

ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE DE ENERGIA SOLAR À SUPERFÍCIE PARA A REGIÃO DE CASCAVEL-PR

*Marlos Wander Grigoletto*¹

*Reinaldo Prandini Ricieri*²

RESUMO:

O objetivo deste trabalho é analisar o potencial de energia solar disponível para o município de Cascavel, Estado do Paraná, Brasil (Latitude 24°53'S, Longitude 53°23'O e altitude de 682 m). Os dados experimentais de radiação solar foram monitorados do nascer ao pôr-do-sol, durante um período de 16 anos (1983-1998). Foi determinado o índice de claridade máximo (K_t), a distribuição da irradiação solar global, difusa e direta. O índice de claridade máxima (K_t) para Cascavel-PR variou de 0,44 a 0,61, tendo como valor médio 0,53. Para as condições climáticas da localidade analisadas, foi possível verificar com precisão o potencial de radiação solar disponível à superfície para o município de Cascavel.

Palavras-Chave: Energia solar, irradiação solar global, potencial de energia solar.

ABSTRACT:

The objective of this paper is to analyze the potential of solar energy for the city of Cascavel, State of Paraná, Brazil (Latitude 24°53'S, Longitude 53°23'O and altitude of 682 m). The experimental data of solar radiation was monitored from dawn to dusk, during a 16 year period (1983-1998). The maximum index of clarity was determined (K_t), the distribution of the global, diffuse and direct solar irradiation. The index of maximum clarity (K_t) for Cascavel-PR, varied from 0.44 to 0.61, having as an average number 0.53. For the weather conditions of the analyzed place it

¹ Engenheiro Mecânico, Mestre em Engenharia de Sistemas Agroindustriais pela UNIOESTE, Professor de Eletromecânica da Unidade de Medianeira do CEFET-PR, e-mail: grigoletto@ar-net.com.br

² Físico, Doutor em Agronomia pela UNESP – Botucatu, Coordenador e professor do Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais da UNIOESTE.

was possible to verify the potential of solar radiation accurately to the surface for the above mentioned city.

Key Words: Solar energy, global solar irradiation, potential of solar energy.

1. INTRODUÇÃO

Define-se, conforme RICIERY (1998), que a radiação solar é o fenômeno de emissão de energia através de ondas eletromagnéticas, e irradiância solar como a medida instantânea deste fenômeno, em $W.m^{-2}$, e de irradiação solar o integral da irradiância solar em um determinado período de tempo, em $MJ.m^{-2}$, e finalmente de potencial de energia solar toda a irradiância solar que atinge a superfície da Terra do nascer ao pôr-do-sol, determinando-se assim, o potencial disponível de energia solar como o máximo possível de irradiação solar incidente sobre a superfície do solo, para um determinado dia e local, estando a atmosfera completamente isenta de nuvens durante todo o dia.

O Brasil, por ser um país de clima tropical, se estende desde a Latitude de 5° Norte até 32° Sul e 92% do território brasileiro esta acima do trópico de Capricórnio, ou seja 7.831.007 Km^2 , vemos que estamos numa faixa privilegiada em relação à disponibilidade de energia solar. Como o Brasil possui a maior extensão territorial entre os países que se encontram na faixa mencionada, concluímos que este é o país que possui a maior potencialidade em relação ao aproveitamento da energia solar em quase todo o território e durante o ano inteiro. O Paraná é o principal estado agrícola do País, com sua agricultura diversificada e respondendo por 22,6% da produção nacional de grãos (PARANÁ 12 MESES, 2000). O município de Cascavel tem sua economia fomentada pela agropecuária e agroindústria e é responsável por 26% do total de produção de grãos do Estado. No entanto, os estudos são poucos para aproveitar esta radiação, embora seja de grande importância levar em conta o potencial de energia solar no planejamento e estimativa de produtividade das culturas, assim como na geração de energia.

Seja qual for o processo de absorção de energia solar considerado, será sempre necessária a avaliação da energia solar disponível em determinada região. A absorção pela biomassa no caso da cultura de cana-de-açúcar foi analisada por BARBIERY (1994) que elaborou um modelo de produção potencial da cultura, quantificando a relação entre o total de energia solar disponível durante o ciclo e a produtividade esperada.

Segundo TUBELIS e NASCIMENTO (1992), o balanço de radiação solar sobre o dossel de uma cultura representa a quantidade de energia que o agroecossistema dispõe para atender os processos de evapotranspiração, aquecimento do ar, do solo e de fotossíntese.

A eficiência do uso da radiação solar é uma das variáveis utilizadas em modelos de estimativa de produção de grãos segundo MONTEITH³, citado por MOREIRA *et al.* (1999)

O milho é uma cultura que sofre muita influência da radiação solar; DIDONET *et al.* (1998), num estudo realizado com três híbridos de milho em cinco épocas diferentes, na região de Coxilha-RS (28°15'S, 52°24'O e 687m), concluíram que os rendimentos de grãos estão relacionados com a incidência média de radiação solar sobre as plantas, desde a emergência até a maturação fisiológica, indicando que elevada produtividade só pode ser obtida com a incidência de altas temperaturas em todo o ciclo da cultura.

Num estudo realizado por ASSIS *et al.* (1998) foi analisada a aplicabilidade de modelos de estimativas de irradiação solar global no qual demonstrou que os modelos propostos são satisfatórios, entretanto os erros podem atingir a 15% em relação aos valores medidos.

O estudo do potencial de energia solar é importante também na estimativa da demanda máxima de evaporação, evapotranspiração, no estudo de viabilidade econômica para implantação de conversores de energia solar em energia elétrica, e outros equipamentos solares, tais como, secadores, aquecedores, fogões, refrigeradores, etc.

Face a esta realidade, o presente trabalho tem como objetivo:

- (a) *determinar o índice de claridade (K) da atmosfera para a região de Cascavel-PR e,*
- (b) *determinar a disponibilidade de energia solar para a região de Cascavel-PR.*

2. MATERIAL E MÉTODOS

A série de dados, de 1983 a 1998, utilizados neste trabalho, foram fornecidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) Londrina-PR, coletados em sua estação meteorológica localizada na Cooperativa Central Agropecuária de Desenvolvimento Tecnológico e Econômico Ltda (COODETEC), Cascavel/PR, situada na Latitude de 24°53'S, Longitude de 53°23'O e altitude de 682m.

A estação meteorológica está localizada em terreno plano, com boa visão do horizonte, dentro dos padrões exigidos pela Organização Mundial de Meteorologia. Os dados foram obtidos diariamente, do nascer ao pôr-do-sol durante os dezesseis anos. As medidas da radiação solar global foram obtidas

³ MONTEITH, J.L. Principles of environmental physics. American Elsevier, 1972. New York. 241 pp.

por um actinógrafo (R.FUESS - BERLIN – STEGLITZ). Este equipamento passou por aferições e manutenções regulares, realizadas anualmente, pelo Setor de Agrometeorologia do IAPAR.

Conforme a classificação de KÖPPEN (1948), a região de Cascavel-PR é denominada do tipo Cfa, com temperaturas moderadas com chuvas bem distribuídas e verão quente. Nos meses de inverno, a média de temperatura é inferior a 16°C. No mês mais quente, as máximas superam 30°C. Com temperatura média anual de 21°C, a região está sujeita a geadas, embora não frequentes. A umidade média relativa do ar é de 75% e os ventos sopram na direção nordeste/sudoeste e leste/oeste com velocidade média entre 33km/h e 46 km/h, a precipitação pluviométrica mensal é de 163 mm e a média anual é de 1951 mm (CASCAVEL, 2001).

2.1 EQUAÇÕES UTILIZADAS

Os cálculos da declinação solar (d), ângulo solar horário (W_s), ângulo solar diário (G), fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (E_0), irradiação no topo da atmosfera (R_0), índice de claridade (K_t) foram realizados através de planilhas do “Software™ Microcal Origin 6”, tais equações são citadas por IQBAL (1983).

2.1.1. Índice de Claridade (K_t)

Índice de claridade é a razão entre a irradiação solar global (R_g) e a irradiação solar no topo da atmosfera (R_0), dado pela equação:

$$K_t = \frac{R_g}{R_0}$$

2.1.2. Ângulo Solar Horário (W_s)

O ângulo solar horário pode ser obtido em função da latitude local e da declinação solar através da seguinte equação:

$$W_s = \cos^{-1} .(-\operatorname{tg} \phi . \operatorname{tg} \delta)$$

sendo: ϕ = latitude local em graus;

d = declinação solar em graus.

2.1.3. Declinação Solar (d)

A declinação solar proposta por COOPER (1969) e citada por IQBAL (1983):

$$\delta = 23,45 \cdot \frac{\text{sen} [360 \cdot (284 + DJ)]}{365}$$

sendo: **DJ** = *dia juliano*

2.1.4 Irradiação Solar no Topo da Atmosfera (R_0)

A irradiação solar incidente em uma superfície horizontal no topo da atmosfera em MJ.m⁻², é calculada pela expressão:

$$R_0 = 37,60 \cdot E_0 \cdot (\pi \cdot W_s \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cos} W_s)$$

180

E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, dado por:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cdot \text{cos}\Gamma + 0,00128 \cdot \text{sen}\Gamma + 0,000719 \cdot \text{cos}2\Gamma + 0,000077 \cdot \text{sen}2\Gamma$$

sendo: Γ = ângulo solar diário;

$$\Gamma = \frac{2\pi(DJ - 1)}{365,242}$$

2.2 ANÁLISE DOS DADOS

A série de dezesseis anos de dados (1983 a 1998) foram utilizados para determinar a irradiação solar global à superfície, a irradiação solar no topo da atmosfera e o índice de claridade (K_t).

Os dados foram separados do dia 1º ao último dia de cada mês, totalizando uma série de 16 meses de janeiro, de fevereiro, de março, de abril, de maio, de junho, de julho, de agosto, de setembro, de outubro, de novembro e de dezembro respectivamente, para a análise mensal.

Da mesma forma, ocorreu com as quinzenas de tal forma que se obteve 24 quinzenas do 1º ao 15º dia e do 16º ao último dia do mês, para a análise quinzenal.

Após a separação, foi calculado o índice de claridade (K_t).

O potencial de energia solar foi calculado através da metodologia tradicional de integração da irradiância solar do nascer ao pôr-do-sol, com médias a cada 5 minutos, obtendo assim valores reais observados, respeitando a mesma partições.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ÍNDICE DE CLARIDADE

O índice de claridade (K_t) atingiu o máximo de 0,61, próximo a 0,60, calculado por VALIATI (2001) para a mesma região, ou seja, a irradiação solar global incidente na Terra é inferior a 61% da irradiação solar incidente no topo da atmosfera.

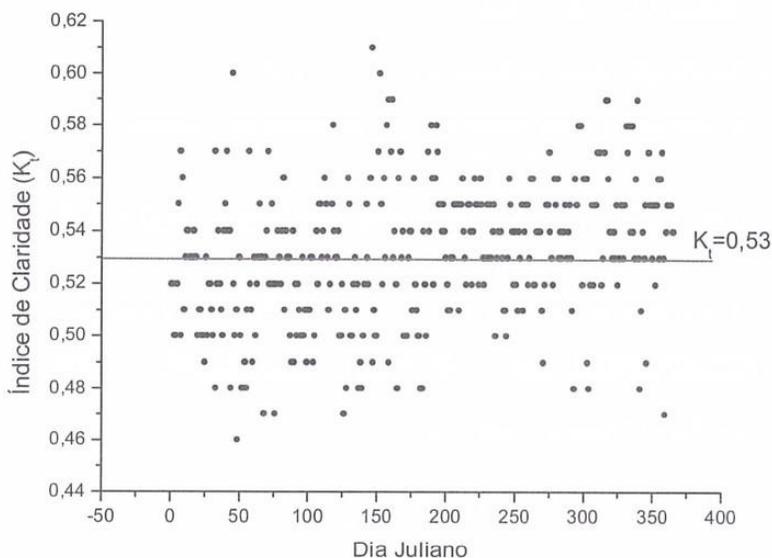


GRÁFICO 1 – ÍNDICE DE CLARIDADE DIÁRIO MÁXIMO (K_t), PARA O PERÍODO DE 1983 A 1998, PARA A REGIÃO DE CASCAVEL/PR.

O Gráfico 1 apresenta a distribuição do índice de claridade máximo diário obtido no período de 1983 a 1998.

Num estudo de frequência, com o índice de claridade máxima, para uma distribuição diária, apresentado no Gráfico 2, temos 58 ocorrências de $K_t=0,54$, sendo que 92% dos índices de claridade máximos estão entre 0,50 e 0,58. A média diária é de 0,53; para partição quinzenal a média é de 0,57; na mensal de 0,59 e na sazonal de 0,57. A média diária do índice de claridade (K_t) confirma os resultados alcançados por VALIATI (2001) para Cascavel-PR, RICIERI (1998) para Botucatu/SP e CAMARGO e SILVEIRA (1999) para Pelotas-RS.

Foram considerados como os melhores dias para avaliação do potencial de energia solar os que tiveram índice de claridade igual ou superior a 0,50, durante o período de 1983 a 1998, e que o valor de insolação lido no heliógrafo foi maior ou igual a 75% do número de horas de brilho solar no topo da atmosfera.

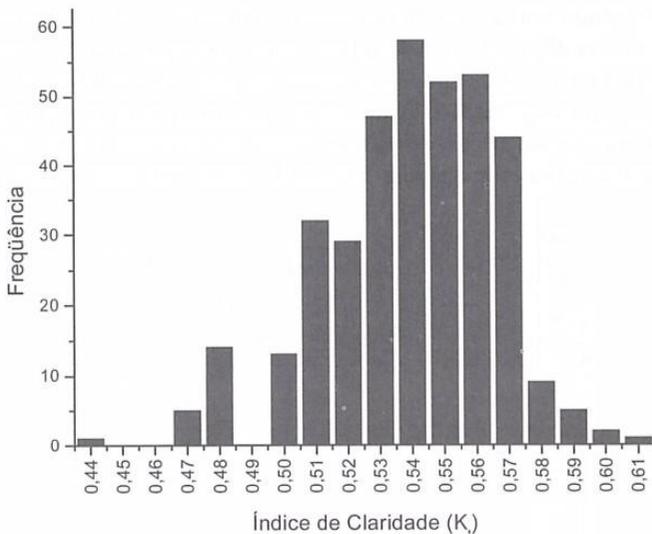


GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO ÍNDICE DE CLARIDADE DIÁRIO MÁXIMO NO PERÍODO DE 1983 A 1998 PARA O MUNICÍPIO DE CASCAVEL-PR

3.2. PARTIÇÃO MENSAL

Os valores mensais estimados da irradiação solar no topo da atmosfera (R_0) e os valores medidos pelo actinógrafo do potencial de energia solar (R_{gmo}), expressos em $MJ.m^{-2}$, para Cascavel-PR, encontram-se na Tabela 1, onde temos que a irradiação solar global variou de $14,23 MJ.m^{-2}$ em junho a $26,20 MJ.m^{-2}$ em dezembro, com média de $20,57 MJ.m^{-2}$. Os valores são coerentes aos obtidos por VALIATI *et al.* (2001) para a mesma localidade.

TABELA 1 – VALORES ESTIMADOS PARA IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA (R_0), E OS VALORES MEDIDOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÁXIMA (R_{gmo}) EM $MJ.m^{-2}$, ÍNDICE DE CLARIDADE (K_t), PARA O MUNICÍPIO DE CASCAVEL-PR, PARA A PARTIÇÃO MENSAL.

MÊS	R_0	R_{gmo}	K_t
Janeiro	43,03	24,36	0,56
Fevereiro	41,72	24,48	0,60
Março	38,84	21,13	0,57
Abril	33,74	17,58	0,58
Mai	25,90	15,90	0,61
Junho	24,16	14,23	0,59
Julho	26,56	14,94	0,59
Agosto	31,95	17,83	0,59
Setembro	37,30	21,26	0,57
Outubro	41,12	23,98	0,61
Novembro	42,19	24,99	0,60
Dezembro	43,11	26,20	0,61

Pelo estudo realizado e pelas características da região de Cascavel-PR durante os meses de fevereiro e de março, o potencial de energia solar descreve um pico no Gráfico 3, que pode ser explicado pelo maior número de dias com o céu limpo para esta região. A média da umidade relativa do ar em 75%, provoca alterações na irradiação solar global em relação a uma curva ideal proporcional a curva traçada pela irradiação solar que chega ao topo da atmosfera.

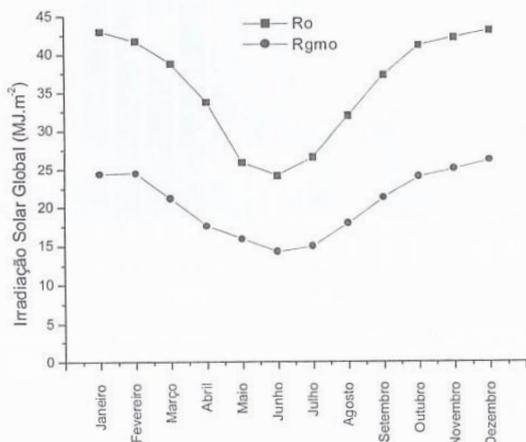


GRÁFICO 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES ESTIMADOS PARA A IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA (R_0) E DOS VALORES MEDIDOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL (R_{gmo}) PARA CASCAVEL-PR, EM $MJ.m^{-2}$, PARA PARTIÇÃO MENSAL.

3.2. PARTIÇÃO QUINZENAL

Para a partição quinzenal, os valores estimados da irradiação solar no topo da atmosfera (R_0) e os valores medidos pelo actinógrafo da irradiação solar global máxima (R_{gmo}), expressos em $MJ.m^{-2}$, para Cascavel-PR, encontram-se na Tabela 2.

Para os valores medidos da irradiação solar global máxima de 13,39 $MJ.m^{-2}$ (2ª quinzena de junho) e 26,20 $MJ.m^{-2}$ (1ª quinzena de dezembro), com média de 20,05 $MJ.m^{-2}$.

Para a distribuição quinzenal, temos um maior incremento do potencial de energia solar para a 1ª quinzena de fevereiro e para a 2ª quinzena de maio, conforme a Gráfico 4, fato característico da região de Cascavel-PR devido ao maior número de dias com céu limpo (aberto, poucas nuvens) CASCAVEL (2001). Comparando esse resultado com os obtidos por VALIATI (2001) e GRIGOLETO *et al.* (2001) para Cascavel-PR e por RICIERY (1998) para Botucatu-SP, pode-se concluir que o potencial de energia solar é específico para cada região.

Quinzena	R_0	R_{gmo}	K_t
01 - 15 jan	43,03	24,36	0,56
16 - 31 jan	42,56	23,19	0,54
01 - 15 fev	41,72	24,48	0,60
16 - 29 fev	40,50	22,18	0,56
01 - 15 mar	38,84	21,13	0,57
16 - 31 mar	36,57	19,75	0,57
01 - 15 abr	33,74	17,58	0,53
16 - 30 abr	30,91	16,86	0,58
01 - 15 mai	28,20	15,23	0,56
16 - 31 mai	25,90	15,90	0,64
01 - 15 jun	24,16	14,23	0,59
16 - 30 jun	23,52	13,39	0,57

Quinzena	R_0	R_{gmo}	K_t
01 - 15 jul	24,56	14,06	0,59
16 - 31 jul	26,56	14,94	0,58
01 - 15 ago	28,98	16,86	0,59
16 - 31 ago	31,95	17,83	0,57
01 - 15 set	34,75	19,79	0,58
16 - 30 set	37,30	21,26	0,57
01 - 15 out	39,42	23,52	0,61
16 - 31 out	41,12	23,98	0,59
01 - 15 nov	42,19	24,99	0,60
16 - 30 nov	42,83	24,94	0,58
01 - 15 dez	43,11	26,20	0,61
16 - 31 dez	43,11	24,69	0,57

TABELA 2 – VALORES ESTIMADOS PARA O POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR (R_{gme}) E PARA IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA (R_0), E OS VALORES MEDIDOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÁXIMA (R_{gmo}) EM MJ.m⁻², ÍNDICE DE CLARIDADE (K_t) E ERRO, PARA O MUNICÍPIO DE CASCAVEL-PR, PARA A PARTIÇÃO QUINZENAL.

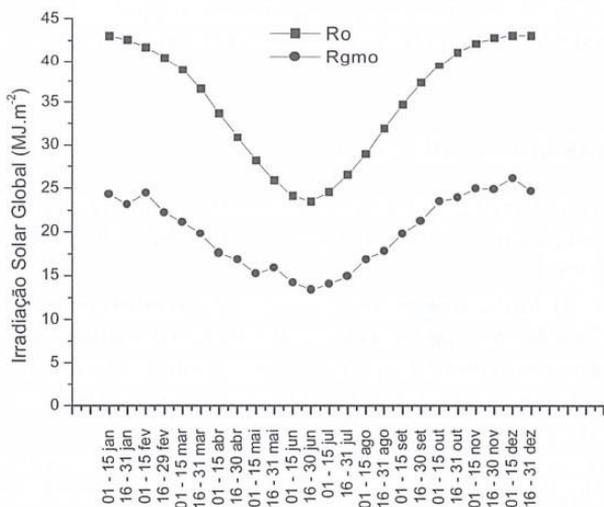


GRÁFICO 4 – DISTRIBUIÇÃO DA ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA (R_0), DO POTENCIAL DE ENERGIA SOLAR (R_{gme}), E DOS VALORES MEDIDOS DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MÁXIMA (R_{gmo}), PARA O MUNICÍPIO DE CASCAVEL-PR, EM MJ.m⁻², PARA PARTIÇÃO QUINZENAL.

4. CONCLUSÃO

1. Com os valores de potencial de energia solar será possível a avaliação do máximo desempenho possível de sistemas de captura de energia, sendo, portanto, indispensável no planejamento de projetos de engenharia que visam o aproveitamento de energia solar em suas mais variadas formas, além de aprimorar os estudos relativos ao máximo de evapotranspiração, e a radiação solar como fonte de energia das plantas e limitadora de produtividade, conforme as características do cultivar.

2. O índice de claridade local máximo (K_l) apresentou limite inferior de 0,56 em janeiro e superior de 0,61 em maio, alcançando uma média anual de 0,59; verificou-se que em 92% dos dias com céu completamente limpo o índice de claridade variou de 0,50 a 0,58.

3. O potencial de energia solar variou de 14,72 MJ.m⁻² em junho, a 27,22 MJ.m⁻² em dezembro, sendo a média anual de 17,14 MJ.m⁻², na partição mensal.

4. O potencial de energia solar variou de 13,39 MJ.m⁻² na 2ª quinzena de junho, a 26,20 MJ.m⁻² na 1ª quinzena de dezembro.

AGRADECIMENTO

Ao IAPAR, Instituto Agrônomo do Paraná, Área de Ecofisiologia, pelo fornecimento dos dados para a realização deste trabalho.

A UNIOESTE, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Cascavel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSIS, F.N.; et al. Aplicabilidade de modelos de estimativa da radiação solar global. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 91-97, 1998.
- BARBIERI, V.; **Condicionamento climático da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) um modelo matemático fisiológico de estimativa**. Piracicaba, 1994. 133p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo
- CAMARGO, C.G.; SILVEIRA, V.P. Análise da disponibilidade da radiação solar global da cidade de Pelotas-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9; 1999, Florianópolis, *Anais...* Florianópolis 1999. p.515-519.
- CASCADEL, 2001. Disponível em: <http://www.br/celepar/seet/prtur/cidades/cascavel/index.html>. Acessado em 17/05/2001

- DIDONET, A. D.; et al. **Taxa de crescimento de grãos e radiação solar global incidente em cinco épocas de plantio de milho**. Centro de pesquisa de trigo/EMBRAPA/RS, 1998. Disponível em : <http://www.cnpt.embrapa.br/agromet.htm>. Acesso em 26 de Setembro de 2001.
- GRIGOLETO, M. W.; et al. Estimativa do potencial máximo de energia solar mensal para o município de Cascavel. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12. REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 3, 2001, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis: 2001. p. 232-233. 1 CD-ROM.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 387 p.
- KOPPEN, W. **Climatologia com un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948.
- MOREIRA, M.A.; et al. Eficiência do uso da radiação e índice de colheita em trigo submetido a estresse hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. **Scientia Agricola**, Piracicaba. v.56, n.3. p.56-67, 1999.
- PARANÁ 12 MESES- Programas e Projetos Anteriores. Disponível na Internet. <http://www.pr.gov.br/celepar/seab/aspectos/aspectos.html>. Acesso 20/11/2000.
- RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. Botucatu, 1998. 81 fls. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva**. São Paulo: Nobel, 1992.
- VALIATI, M. I.; **Estimativa da irradiação solar global com diferentes partições para a região de Cascavel**. Cascavel, 2001, 53 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agroindustriais) Centro de Ciências Exatas - Universidade do Oeste do Paraná .
- VALIATI, M. I. et al. ; Equações de estimativa da irradiação solar global diária para a região de Cascavel. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, _____ , p. 125-128. 1 CD-ROM.