo calculado N). Neste modelo relação n/N elimina a latitude(local) e a variação astronômica do sol(dia), variando-se apenas os parâmetros climáticos(nebulosidade, vapor de água, aerossóis e outros) de um local para o outro. A equação de Ångström é do tipo linear, com coeficientes **a** linear e **b** angular. Vários estudos foram realizados com o objetivo de determinar os coeficientes **a** e **b** em diversas regiões no mundo, em diferentes situações de latitude e clima. Martínez-Lozano et al., 1984, fizeram uma revisão sobre o assunto com mais de 100 trabalhos, de diversas regiões do mundo. Concluíram que os coeficientes **a** e **b** variam predominantemente em função dos seguintes fatores, nesta ordem: 1) latitude; 2) altitude da estação meteorológica; 3) albedo da superfície; 4) média da elevação solar; 5) concentração de vapor d'água na atmosfera; 6) concentração de aerossóis (poluição).

No Brasil vários pesquisadores também já fizeram suas contribuições para a compreensão da equação de Ångström (Cervellini et al. 1966; Berlato 1971; Alves 1981; Azevedo et al. 1981; Fontana and Oliveira 1996; Ricieri et al. 1996; Campelo Junior 1998; Blanco and Sentelhas 2002; Dantas et al. 2003; Dallacort et al. 2004; Pilau et al. 2007). Os coeficientes são determinados para cada região, mas são de difícil extrapolação devido a diferenças regionais. (Escobedo et al. 2007) estudaram os coeficientes para a cidade de Botucatu, e encontram valores médios anuais $a=0,26$ e $b=0,47$.

$$H_G / H_0 = a + b (n / N) \quad (1)$$

Não foi encontrado na literatura especializada qualquer estudo da equação de Ångström-PreScott no interior de ambiente protegido. Deste modo, este trabalho teve como objetivo efetuar as medidas insolação, radiação global no

período de um ano, dentro e fora da estufa de polietileno, para determinar os valores médias mensais das quatro variáveis, análise da sazonalidade, relação do número de horas de brilho solar e da razão de insolação dentro e fora da estufa, e proposta da equação de Ångström dentro da estufa a partir da razão de insolação interna e razão de insolação externa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da Estufa

O experimento foi realizado na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrárias de Botucatu – Campus Lageado, da UNESP no período de 01/03/2008 a 28/03/2009.

A Figura 1 mostra uma fotografia da estufa utilizada no trabalho. Área de 35m², tipo túnel alto sem ventilação (áreas laterais fechadas com polietileno), com cobertura de polietileno (100µm). Suas dimensões: 24m de comprimento, 7m de largura, 2m de pé direito e 1,7 m de altura da concavidade.

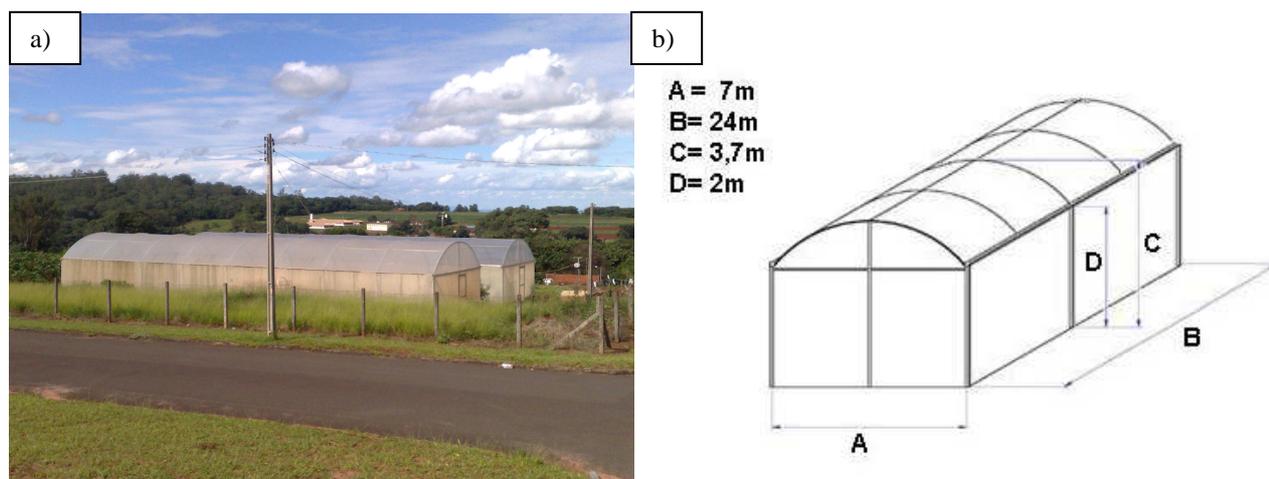


Figura 1- a) Estufa vista de fora; b) Dimensões da estufa.

2.2 Clima

O clima de Botucatu (latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m) é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco (Cunha et al. 1999). O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho.

A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal seguem a variação astronômica da declinação sol, e a geográfica. A temperatura é mais elevada quando o sol declina mais próximo da latitude local, onde os valores da radiação são maiores, e menores valores quando declina no hemisfério norte mais distante da latitude local. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2C⁰ e 17,1C⁰, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A nebulosidade (f) expressa a fração do número de horas em que o sol fica encoberto por nuvens no dia, onde n/N é a razão de insolação, n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo. A evolução anual da nebulosidade, na grande maioria dos meses, segue as series climáticas da temperatura e umidade relativa. É mais elevada nos meses de janeiro ($f=0,61$) e menor em agosto ($f=0,27$). A exceção ocorre nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, e a nebulosidade permanece constante em maio com relação a abril, e aumenta em junho comparado a maio. Essa singularidade existe por conta de entradas das frentes frias vindas do sul e sudeste do país, que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, para a região nordeste no outono, nos meses de abril e maio. Contrastando a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h, respectivamente.

A cidade de Botucatu com 130 mil habitantes (IBGE 2010) não possui grandes indústrias poluidoras, mas esta inserida em uma região rural de cultivo da cultura da cana de açúcar e produção de álcool. Nos meses do período da seca e início do período chuvoso, de julho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados proveniente das queimadas da cana-de-açúcar e das usinas que produzem o álcool e açúcar localizadas num raio de 100 Km do centro da cidade.

2.3 Instrumentação e medidas

O número de horas de brilho solar (n) foi medido por um heliógrafo de marca - Campbell Stokes e a razão de insolação (n) calculada pela relação n/N , onde N é o fotoperíodo. Para a medição das radiações globais interna e externa foram usados os piranômetros Kipp & Zonen e Eppley, respectivamente, com características apresentadas na Tabela 2. Na aquisição dos dados foi utilizado um datalogger da marca Campbell CR21X, operando na frequência de 1 Hz e armazenando médias de 5 minutos ou 300 segundos.

Os dados de radiação passaram por um controle de qualidade, com eliminação de valores discrepantes e horários antes do nascer e após o por do sol. Os dados de irradiância, em W/m^2 , foram integrados na partição diária, tendo como unidade o MJ/m^2 dia. Sendo assim, todos os valores de radiação representam valores diários de energia incidente sobre a superfície.



Figura 2- Heliógrafo instalado no interior da estufa

Todos os equipamentos foram instalados na região central da estufa para evitar possíveis interferências espaciais e multireflexões. As características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global interna e externa na estufa são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2. Principais características operacionais dos sensores:

	Global G^{EX}	Global G^{IN}
Marca	Eppley	Kipp & Zonen
Fator de Calibração	$\pm 8,12 \mu V/Wm^{-2}$	$\pm 10,06 \mu V/Wm^{-2}$
Range Espectral	305-2800nm	305-2800nm
Tempo de resposta	2s	18s
Linearidade	$\pm 1\%$ (de 0 a $700W/m^2$)	$< 2,5\%$ (de 0 a $1000W/m^2$)
Co-seno	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de $-20^{\circ}C$ a $40^{\circ}C$	$< \pm 2K$

3. Resultados e discussão

3.1 Evolução anual das radiações Global, Extraterrestre e índice de claridade K_t .

A Tabela 3 e a Figura 3a e b mostram a evolução anual das radiações extraterrestre (H_0), global H_G^{EX} e o índice de claridade (transmissividade) K_t (Eq. 2) médias mensais diárias em Botucatu, no período entre março de 2008 a fevereiro de 2009. O índice de claridade da atmosfera K_t define a transmissividade atmosférica da radiação global, durante o período experimental.

$$K_t = H_G / H_0 \quad (2)$$

Por meio da Figura 3a, bem como pelos valores apresentados na Tabela 3, fica evidente que as radiações H_0 e H_G^{EX} apresentam variações sazonais ao longo do ano: os valores médios mensais das radiações são mais elevados no período chuvoso, verão e primavera, e menos elevados, no outono e inverno, no período da seca. A sazonalidade é devido à variação astronômica do sol (declinação do sol), latitude (local), e principalmente, devido às variações climáticas das nuvens e vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano. No verão e primavera, a energia da radiação é

mais elevada, porque o sol declina no hemisfério sul mais próximo da latitude local ($-23,51^{\circ}$) que quando declina no hemisfério norte, durante o outono e inverno.

Tabela 3. Valores das radiações global externa H_G^{EX} e topo da atmosfera H_0 , em MJ/m^2 e índice de claridade Kt, entre março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu.

Meses	H_0 (MJ/m^2)	H_G^{EX} (MJ/m^2)	Kt
Janeiro	42,32	$16,77 \pm 7,29$	0,40
Fevereiro	40,25	$18,31 \pm 6,25$	0,45
Março	35,08	$19,99 \pm 4,04$	0,57
Abril	29,97	$14,11 \pm 4,83$	0,47
Mai	25,10	$13,55 \pm 3,64$	0,54
Junho	22,73	$12,15 \pm 3,09$	0,53
Julho	22,74	$14,28 \pm 4,13$	0,63
Agosto	27,51	$14,85 \pm 4,53$	0,54
Setembro	33,15	$18,02 \pm 5,38$	0,54
Outubro	38,18	$18,68 \pm 5,11$	0,49
Novembro	41,40	$21,78 \pm 5,63$	0,53
Dezembro	42,72	$22,55 \pm 4,20$	0,53
Média anual	34,18	$17,21 \pm 5,96$	0,50

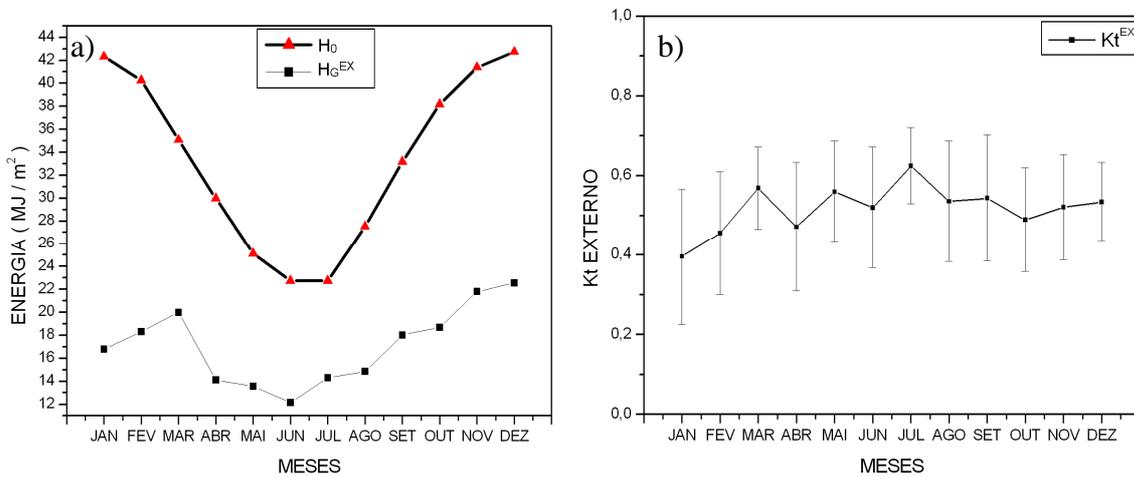


Figura 3- a) Evolução média mensal das radiações no topo da atmosfera H_0 e global externa H_G^{EX} , entre março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu.; b) Evolução média mensal do índice de claridade Kt no mesmo período.

As variações climáticas influenciam nos valores de H_G^{EX} por meio das variações do vapor d'água, nuvens e aerossóis na atmosfera, característicos de cada mês do ano. Os parâmetros meteorológicos responsáveis, na atenuação da radiação global, por absorção e espalhamento na atmosfera, mais acentuadamente foram: vapor de água e nuvens, os quais são mais elevados no período úmido no verão e primavera. Os aerossóis atenuam a radiação global no período da seca, nas estações do inverno e outono, com menos intensidade que as nuvens e vapor de água, no verão e primavera.

A radiação global média mensal variou de $12,15 MJ/m^2$ em junho a $22,55 MJ/m^2$ em dezembro, com um valor médio total de $17,21 MJ/m^2$. O resultado da evolução anual da radiação global expressa a dependência astronômica e geográfica e principalmente, com as variações climáticas típicas de cada mês do ano. A evolução anual da radiação global H_G^{EX} acompanhou sazonalmente as variações da radiação do topo H_0 da atmosfera de março a dezembro. A exceção ocorreu nos meses de janeiro a fevereiro, onde o efeito da nebulosidade e precipitação, ou nuvens e vapor de água, foram muito intensos e reduziram desproporcionalmente, a radiação global H_G^{EX} na superfície terrestre, nos dois meses (Tabela 3).

A radiação global obtida quando comparada com o valor da série de 10 anos da radiação global (Inácio 2009), foi próxima do valor esperado, porem em alguns meses houve uma diminuição nos valores médios, devido a eventos climáticos atípicos, como a forte precipitação em janeiro e Fevereiro de 2009, e a entrada de frente fria que aumentaram a nebulosidade, em abril de 2008. Nos meses de janeiro e fevereiro de 2009 os valores obtidos de $16,8 MJ/m^2$ e $18,3 MJ/m^2$ foram abaixo do normal, quando comparados com os valores da série de 10 anos da radiação global que é de $19,0 MJ/m^2$ e $19,6 MJ/m^2$, respectivamente. Houve uma redução dos níveis de energias da radiação global de 11,6% no mês de janeiro, e 6,6% em fevereiro, em relação à média climática de 10 anos. Os baixos valores do índice de claridade Kt, 39,3% e 45,5%, nestes dois meses foram os menores do ano, e muito abaixo do valor esperado 45,0% e 49,0%, respectivamente. Em abril, que é caracteristicamente um mês com cobertura de céu aberto com valor de $17,7 \pm 1,50$

MJ/m² para a radiação global média mensal e transmissão atmosférica de Kt= 59,0%, o valor de energia obtido igual a 14,11 ± 4,83 MJ/m² e transmissão atmosférica de Kt= 47,0%, foi também abaixo do esperado.

A Figura 3b mostra a evolução anual do índice de claridade Kt para cada mês. O valor médio mensal de Kt apresenta variações sazonais decorrentes da sazonalidade da medida da radiação global na superfície terrestre. No geral, os valores de Kt são menores nos meses do verão e primavera, em função da forte absorção e espalhamento da radiação global por nuvens e vapor de água na atmosfera, e mais elevados nos meses outono e inverno, período seco e sem nuvens. O menor Kt ocorreu em janeiro com 39,6% e o maior Kt em julho com 62,7%. O valor médio de Kt anual foi de 50,0%. Esse valor permitiu classificar a cobertura de céu durante o período experimental, como sendo de parcialmente nublado com dominância para céu difuso.

3.2 Transmissividade

A transmitância de uma cobertura é dependente de vários fatores, como orientação geográfica da estufa, condensação de vapor d'água no interior da estufa; ângulo de incidência, tipo de material usado na cobertura (Sentelhas et al. 1999), entre outros. A transmissividade (τ_G) da radiação global foi calculada por meio da relação entre as radiações global interna (H_G^{IN}) e a global externa (H_G^{EX}) diárias, como mostra a Equação 3:

$$\tau_G = H_G^{IN} / H_G^{EX} \quad (3)$$

Tabela 4. Transmissividade média mensal na cobertura de polietileno para março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu.

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
G^{IN}/G^{EX}	0,765	0,771	0,794	0,778	0,750	0,747	0,712	0,734	0,766	0,768	0,760	0,753	0,758

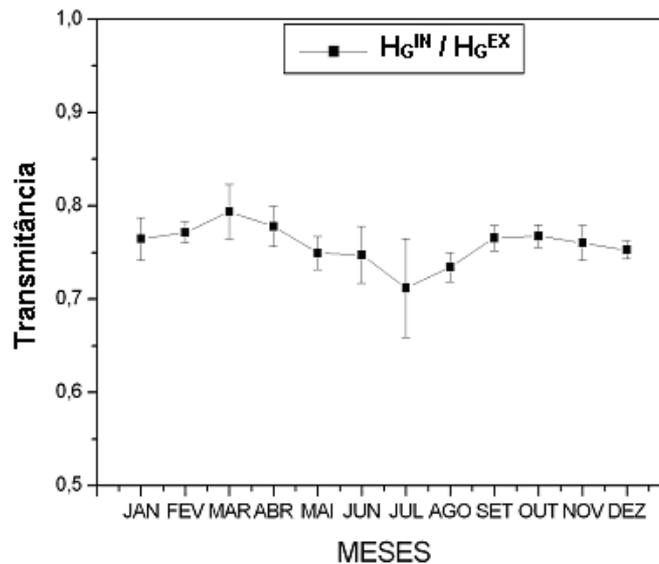


Figura 4- Transmissividade da estufa da radiação global média mensal entre março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu.

A evolução anual da transmissividade da radiação global média mensal também apresentou variações sazonais, com valores entre 79,4% em março a 71,2% em Julho, com valor médio total de 75,6%. Normalmente, a redução da radiação global neste tipo de polietileno (100µm) é da ordem entre 20,0% a 30,0% dependendo do tempo de uso, qualidade e até da sujeira acumulada no polietileno. Esse resultado foi considerado normal quando comparado com os obtidos por outros pesquisadores: Buriol et al. 1995; Sentelhas et al. 1997; Pollet and Pieters 1999; Souza et al. 2004; Beckmann et al. 2006; Steidle Neto et al. 2008, que encontraram transmitâncias entre os 70 a 90 %.

No geral, para a radiação global, os valores da transmissividade foram mais elevados nos meses do verão e primavera, comparados aos valores mensais do outono e inverno. A diferença na transmissividade sazonal é provavelmente devido à variação do ângulo de incidência da radiação na cobertura de polietileno, em função da declinação solar. Quando a declinação solar é negativa (sol declinando no hemisfério sul) nas estações de verão e primavera, têm-se os menores ângulos de incidências (menores reflexões) e maiores transmissões no polietileno, caso dos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro, novembro e dezembro. E quando a declinação é positiva (sol declinando no hemisfério norte) nas estações inverno e outono tem-se os maiores ângulos de incidências (maiores reflexões) e menores transmissões no polietileno, casos dos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro.

3.3 Brilho Solar e Razão de Insolação (n / N).

A Tabela 5 mostra a evolução anual do número de horas de brilho solar acumulado mensal e razão de insolação (n / N) dentro e fora da estufa de polietileno nos meses do ano. A evolução do número de horas de brilho solar externo mostrado na Tabela 5 não acompanhou em todos os meses do ano, os valores do número de horas de brilho solar da série climática da insolação em Botucatu. A comparação das duas evoluções, série climática e a série da Tabela 5, mostra que em vários meses, o brilho solar foi acima e outros abaixo do esperado ou normal.

Tabela 5. Evolução anual do número de horas de brilho solar acumulado mensal, entre março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu.

Meses	Insolação ^{IN}	(n / N) ^{IN}	Insolação ^{EX}	(n / N) ^{EX}
Jan	87,5	0,213	135,2	0,329
Fev	131,4	0,368	151,0	0,423
Mar	169,5	0,500	199,4	0,588
Abr	152,7	0,445	187,4	0,565
Mai	145,7	0,432	183,4	0,579
Jun	131,9	0,414	164,7	0,596
Jul	210,1	0,631	282,2	0,847
Ago	170,2	0,486	225,7	0,646
Set	200,1	0,562	243,1	0,682
Out	135,2	0,346	185,1	0,474
Nov	147,7	0,374	225,9	0,553
Dez	161,0	0,384	236,1	0,552

Nos meses de janeiro e fevereiro, o número de horas de brilho solar foi muito abaixo do normal: janeiro (135,2h contra 185h da série climática) e fevereiro (151h contra 175h da série climática) respectivamente. A causa do decréscimo foi à precipitação e nebulosidade atípica dos dois meses no ano de 2009 (Tabela 4).

Nos meses de abril, maio, junho e outubro, o número de horas de brilho solar foi também abaixo do normal: abril (187h contra 217,0h), maio (183h contra 211h), junho (165h contra 196h) e outubro (185h contra 211h). Nos três primeiros meses, a entrada das frentes frias vindas do sul do país, na entrada do outono, é o fator responsável, pois essas massas de ar frio arrastam para atmosfera local grande quantidade de nuvens, diminuindo a insolação desses meses, enquanto que, em outubro, a causa foi a nebulosidade e precipitação. Nos meses de julho, setembro e dezembro, o número de horas de brilho solar foram muito acima dos valores da série climática: julho (282h contra 227h), setembro (243h contra 191h) e dezembro (236h contra 188h).

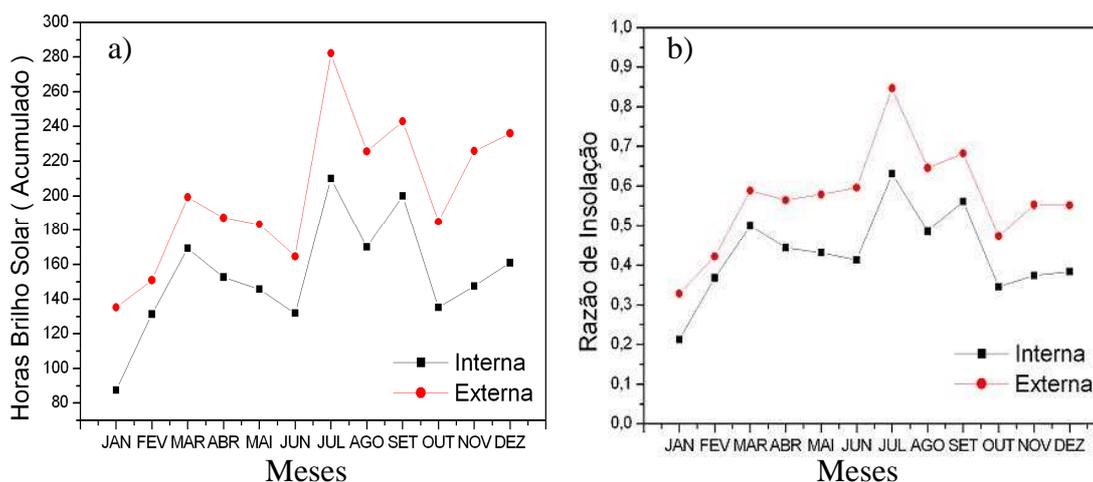


Figura 5- a) Evolução anual do número de horas de brilho solar entre março a dezembro de 2008 e de janeiro a fevereiro de 2009 em Botucatu, b) Evolução anual da razão de insolação, dentro e fora da estufa de polietileno no mesmo período.

Em relação ao número de horas de brilho solar dentro e fora da estufa de polietileno, a Figura 5a mostra que a evolução anual da insolação dentro é similar a de fora da estufa, apenas com valores inferiores aos valores externos a estufa. A redução da insolação na cobertura de polietileno não é proporcional para todos os meses do ano, a relação (n^{IN}

$/ n^{EX}$) variou de 65,0% em janeiro a 82,0% em setembro, com média anual de 76,0%, valor esse, exatamente igual a transmissão da radiação global na cobertura de polietileno.

Similarmente, a Figura (5b) mostra que a evolução anual da razão de insolação (n/N) dentro também é similar a de fora da estufa, com valores inferiores aos externos da estufa. A redução da razão de insolação (n/N) na cobertura de polietileno também não é igual em todos os meses do ano. A relação $(n/N)^{IN} / (n/N)^{EX}$ variou de 65,0% em janeiro a 82,0% em setembro, com média anual de 75,0%.

A Figura 6 mostra a relação entre $Kt^{IN} = H_G^{IN} / H_0$ e a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro da estufa de polietileno. A equação de Ångström na estufa de polietileno obtida por regressão linear com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9104 foi:

$$H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,35 (n/N)^{IN} \quad (4)$$

$$R^2 = 0,9104$$

O coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9104 mostra que a radiação global está muito bem correlacionada com o número de horas de brilho dentro da estufa pela equação de Ångström.

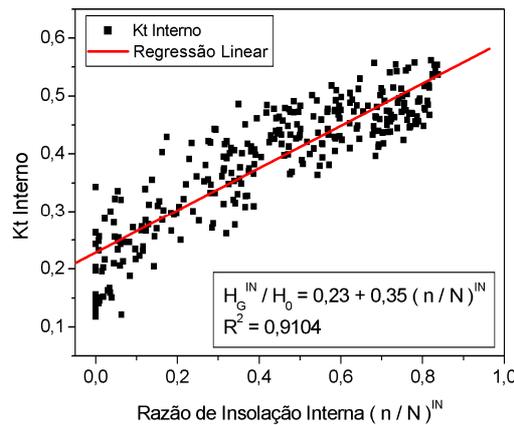


Figura 6- Relação entre o índice Kt e a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro da estufa.

O coeficiente de intercepto $a = 0,23$ representa a transmissividade mínima, enquanto que, a soma dos coeficientes de intercepto e angular: $0,23 + 0,35 = 0,58$ representa a transmissividade máxima da radiação global dentro da estufa. A comparação da equação de Ångström dentro da estufa com a equação obtida para o meio exterior da estufa para uma base de dados de 10 anos medida no período de 1996 a 2005 (Escobedo et al. 2007), mostra que os coeficientes de Ångström a e b da equação dentro da estufa são inferiores aos da equação fora da estufa.

$$H_G^{EX} / H_0 = 0,26 + 0,47 (n/N)^{EX} \quad (5)$$

$$R^2 = 0,98375$$

A transmissividade mínima foi reduzida de 0,26 para 0,23 enquanto que a transmissividade máxima de 0,73 para 0,58 numa redução percentual de 11,5% e 20,5% respectivamente. O efeito da cobertura de polietileno na redução da radiação global e na transformação da radiação direta na difusa foi predominante na variação do valor do coeficiente angular que diminuiu de 0,47 para 0,35 com decréscimo de 25,5%.

A Figura 7 mostra a relação entre a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro e a razão de insolação $(n/N)^{EX}$ fora da estufa de polietileno para o agrupamento total dos dados. A relação entre as razões de insolação é linear e com elevado nível de correlação. A equação de regressão linear obtida passando pela origem ajustada na distribuição dos pontos experimentais é:

$$(n/N)^{IN} = 0,768 (n/N)^{EX} \quad (6)$$

$$R^2 = 0,9384$$

O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9384$, mostra que a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro e a razão de insolação $(n/N)^{EX}$ fora da estufa de polietileno estão bem correlacionadas. O resultado obtido para a razão de insolação interna igual a 76,8% da externa, esta em concordância com o resultado obtido para a transmissão da radiação global na estufa de polietileno, descrito na secção anterior, que foi em média de 76,0%.

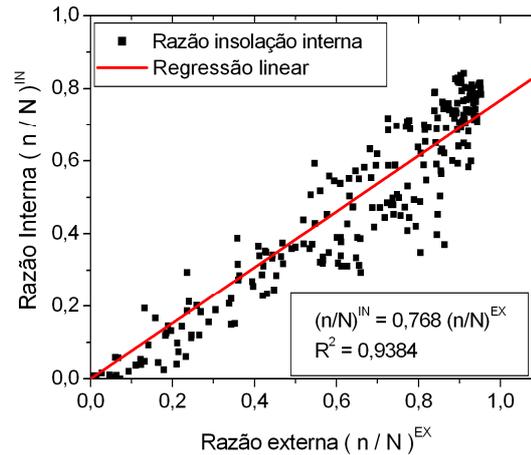


Figura 7. Relação entre a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro e fora da $(n/N)^{EX}$ da estufa de polietileno.

Expressando a razão de insolação dentro e fora da estufa $(n/N)^{IN} = 0,76 (n/N)^{EX}$ na equação de Ångström dentro da estufa $H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,35 (n/N)^{IN}$ temos:

$$H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + (0,35 \times 0,76) (n/N)^{EX} \quad (7)$$

ou

$$H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,28 (n/N)^{EX} \quad (8)$$

A equação de Ångström permite estimar a radiação global interna H_G^{IN} / H_0 a partir da razão de insolação $(n/N)^{EX}$ medida externamente a estufa, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,8543$. O uso da equação vai ser importante nos estudos em estufas de polietileno, que normalmente, não possuem instrumentos sofisticados de medidas da radiação solar de custos elevados, podendo utilizar o heliógrafo, aparelho simples e bastante comum, nos postos meteorológicos.

4. Conclusões

No período experimental, a transmissividade atmosférica da radiação global (Kt), apresentou variações sazonais em função das variações atmosféricas (nebulosidade, vapor d'água e aerossóis), características de cada mês ou estação do ano. No geral, o valor de Kt foi menor no período chuvoso, verão e primavera, onde a concentração de nuvens e vapor de água é mais elevada no ano, e maior no outono e inverno, no período da seca, onde a concentração de nuvens e vapor de água é menor do ano. O menor Kt ocorreu em janeiro com 39,6% e o maior Kt em julho com 62,7%. O valor médio de Kt foi de 50,0%. A evolução anual da radiação global média mensal H_G^{EX} mostrou que os valores variaram de 12,15 MJ/m² em junho a 22,55 MJ/m² em dezembro, com um valor médio total de 17,21 MJ/m². A sazonalidade é devido à variação astronômica da declinação solar, latitude, e principalmente, as variações climáticas. A evolução anual da insolação média mensal acumulada, dentro é similar a de fora da estufa, apenas com valores inferiores aos de fora da estufa. A razão de insolação na cobertura de polietileno é sazonal, onde a relação (n^{IN} / n^{EX}) variou de 65,0% em janeiro a 82,0% em setembro, com média anual de 76,0%. A transmissão da número de brilho solar de 76,0% é igual à transmissão da 76,0% da radiação global na cobertura de polietileno. Similarmente, a evolução anual da razão de insolação (n/N) média mensal dentro também é similar a de fora da estufa, com valores inferiores aos externos da estufa. A relação $(n/N)^{IN} / (n/N)^{EX}$ variou de 65,0% em janeiro a 82,0% em setembro, com média anual de 75,0%. A relação entre as razões de insolação diárias dentro e fora da estufa é linear e a equação de regressão linear passando pela origem ajustada na distribuição dos pontos experimentais foi: $(n/N)^{IN} = 0,768 (n/N)^{EX}$ com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9384$. O coeficiente de determinação elevado mostra que a razão de insolação $(n/N)^{IN}$ dentro e a razão de insolação $(n/N)^{EX}$ fora da estufa de polietileno estão bem correlacionadas. A equação de Ångström na estufa obtida por regressão linear $H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,35 (n/N)^{IN}$ com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9104 permite estimar a radiação global dentro da estufa com elevada correlação. A equação de Ångström na estufa $H_G^{IN} / H_0 = 0,23 + 0,28 (n/N)^{EX}$ com coeficiente de determinação R^2 igual a 0,8543 permite estimar a radiação global interna a partir da razão de insolação externa com boa correlação.

Agradecimentos

Ao CNPQ pelo auxílio pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Alves, A. R., 1981. Estimativa da radiação solar global diária a partir de dados de insolação, para Viçosa, Minas Gerais., Experientiae, vol. **27**, n. 10, pp. 211-222
- Angström, A., 1924. Solar and Terrestrial radiation., Quartely Journal of the Royal Meteorological Society, vol. **50**, n., pp. 121-126
- Azevedo, P. V., M. A. Varejão-Silva, et al. (1981). Zoneamento do potencial de energia solar no nordeste. Campina Grande, UFPB/NMA.
- Beckmann, M. Z., G. R. B. Duarte, et al., 2006. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul, Ciência Rural, vol. **36**, n., pp. 86-92
- Berlato, M. A., 1971. Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul., Agronomia Sulriograndense, vol. **5**, n., pp. 115-131
- Blanco, F. F. and P. C. Sentelhas, 2002. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP., Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. **10**, n. 2, pp. 295-300
- Buriol, G. A., N. A. Streck, et al., 1995. Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas, Ciência Rural, vol. **25**, n., pp. 1-4
- Campelo Junior, J. H., 1998. Relação sazonal entre radiação global e insolação no sudeste da Amazônia., Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. **6**, n. 2, pp. 193-199
- Cervellini, A., E. Salati, et al., 1966. Estimativa da distribuição de energia solar no Estado de São Paulo., Bragantia, vol. **25**, n. 3, pp. 31-40
- Cunha, A. R., E. S. Klosowski, et al. (1999). Classificação climática do município de Botucatu, SP segundo Köppen. Simpósio de Energia na Agricultura. Botucatu-SP, Brasil, Universidade Estadual Paulista.
- Dallacort, R., P. S. L. d. Freitas, et al., 2004. Determinação dos coeficientes da equação de Angström para a região de Palotina, Estado do Paraná., Acta Scientiarum Agronomy, vol. **26**, n. 3, pp. 329-336
- Dantas, A. A. G., L. G. d. Carvalho, et al., 2003. Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG., Revista Ciência e Agrotecnologia, vol. **27**, n. 6, pp. 1260-1263
- Escobedo, J. F., E. N. Gomes, et al. (2007). Equações de Estimativa diária para as radiações UV, PAR e IV em função da Global para cobertura atmosférica total e discreta. Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza-CE, Brasil, Sociedade Brasileira de Energia Solar. **1**.
- Fontana, D. C. and D. Oliveira, 1996. Relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Grande do Sul., Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. **4**, n. 1, pp. 87-91
- IBGE. (2010). "IBGE Cidades." Retrieved 10/02/2010, from <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>.
- Inácio, T. (2009). Potencial Solar da radiações Global, Difusa e Direta em Botucatu. Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu-SP, Brasil, Universidade Estadual Paulista. **Mestrado**: 390p.
- Martínez-Lozano, J. A., F. Tena, et al., 1984. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: Review and bibliography, Agricultural and Forest Meteorology, vol. **33**, n. 2-3, pp. 109-128
- Pilau, F. G., V. Barbieri, et al., 2007. Coeficientes da equação de Angström-Prescott para a estimativa da irradiância solar global na região de Araras, SP, Rev. Bras. Agrometeorol., vol. **15**, n. 1, pp. 109-113
- Pollet, I. V. and J. G. Pieters, 1999. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials, Agricultural and Forest Meteorology, vol. **93**, n. 2, pp. 149-152
- Prescott, J. A., 1940. Avaporation from a water surface in relation to solar radiation., Transaction of the Royal Society Science Australian, vol. **64**, n., pp. 114-118
- Ricieri, P. R., J. F. Escobedo, et al. (1996). Relações das radiações solar difusa e global em Botucatu. Congresso Brasileiro de Meteorologia. S. B. d. Meteorologia. Campos do Jordão, Sociedade Brasileira de Meteorologia. **9**: 547-550.
- Sentelhas, P. C., R. S. Borsatto, et al., 1999. transmissividade da radiação solar em estufas cobertas com filmes de PVC azul e transparente., Rev. Bras. Agrometeorol., vol. **7**, n. 2, pp. 157-162
- Sentelhas, P. C., N. A. Villa Nova, et al. (1997). Efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Piracicaba-SP, Brasil, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. **10**: 479-481.
- Souza, J. W., D. Martins, et al., 2004. Efeito do polietileno difusor de luz, sobre a radiação solar global, em ambiente protegido., Revista Brasileira de Agrometeorologia, vol. **12**, n., pp. 211-217
- Steidle Neto, A. J., S. Zolnier, et al., 2008. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. **12**, n., pp. 626-631

ÅNGSTRÖM EQUATION FOR POLYETHYLENE GREENHOUSE

Abstract. This paper describes the study of the hours of bright sunshine (n^{IN}) inside a polyethylene tunnel type greenhouse, and their relations with the hours of bright sunshine outside (n^{EX}), astronomic day duration (N), global radiation inside (H_G^{IN}) and global outside (H_G^{EX}) for a database of measurement in the period from March 2008 to February 2009 in Botucatu. Was calculated the annual evolution of the mean monthly clearness index K_t atmosphere of that ranged from 39.6% to 62.7%, with an annual average of 50.0%; the transmissivity of global radiation in

polyethylene cover ($\tau_G = G^{IN} / G^{EX}$), which ranged from 79.4% to 71.2%, with an annual average of 75.6%; the ratio of the number of hours of bright sunshine inside and outside the greenhouse of polyethylene (N^{IN} / N^{EX}), which ranged from 65.0% to 82.0% with an annual average of 76.0%; and the relationship between relative sunshine inside and outside the greenhouse of polyethylene $(n / N)^{IN} / (n / N)^{EX}$, which ranged from 65.0% to 82.0% with an annual average of 75.0%. For the annual collation of data per day, was determined to estimate a linear equation between the relative sunshine inside and outside the greenhouse as polyethylene $(n / N)^{IN} = 0.768 (n / N)^{EX}$, with a high degree of correlation $R^2 = 0.9384$. Was also obtained by linear regression equation for Ångström H_G^{IN} depending on the ratio relative sunshine inside $(n / N)^{IN}$ and outside $(n / N)^{EX}$ as: $H_G^{IN} / H_0 = 0.23 + 0.35 (n / N)^{IN}$ and $H_G^{IN} / H_0 = 0.23 + 0.28 (n / N)^{EX}$ with a coefficient of determination $R^2 = 0.9104$ and $R^2 = 0.8543$ respectively.

Key words: polyethylene greenhouse; Ångström equation; relative sunshine