UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

COMPORTAMENTO E CORREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA OBTIDA COM O ANEL DE SOMBREAMENTO

PATRICIA APARECIDA DE OLIVEIRA DRECHMER

CASCAVEL – Paraná – Brasil Agosto – 2005

PATRICIA APARECIDA DE OLIVEIRA DRECHMER

COMPORTAMENTO E CORREÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA OBTIDA COM O ANEL DE SOMBREAMENTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Energia na Agroindústria.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Prandini Ricieri

CASCAVEL – Paraná – Brasil Agosto – 2005

Esta conquista é dedicada ao meu esposo, Eduardo Luiz Drechmer, que tem feito minhas dores mais amenas, minhas esperanças mais doces e minha vida muito mais feliz.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de sonhar e realizar o sonho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico -CNPq, pela aprovação de auxílio financeiro (Apa – 42.0094/99-7).

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio institucional para a realização desta pesquisa.

Ao Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, em particular ao professor Dr. Paulo Henrique Caramori, pela contribuição instrumental e teórica.

Ao professor Dr. Reinaldo Prandini Ricieri, pela orientação e pelo comprometimento.

Ao professor Rivanildo Dallacort, pela coleta dos dados e atenção dispensada.

Aos colegas que se transformaram em grandes amigos: Dione, Veruschka, Clementina, Mário e Kelly, pelo apoio incondicional e pela amizade.

A todos os meus professores, co-autores dessa conquista tão grandiosa.

iii

SUMÁRIO

LISTAS	DE TABELASv	⁄i	
LISTAS DE FIGURAS vii			
RESUN	ЛОх	ci	
ABSTR	ACTxi	ii	
1	INTRODUÇÃO	1	
2	REVISÃO DE LITERATURA	3	
2.1	A RADIAÇÃO SOLAR	3	
2.2	RADIAÇÃO SOLAR NA AGRICULTURA	4	
2.3	MÉTODOS PARA MEDIR A RADIAÇÃO DIFUSA NUM PLANO)	
	HORIZONTAL	5	
2.3.1	O Método Padrão	5	
2.3.2	O Método do Disco de Sombreamento	3	
2.3.3	O Método do Anel de Sombreamento	7	
2.4	RADIAÇÃO DIFUSA EM UM PLANO INCLINADO10)	
2.5	ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt) E RAZÃO DA IRRADIAÇÃO DIFUSA	١	
	(Kd) DIÁRIOS1	1	
2.6	MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO DIFUSA (Kd) EM	1	
	FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt)12	2	
2.7	OUTROS PARÂMETROS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DA FRAÇÃO)	
	DIFUSA15	5	
2.8	PARTIÇÕES DOS MODELOS16	3	
3	MATERIAIS E MÉTODOS18	3	
3.1	LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO18	3	
3.2	INSTRUMENTOS, MÉTODOS E MEDIDAS	9	
3.2.1	Radiação Solar Global19	9	
3.2.2	Radiação Solar Difusa19	9	
3.2.3	Radiação Solar Direta22	1	
3.2.4	Horas de Brilho Solar22	1	
3.2.5	Aquisição dos Dados22	2	
3.3	CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DO CÉU	3	

3.4	A FUNÇÃO NUMÉRICA DE RICIERI23	
3.5	A PARTIÇÃO DOS MODELOS24	
3.6	O CÁLCULO DAS IRRADIAÇÕES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA24	
3.7	EQUAÇÕES UTILIZADAS25	
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	
4.1	NÍVEIS DAS IRRADIAÇÕES DIFUSA PADRÃO, DIRETA E GLOBAL	
	NA CIDADE DE CASCAVEL	
4.2	MÉDIAS MENSAIS DO ÍNDICE DE INSOLAÇÃO	
4.3	ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt)	
4.4	RAZÃO DA IRRADIAÇÃO DIFUSA (K_d)	
4.5	CLASSIFICAÇÃO DO CÉU EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE	
	CLARIDADE, PARA A CIDADE DE CASCAVEL	
4.6	AVALIAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DE DRUMMOND (1956)35	
4.7	FUNÇÃO NUMÉRICA GLOBAL DE RICIERI41	
4.7.1	Desvios Relativos Diários da Função Numérica Global de RICIERI	
	(1998)43	
4.7.2	Níveis Médios Mensais da Irradiação Difusa45	
4.8	FUNÇÕES NUMÉRICAS PARCIAIS DE RICIERI46	
4.9	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO54	
4.10	UNIVERSALIZAÇÃO DAS FUNÇÕES NUMÉRICAS DE RICIERI	
	(1998)	
5	CONCLUSÕES	
REFERÊNCIAS		

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 -	Desvios relativos médios da irradiação difusa, obtidos pelas
	correções de DRUMMOND (1956) e funções parciais de RICIERI
	(1998)54
Tabela 2 -	Desvios relativos da irradiação solar difusa para a correção de
	DRUMMOND (1956) e funções numéricas de RICIERI (1998),
	para as três condições de cobertura do céu65
Tabela 3 -	Funções numéricas parciais, para Botucatu-SP e Cascavel-PR .67
Tabela 4 -	Desvios relativos médios encontrados por meio das funções
	numéricas parciais deduzidas para Botucatu-SP e
	Cascavel - PR, ajustadas aos dados desta última67

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Estação Experimental Agrometeorológica de Cascavel18
Figura 2 -	Piranômetro utilizado na medição da radiação global (a) e
	piranômetro (b) sombreado pelo anel, utilizado na medição da
	radiação difusa20
Figura 3 -	Pireliômetro EPPLEY-NIP (a), acoplado a um rastreador solar
	EPPLEY ST-1 (b)21
Figura 4 -	Heliógrafo WILH LAMBRECHT KG GÖTTINGEN22
Figura 5 -	Coletor de dados CAMPBELL SCIENTIFIC-INC, modelo CR10X22
Figura 6 -	Média diária mensal das radiações global (R _G), direta projetada no
	plano horizontal (R_D), difusa padrão (R_d) e radiação incidente no
	topo da atmosfera (R_o), entre janeiro e dezembro de 200128
Figura 7 -	Médias diárias mensais das razões da irradiação global, direta e
	difusa pela irradiação incidente no topo da atmosfera
Figura 8 -	Médias mensais da insolação relativa31
Figura 9 -	Distribuição diária da razão entre as irradiações global e incidente
	no topo da atmosfera32
Figura 10 -	Distribuição diária da razão entre as irradiações difusa e global .33
Figura 11 -	Distribuição das irradiações global, difusa e direta na horizontal,
	em função do índice de claridade (K _t)34
Figura 12 -	Desvio relativo diário entre as medidas da radiação difusa obtida
	através dos métodos padrão e anel corrigido pelo fator de
	DRUMMOND (1956)
Figura 13 -	Distribuição de freqüência dos desvios relativos da radiação
	difusa entre os métodos padrão e anel corrigido pelo fator de
	DRUMMOND (1956)
Figura 14 -	Desvio relativo entre as medições da irradiação difusa pelos
	métodos da diferença e anel, corrigido pelo fator de DRUMMOND,
	para K _t < 0,337

- Figura 18 Desvio relativo entre as medidas da radiação solar difusa obtida através dos métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para K_t > 0,6540
- Figura 19 Desvios relativos da radiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido por DRUMMOND, para K_t > 0,6541
- Figura 20 Correlação entre a irradiação difusa medida pelo método padrão e pelo anel de sombreamento sem correção, para Cascavel PR .42

- Figura 25 Desvio relativo diário entre as medidas da irradiação difusa através dos métodos padrão e anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), quando K_t < 0,349</p>

- Figura 26 Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), quando K_t < 0,350</p>
- Figura 27 Desvio relativo entre as medidas da irradiação difusa através do método padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para 0,3 ≤ K_t ≤ 0,65......51
- Figura 28 Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para 0,3 ≤ K_t ≤ 0,65 ...51
- Figura 29 Desvio relativo entre as medidas da irradiação difusa através do método padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para K_t > 0,6552
- Figura 30 Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para K_t > 0,65......53
- Figura 32 Dispersão dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para o período de validação56
- Figura 33 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu nublado (Kt < 0,3)......57</p>
- Figura 34 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu nublado (Kt < 0,3)58</p>
- Figura 35 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu nublado (K_t < 0,3)59</p>
- Figura 36 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator

de DRUMMOND (1956), para céu parcialmente nublado $(0,3 \le K_t \le 0,65)$60

- Figura 37 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado (0,3 ≤ K_t ≤ 0,65).....61
- Figura 39 Desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND, para céu limpo (K_t > 0,65)62
- Figura 40 Desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu limpo (K_t > 0,65)......63
- Figura 41 Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu limpo (Kt > 0,65) .64

RESUMO

O presente estudo caracteriza o comportamento da radiação solar global, direta e difusa na cidade de Cascavel, classifica o tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade e avalia a aplicabilidade da função numérica de RICIERI (1998) na correção da radiação solar difusa obtida com do anel de sombreamento. As componentes da radiação solar foram monitoradas durante o período de 3 de janeiro de 2001 a 14 de fevereiro de 2003 na Estação Experimental Agrometeorológica da UNIOESTE, Campus de Cascavel. Na medição da radiação global e difusa foi utilizado um piranômetro KIPP & ZONEN-CM3 e para medir a componente direta foi utilizado um pireliômetro EPPLEY-NIP acoplado a um rastreador solar. A radiação difusa foi monitorada de duas formas: através da diferença entre a radiação global e a radiação direta projetada no plano horizontal e através de um piranômetro sombreado por um anel. Os níveis médios mensais das irradiações global, direta na incidência e difusa, foram respectivamente, 51,8%, 31,7% e 20,17% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os níveis da irradiação difusa medidos pelo método da diferença e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956) foram monitorados e comparados utilizando o desvio relativo diário. Foi verificado que, em 94% dos dias, a radiação difusa corrigida por DRUMMOND foi inferior à obtida pelo método padrão. Os desvios são maiores para dias de céu limpo (19,82%), que para céu parcialmente nublado (9,55%) ou nublado (2,68%). Foi empregado o método de correção sugerido por RICIERI (1998), que propõe a correlação entre a irradiação difusa sem correção e a irradiação difusa de referência, e a função numérica linear R_d=0,16545+1,21715R'_d foi proposta. Essa correlação melhora em cerca de 37% a correção da fração difusa, diminuindo o desvio relativo médio de 11,79%, calculado para o método de DRUMMOND, para 7,37%. As funções numéricas parciais, propostas em função do tipo de cobertura do céu, diminuem significativamente o valor do desvio relativo médio, guando comparada ao fator de correção de DRUMMOND: 4,80% para céu limpo, 4,66% para céu parcialmente nublado e 4,60% para céu nublado, sendo o desvio relativo médio igual a 4,68%. A radiação solar difusa medida em Cascavel - PR e corrigida com as funções numéricas de RICIERI, determinadas para a região do município de Botucatu - SP, mostraram desvios relativos médios para dias de céu nublado, parcialmente nublado e limpo, respectivamente, 4,60%, 4,80% e 5,29%, sugerindo que estas tendem a independer da localidade.

Palavras-Chave: Radiação solar difusa, índice de claridade, anel de sombreamento, fator de correção de DRUMMOND.

ABSTRACT

This paper shows the comportment of solar radiation global, direct and diffuse radiation at Cascavel, classifies the sky's cover in function of the cloudiness index and studies the applicability of the numeric correction of RICIERI (1998) on diffuse radiation measured with a shadow ring. The research was done at meteorological experimental station of UNIOESTE, Cascavel. The solar radiation components were monitored from January 03, 2001 to February 14, 2003. The global radiation was monitored bv pyranometer а KIPP & ZONEN-CM3 and the direct radiation were monitored by a pyrheliometer EPPLEY-NIP coupled to a solar tracer. The diffuse radiation was monitored by the difference between global radiation and direct radiation projected over the horizontal surface and by a pyranometer covered by a shadow ring. The monthly average levels of the global, direct and diffuse irradiations were 51,8%, 31,7% and 20,17% of the irradiation over the atmosphere's top. The diffuse irradiation measured by the difference method and by the shadow ring method corrected by DRUMMOND's factor and compared through the relative daily deviation. It was observed that, in 94% of the days, the diffuse radiation by DRUMMOND's factor was lower than the difference method. The deviations were higher for cloudless days (19,82%), than for partially cloudy days (9,55%) and cloudy days (2,68%). The RICIERI's correction (1998), that proposes the correlation of diffuse irradiation without correction with the diffuse irradiation by the difference method, was used and the linear function $R_d=0,16545+1,21715R'_d$ was found to correct the diffuse by the shadow ring method. This correction increases the precision of the diffuse fraction obtained by shadow ring, decreasing the average relative deviation from 11,79%, when the DRUMMOND's correlation was applied, to 7,37%. In order to increase the model's precision, it was proposed the partial numeric equation fitted in function of the sky's cover. It was verified decrease mean values of relative deviation, when compared with the DRUMMOND's correction: 4,8% in cloudless sky, 4,66% in partially cloudy sky and, 4,6% in cloudy sky. The average relative deviation was 4,68%. The diffuse solar radiation measured on Cascavel-PR and corrected by RICIERI's numeric function, determined to region of Botucatu - SP, shows relative deviation to cloudy sky, partially cloudy sky and cloudless sky, respectively, 4,6%, 4,8% and 5,29%, suggesting that the functions developed to Botucatu - SP tend to be independent from the locality.

KEY-WORDS: Diffuse solar radiation, clearness index, shadow ring, Drummond's correction.

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente sobre a superfície terrestre é um dos fatores determinantes da produção agrícola. O fato de se constituir num recurso não controlado na natureza, gera um interesse maior pelo seu conhecimento como elemento meteorológico, pois ele é essencial na escolha adequada de culturas capazes de melhor se adaptarem às condições de cada região.

A radiação solar global, ao atravessar a atmosfera, passa pelo processo de absorção e reflexão. A parcela da radiação solar que interage com a massa ótica é denominada radiação difusa, enquanto que a radiação que incide diretamente sobre a superfície do solo é chamada radiação direta.

Em valores médios, cerca de 51% de toda a radiação incidente no topo da atmosfera alcança o solo. Destes, cerca de 26% chega à superfície na forma de radiação difusa e 25% na forma de radiação direta (OMETTO, 1981). Isso significa que, qualquer que seja a inclinação da superfície em questão, ela receberá no mínimo 26% da radiação solar na forma de radiação difusa. Considerando-se esses índices, verifica-se a grande importância do conhecimento da componente difusa da radiação solar.

A radiação difusa é obtida raramente, devido à dificuldade em sua medição, sendo ainda inédita no estado do Paraná. No método tido como padrão são utilizados um pireliômetro e um piranômetro acoplado a um rastreador solar, no qual são medidas as radiações global e direta na incidência, respectivamente. A partir da diferença entre as radiações global e a direta projetada na horizontal, obtém-se a radiação difusa. No entanto, esse método é muito pouco utilizado, devido aos elevados custos dos instrumentos e à necessidade de calibrações constantes. Por não utilizar rastreadores solares, o método do sombreamento por anel possui menor custo e, por isso, é mais utilizado. Nesse método, um piranômetro é posicionado na área sombreada de um anel fixo: a irradiação direta é interceptada, permitindo apenas a detecção da irradiação difusa. No entanto, vários estudos mostram que o método do anel

de sombreamento subestima a medida da irradiação difusa, o que indica que além da direta, uma parcela da irradiação difusa também é interceptada, obrigando a utilização de fatores de correção. A comparação da irradiação difusa medida com o anel de sombreamento com a obtida pelo método de referência mostra que, mesmo utilizando um fator de correção, o método do anel de sombreamento não é preciso, o que o torna muito questionado.

Vários pesquisadores desenvolveram fatores de correção para a radiação solar difusa medida por meio do anel de sombreamento: DRUMMOND (1956), ROSSI (1975), LEBARON, PETERSON e DIRMHIRN (1980), BATLLES, OLMO e ALADOS-ARBOLEDAS (1995) e RICIERI (1998), entre outros.

Face a essa realidade, foram estabelecidos como objetivos, para esta pesquisa:

- a) avaliar a utilização das funções numéricas de correção de RICIERI (1998), desenvolvidas para a latitude de Botucatu - SP, na correção da radiação solar difusa obtida pelo método do anel de sombreamento na localidade de Cascavel - PR;
- b) caracterizar os níveis das irradiações global, direta e difusa para a região de Cascavel;
- c) classificar o tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A RADIAÇÃO SOLAR

Ao se propagar na atmosfera, a onda eletromagnética depara-se com partículas suspensas, que atuam como espalhadoras e absorvedoras da radiação solar. Por esse motivo, apenas uma fração da radiação incidente no topo da atmosfera atinge a superfície da Terra. A radiação que alcança a superfície do solo é constituída de uma componente direta, que não sofre influência da massa ótica e incide na forma de feixes de raios solares paralelos, e de uma componente difusa, resultante da interação da radiação solar com gases e partículas existentes na atmosfera. A soma dessas duas componentes é denominada de radiação solar global.

A absorção e o espalhamento de energia são processos resultantes da interação entre a radiação solar e as partículas suspensas no ar. Ao atingir uma partícula, parte da energia incidente é absorvida e parte é refratada. A radiação absorvida interage com a estrutura molecular e passa a ser emitida em várias direções, atingindo outras partículas, tornando-se um processo contínuo na atmosfera e denominado de reflexões múltiplas. Através desse fenômeno, nuvens do tipo *cumulus* podem aumentar o valor da radiação solar que atinge o solo, chegando muitas vezes a ser maior que a incidente no topo da atmosfera. Já na presença de nuvens *stratus* baixa, a radiação solar incidente na superfície terrestre é reduzida fortemente.

Os fatores que influenciam a produção das plantas são divididos em três categorias: genéticos, fisiológicos e ecológicos. Os dois primeiros podem ser controlados através de melhoramentos genéticos, práticas de adubação e irrigação. Dentre os fatores ecológicos, a radiação solar destaca-se por influenciar fortemente o potencial da produção de uma região. Os processos de fotossíntese, crescimento da planta, aumento de peso úmido, reserva de açúcar, absorção de água e manutenção da temperatura dependem, sobretudo, da quantidade de radiação solar que incide sobre a planta. Tamanha é a importância do estudo da radiação que MONTEITH (1958) definiu a agricultura como sendo a exploração da radiação solar, desde que haja um suprimento de água e nutrientes para a manutenção e o crescimento das plantas.

A eficiência da utilização da radiação solar pode ser computada comparando-se o valor em calorias da matéria orgânica produzida por unidade de área cultivada com a radiação incidente na mesma área, durante o mesmo período. Segundo MOTA (1977), uma cultura comum converte cerca de 1% da radiação solar que recebe em matéria orgânica.

Vários pesquisadores comprovaram a relação entre a incidência da radiação solar e o rendimento dos grãos. DIDONET et al. (2004) verificaram essa relação no estudo de três variedades de milho híbrido e observaram que produtividades elevadas somente podem ser obtidas com alto nível de radiação incidente durante todo o ciclo da cultura, desde que nenhum outro fator seja limitante. A redução de 40 a 50% do rendimento de grãos na cultura de milho foi verificada por Fischer e Palmer (1994), citados por FANCELLI (2000), quando a radiação incidente sofreu um decréscimo de 50% no período compreendido entre 15 dias antes e 15 dias depois da fase de florescimento. CONFALONE, COSTA e PEREIRA (1998) estudaram o crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico e concluíram que a cultura de soja é capaz de compensar a redução da radiação com um aumento na eficiência de sua utilização.

A disposição do dossel vegetativo, entretanto, impede que a radiação solar incida diretamente sobre as folhas localizadas na sua porção interna. Sendo assim, a fração difusa da radiação possui maior efeito biológico nos vegetais do que a radiação direta, graças à distribuição mais uniforme da radiação entre as folhas inferiores e superiores do dossel vegetativo. A percentagem de radiação que se propaga no interior do dossel vegetativo varia em função do ângulo do sol, sendo que os valores obtidos ao nascer e imediatamente antes do pôr do sol são significativamente altos, devido à alta incidência de radiação difusa.

No estudo da radiação solar em estufas com coberturas de polietileno, RICIERI e ESCOBEDO (1996) verificaram que a radiação solar difusa interna se torna maior que a externa em períodos de céu aberto. Segundo MARTINEZ-GARCIA (1978), para dias claros com radiação difusa externa em torno de 20%, pode-se verificar valores superiores a 60% no interior da estufa.

2.3 MÉTODOS PARA MEDIR A RADIAÇÃO DIFUSA NUM PLANO HORIZONTAL

Habitualmente, três métodos são utilizados na medida da irradiação solar difusa em um plano horizontal: O método da diferença, os métodos de sombreamento por disco e do anel.

2.3.1 O Método Padrão

No método da diferença, ou método padrão, a radiação solar global é medida por um piranômetro e a radiação direta é medida simultaneamente por um pireliômetro acoplado a um rastreador solar. A radiação difusa é obtida pela

diferença entre as irradiâncias global e a direta projetada na horizontal. Neste sistema, o piranômetro é posicionado horizontalmente em uma superfície, e a radiação global (direta e difusa) incide sobre o sensor em todas as direções. O pireliômetro, por sua vez, é acoplado a mecanismos de rastreamento solar que capturam a radiação direta sob um ângulo de 90° em relação ao sensor. Desse modo, a incidência da radiação direta não pode ser imediatamente comparada à incidência da radiação global, sendo necessário a sua decomposição no plano horizontal. Essa decomposição é obtida ao multiplicar a radiação direta pelo cosseno do ângulo zenital.

Os sensores dos aparelhos de medidas da radiação global e direta são sensibilizados pela radiação incidente enquanto os dados são registrados no sistema micrologger e transferidos para um microcomputador, na forma de arquivo. Esses valores, em mV, são transformados em W/m², através da sua divisão pela constante do aparelho utilizado.

Com auxílio de um *software* adequado é possível calcular as integrações das curvas de irradiância nas partições de tempo desejável, obtendo-se os níveis de irradiação do período, em J/m².

Em seguida, a irradiação difusa (I_d) pode ser calculada pela diferença entre as irradiações global (I_G) e direta projetada no plano horizontal (I_{DN}), utilizando a fórmula:

$$I_d = I_G - I_{DN} \cos Z \tag{1}$$

Por utilizar um sistema de acompanhamento do sol, esse método é considerado razoavelmente preciso e considerado como método de referência, pois as variações da massa ótica não interferem significativamente nas medidas. Entretanto, sua utilização é restrita em função dos custos dos equipamentos e da manutenção operacional diária do rastreador solar.

2.3.2 O Método do Disco de Sombreamento

A componente difusa é medida por um piranômetro posicionado no plano horizontal e sombreado por um disco, que impede a incidência da radiação direta. O disco é associado a dispositivos de rastreamento solar, relativamente caros, e apresenta as mesmas desvantagens do método da diferença sem apresentar a mesma precisão, necessitando de correções. Por essas razões, as medidas da radiação solar difusa são feitas, geralmente, utilizando-se o método da diferença ou o método do anel de sombreamento.

Os estudos da radiação difusa empregando o método do disco de sombreamento são raros. No Brasil, o único estudo foi realizado na cidade de Botucatu, com o objetivo de desenvolver comparações entre os métodos do disco e anel de sombreamento e o método da diferença. Encontrou-se um desvio relativo médio na ordem de 7,1%, em relação ao método da diferença. Considerando-se o tipo de cobertura do céu, os percentuais do desvio relativo foram de 11,56% para dias de céu aberto, 4,8% para dias de céu parcialmente nublado e 2,43% para dias nublados.

2.3.3 O Método do Anel de Sombreamento

Uma técnica muito empregada é a medida da radiação solar difusa por um piranômetro coberto por um anel de sombreamento, fixado com seu eixo, alinhado na direção norte/sul e inclinado com um ângulo da latitude local em relação ao zênite. Como o anel não possui partes móveis, precisa somente de pequenos ajustes mecânicos diários para considerar as mudanças da declinação solar. Por ser um método simples e de baixo custo, é muito utilizado. Entretanto, devido ao fato do anel de sombreamento cobrir uma razoável parcela do céu, este desconsidera, junto com a radiação direta, uma significativa parcela da radiação difusa. A medida da radiação difusa obtida por esse recurso necessita de correções, no entanto, em geral, estas são derivadas de cálculos teóricos baseados em certas suposições, das quais a mais comum é a de que a radiância do céu é isotropicamente distribuída. Como essa suposição não é verificada, a correção geralmente conduz a erros consideráveis.

Muitos pesquisadores têm desenvolvido estudos para investigar esses erros. DRUMMOND (1956) desenvolveu uma equação que estima a fração da radiação difusa bloqueada pelo anel, utilizando dados obtidos na África do Sul. Atualmente este é o método que possui maior repercussão. São calculados em função da latitude local: a declinação solar e os parâmetros geométricos do anel e da isotropia da radiação difusa.

$$FCD = \left[1 - \frac{2L}{\pi R} \cos^3 \delta (t_0 \operatorname{sen} \phi \cdot \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \operatorname{sent}_0)\right]^{-1}$$
(2)

Em que:

R é o raio do anel (cm);

L é a largura do anel (cm);

 δ é a declinação solar (rad);

 ϕ é a latitude local (rad);

t₀ é o ângulo horário do por do sol (rad).

Observa-se, no entanto, a necessidade de uma correção adicional de 7% para dias claros e 3% para dias nublados, ou seja, por não considerar as variações de cobertura do céu, a anisotropia relacionada a dias de céu claro não foi prevista pelo método de correção de DRUMMOND (1956). Como conseqüência disso, muitos pesquisadores vêm procurando desenvolver novos modelos de correção que considerem a anisotropia, corrigindo melhor a medida da irradiação solar difusa através do método do anel de sombreamento.

Para uma série de dados da Finlândia, Rossi (1975), citado por PAINTER (1981), obteve experimentalmente um fator de correção isotrópico para céu limpo e nublado e ajustou, por meio de uma interpolação para essas duas condições de céu, um modelo para céu parcialmente nublado.

LEBARON, PETERSON e DIRMHIRN (1980), utilizando dados de Logan, Utah, estudaram a medição da irradiação difusa obtida pelo método do anel de sombreamento e desenvolveram um modelo matemático para céu limpo. Utilizaram um anel de sombreamento com sua face interior pintada de cinza e verificaram que ela reflete para o sensor do piranômetro uma parcela da radiação direta recebida, devido ao seu ângulo de inclinação. O fator de correção sugerido está de acordo com o modelo de DRUMMOND (1956) somente para as horas próximas ao meio dia. Nos períodos da manhã e da tarde os resultados obtidos são mais próximos dos reais. Para dias de céu nublado a perda da radiação difusa medida varia com a estação: durante os meses de inverno, quando apenas uma pequena parte do céu é coberta pelo anel, a perda é em torno de 3%, enquanto que no verão esse valor fica entre 8 e 10%.

BATLLES OLMO e ALADOS-ARBOLEDAS (1995) desenvolveram um modelo de correção para a cidade de Madri, Espanha, em função de quatro parâmetros: o ângulo zenital, índices de claridade, turbidez e parâmetros geométricos do anel de sombreamento. A partir de um modelo linear múltiplo, verificaram que a variável mais importante no fator de correção, depois dos parâmetros geométricos, é o índice de claridade. Comparando os valores da radiação difusa medida com o anel de sombreamento e os corrigidos com os fatores de DRUMMOND (1956), verificaram que o desvio médio relativo da radiação difusa medida foi, aproximadamente, 24,6%, sem considerar a correção; 13,6% utilizando o modelo de correção proposto por DRUMMOND (1956) e, aproximadamente, 6,0% para o modelo proposto. Resultados semelhantes foram obtidos utilizando-se o fator de correção de Madri na cidade de Almeria, que apresenta condições meteorológicas bem distintas.

Ao correlacionar a irradiação difusa obtida pelo método padrão e a irradiação difusa sem correção, RICIERI (1998) obteve funções numéricas de correção para o método do anel de sombreamento em função da cobertura do céu, para a cidade de Botucatu - SP. Verificou que o problema da anisotropia da radiação difusa é significativamente atenuado. Os desvios relativos da correção de DRUMMOND (1956) e das funções numéricas são, respectivamente: 8,91% e 4,63%, para céu claro; 9,26% e 3,05% para céu parcialmente nublado e 2,99% e 3,50% para céu encoberto. Na média, os desvios relativos, referentes às funções de correções específicas, foram 50% inferiores àquelas em que se usa o fator de correção de DRUMMOND (1956), representando um resultado altamente expressivo.

2.4 RADIAÇÃO DIFUSA EM UM PLANO INCLINADO

As medidas da radiação solar são geralmente obtidas para superfícies planas e horizontais. No entanto essa situação é raramente encontrada na natureza, sendo necessário o conhecimento da radiação solar incidente em superfícies orientadas em várias direções.

Originalmente, a radiação solar é medida em uma superfície horizontal, e, em seguida, as componentes direta e difusa da radiação global são projetadas sobre a superfície inclinada, utilizando para isso os recursos geométricos apropriados.

LIU e JORDAN (1961) estudaram a insolação diária em superfícies inclinadas perto da linha do equador, e verificaram que a radiação difusa, de acordo com as condições meteorológicas, sofre não só variação na intensidade como também na distribuição angular. Se a radiação difusa for assumida como isotrópica, então sua intensidade pode ser estimada pela equação:

$$Rd = \frac{1}{2}(1 + \cos\beta) \tag{3}$$

Em que, β é a inclinação da superfície, em graus.

Uma vez que a maioria das superfícies reflete radiação, os autores também estimaram a intensidade da radiação refletida do solo para superfícies inclinadas, em função da intensidade da radiação incidente e da sua refletividade do solo.

IQBAL (1983) estudou a incidência das radiações direta, difusa e global, nas partições horária e diária, em um plano inclinado. O pesquisador propôs um modelo de estimativa para cada condição de céu: isento de nuvens, parcialmente nublado e céu nublado.

O estudo da radiação difusa incidente sob um plano inclinado é relativamente raro, sendo inédito no Brasil.

2.5 ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt) E RAZÃO DA IRRADIAÇÃO DIFUSA (Kd) DIÁRIOS

As condições de cobertura do céu, em geral, são classificadas através do índice de claridade (K_t). Os valores do índice de claridade representam a fração da insolação diária extraterrestre transmitida através da atmosfera como radiação global. Esse índice é calculado pela razão entre a radiação global incidente na superfície da terra (R_G) e a radiação incidente no topo da atmosfera (R_o). Com o cálculo do índice de claridade é possível estabelecer uma indicação do grau de nebulosidade para uma determinada região. É verificado que para K_t próximo de um, a radiação incidente na superfície terrestre é muito próxima daquela incidente no topo da atmosfera, ou seja, a radiação não sofre grandes alterações na sua transmissão, indicando a condição do céu como limpo. Já para valores de K_t próximos a zero, a radiação incidente no topo da atmosfera, ou seja, a pela cobertura do céu, sugerindo céu coberto.

A classificação das condições do céu pelo índice de claridade é amplamente utilizada por pesquisadores da área, sendo verificados intervalos diferentes de K_t para cada localidade. Nos estudos realizados em Blue Hill, Massachusetts, LIU e JORDAN (1960) estabeleceram as condições do céu como nublado quando K_t < 0,3; parcialmente nublado quando K_t é compreendido entre 0,3 e 0,7 e céu limpo quando K_t > 0,7. REINDL, BECKMAN e DUFFIE (1990), em estudo que envolveu cinco localidades européias e norte-americanas, classificaram como céu nublado K_t < 0,35; parcialmente nublado quando 0,35 ≤ K_t ≤ 0,75 e céu limpo quando K_t > 0,75. JACOVIDES et al. (1996), em um estudo feito em Athalassa, Cyprus, classificaram as condições do céu como nublado, parcialmente nublado e limpo quando K_t < 0,2; 0,2 ≤ K_t ≤ 0,6 e K_t > 0,6, respectivamente. No entanto, na maioria dos casos, os pesquisadores apresentam os intervalos para cada localidade sem descrever a metodologia utilizada para obtê-los. Uma rara exceção encontrada na literatura é o trabalho de RICIERI (1998), que utiliza uma comparação

gráfica dos valores das irradiações global, difusa e direta na incidência normal, em função do índice de claridade, para obter os intervalos de K_t para Botucatu. Para valores de K_t compreendidos entre 0 e 0,3, as irradiações global e difusa são praticamente iguais e a irradiação direta é próxima de zero, situação que classificou como céu nublado; para K_t entre 0,3 e 0,65, encontrou alternância entre as irradiações difusa e direta, situação que estabeleceu como céu parcialmente nublado Para K_t acima de 0,65 verificou que a irradiação direta tende a se aproximar da irradiação global, enquanto a irradiação difusa tende a um mínimo, o que classificou como céu limpo. O pesquisador sugere a aplicação dessa metodologia em outras localidades, a fim de estabelecer comparações.

Os valores de K_d representam a fração da insolação diária global incidente na superfície terrestre como radiação difusa. Esse índice é calculado pela razão entre a radiação difusa e a radiação global incidentes na superfície da terra. Outra expressão utilizada por alguns pesquisadores é a relação entre a radiação difusa incidente na superfície terrestre e a radiação incidente no topo da atmosfera.

2.6 MODELOS DE ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO DIFUSA (Kd) EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt)

Um grande número de modelos matemáticos tem sido desenvolvido para estimar parâmetros atmosféricos como a turbidez, refletância de uma superfície, precipitação de água, temperatura e umidade relativa, entre outros. Uma área que tem se destacado são os modelos de estimativa da radiação direta e difusa, devido aos altos custos dos equipamentos utilizados na medição destas variáveis.

LIU e JORDAN (1960) verificaram que a variação da radiação solar diária incidente em uma superfície horizontal está intimamente relacionada com

a nebulosidade do local (céu limpo, parcialmente nublado ou nublado). Com base nesse fator, os pesquisadores relacionaram a razão entre as irradiações difusa e global incidentes na superfície da terra (K_d) com o índice de claridade (K_t), nas partições horária, diária e mensal. Os modelos sugeridos por LIU e JORDAN (1960) são amplamente utilizados devido ao fato de necessitarem apenas o índice de claridade (K_t) como variável explicativa, ou seja, a radiação difusa em uma determinada localidade pode ser estimada utilizando somente os dados da radiação global incidente na superfície terrestre. Os modelos de estimativas baseados no índice de claridade são conhecidos como correlações do tipo LIU e JORDAN (1960). A correlação obtida para a cidade de Blue Hill, Massachusetts, pelos pesquisadores, foi do tipo polinomial de terceiro grau e é descrita como:

$$K_{d} = 1,39 - 4,027K_{t} + 5,531K_{t}^{2} - 3,108K_{t}^{3}$$
⁽⁴⁾

para $0,30 \le K_t \le 0,70$.

Depois de 1960, vários pesquisadores estimaram a radiação difusa a partir do índice de claridade. Das regressões estudadas, o tipo polinomial é o mais freqüentemente utilizado, uma vez que a correlação pode ser melhor ajustada em função do grau do polinômio. Entre os pesquisadores que utilizaram este tipo de regressão destacam-se:

PAGE (1961) que utilizou os conceitos das correlações de LIU e JORDAN (1960) em localidades situadas entre as latitudes 40°N e 40°S e encontrou uma equação polinomial de primeiro grau:

$$K_d = 1,0 - 1,13K_t \tag{5}$$

RUTH e CHANT (1976) que utilizaram uma série de dados de sete anos para quatro estações do Canadá: Toronto, Ontário, Montreal e Quebec. O trabalho descreve a seguinte correlação:

$$K_d = 0.98$$
, para $K_t < 0.1$

$$K_{d} = 0,910 + 1,154K_{t} - 4,936K_{t}^{2} + 2,848K_{t}^{3}$$
(6)

para $0,1 \le K_t \le 0,7$

COLARES-PEREIRA e RABL (1979) que, usando séries de dados para cinco localidades dos Estados Unidos, propuseram uma correlação polinomial de quarto grau:

$$K_{d} = 0,99$$

para $K_t \leq 0,17$

$$K_{d} = 1,188 - 2,272K_{t} + 9,473K_{t}^{2} - 21,856K_{t}^{3} + 14,648K_{t}^{4},$$
(7)

para $0,17 < K_t \le 0,80$

ERBS, KLEIN e DUFFIE (1982) que, usando a mesma série de dados que COLARES-PEREIRA e RABL (1979), encontraram o modelo:

 $K_d = 1,00 - 0,09K_t$

para $K_t \leq 0,22$

$$K_{d} = 0,9511 - 0,1604K_{t} + 4,388K_{t}^{2} - 16,638K_{t}^{3} + 12,33K_{t}^{4}$$
(8)

para $0,22 < K_t < 0,80$

 $K_d = 0,165$

para $K_t \ge 0.80$

DAL PAI e ESCOBEDO (1999) propuseram um modelo de estimativa da radiação solar difusa na partição instantânea, para a cidade de Botucatu. O modelo encontrado foi:

$$Kd = -66,347K_t^{6} + 181,22K_t^{5} - 176,94K_t^{4} + 77,279K_t^{3} - 17,466K_t^{2} + 1,7579K_t + 0,9178$$
(9)

Embora grande parte dos pesquisadores utilize a regressão polinomial, para correlacionar a radiação difusa com o índice de claridade, alguns preferem utilizar outros tipos de modelos. É o caso de BRUNO (1978), que optou pelo modelo:

$$K'_{d} = aK_{t} + bsen(cK_{t})$$
⁽¹⁰⁾

SOLER (1988) verificou que a correlação encontrada para uma cidade não poderia ser aplicada para regiões de grandes dimensões em toda sua extensão, devido à variabilidade atmosférica e à diferença de latitude.

2.7 OUTROS PARÂMETROS UTILIZADOS NA ESTIMATIVA DA FRAÇÃO DIFUSA

Apesar da forte relação existente entre o índice de claridade e a radiação difusa, alguns pesquisadores verificaram que K_t não é a única variável explicativa de K_d. Apesar de terem proposto um modelo para a obtenção da radiação difusa em função apenas do índice de claridade, LIU e JORDAN (1960) verificaram que a variação da radiação solar diária incidente em uma superfície horizontal também sofre influência do vapor de água na atmosfera, poeira e ozônio. Um inconveniente com os modelos propostos em função apenas do índice de claridade é o alto erro associado à estimativa da fração difusa horária. A dispersão dos dados para Cabo Canaveral ilustra bem o problema: quando K_t = 0,5, a medida da fração difusa varia entre 0,2 e 1,0.

Pesquisadores como ERBS, KLEIN e DUFFIE (1982), ORGILL e HOLLANDS (1977) e SKARTVEIT e OLSETH (1987) sugerem que a correlação de LIU e JORDAN (1960) não é universal, sendo algumas vezes necessária a utilização de parâmetros regionais geográficos e climáticos para a estimativa da radiação difusa. REINDL, BECKMAN e DUFFIE (1990) utilizaram uma série de dados de 22 000 medidas horárias de cinco localidades européias e norte-americanas e verificaram que o índice de claridade, a altitude solar, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar influenciam significativamente a estimativa da radiação difusa para as localidades estudadas. A utilização desses parâmetros reduz o quadrado da soma residual em 14%, quando comparado com o modelo que utiliza apenas o índice de claridade. A correlação, incluindo apenas o índice de claridade e a altitude solar, diminui o quadrado da soma residual em 9%.

Utilizando uma série de dados de 17 meses, obtidos em Lagos, Nigéria, MADUEKWE e CHENDO (1997) verificaram a diminuição de 8,8% no erro encontrado no modelo de estimativa, quando o índice de claridade, a elevação solar e a turbidez atmosférica eram utilizados como parâmetros para o cálculo da radiação difusa.

Com uma série de dados de 32 anos de Bergen, Norway, SKARTVEIT, OLSETH e TUFT (1998) publicaram um modelo para a radiação difusa utilizando como parâmetros a elevação solar, o índice de claridade, um índice de variabilidade horário e o albedo da superfície local.

Os modelos descritos utilizam mais de uma variável explicativa para estimar a fração da radiação difusa. Esses modelos são descritos na literatura como regressões múltiplas e, embora apresentem um grau maior de dificuldade na sua utilização, em geral, apresentaram um melhor ajuste.

2.8 PARTIÇÕES DOS MODELOS

O estudo da radiação pode ser desenvolvido nas partições mensal, diária, horária e instantânea. A escolha da partição a ser estudada deve atender aos objetivos específicos de cada trabalho.

As nuvens apresentam variações significativas nos valores da irradiância solar registrada em um determinado ponto. Se elas evoluem

rapidamente, os valores da radiação instantânea mostram uma grande variabilidade quando as médias horárias ou diárias tendem a suavizar o instantâneo. Muitos comportamento autores. como SUEHRCKE е MCCORMICK (1988), SUEHRCKE e MCCORMICK (1992), GANSLER, KLEIN e BECKMAN (1995); TOVAR, BATLLES e PEREZ (1998) têm mostrado a conveniência de se usar intervalos temporais instantâneos (de 5 minutos) no estudo de sistemas fotovoltaicos, uma vez que estes são propostos para ocasiões nas quais se busca estudar a radiação incidente em um determinado momento. A estimativa da radiação difusa utilizando a partição instantânea foi desenvolvida por DAL PAI e ESCOBEDO (1999), para a cidade de Botucatu, e concluíram que o modelo proposto é considerado adequado guando comparado com as partições horária e diária, sendo que o mesmo segue a mesma tendência dos demais. No entanto, essa partição ainda é pouco utilizada em estudos de modelagem da fração difusa da radiação solar.

A partição horária é a mais comum nos modelos como o de LIU e JORDAN (1960). Nessa partição, além de se ter uma série de dados maior, a razão R_d/R_G é determinada com maior precisão, pois o tempo é menor, o que minimiza a variabilidade do meio atmosférico diário, provocada pela cobertura do céu, que é elevada durante o dia. Entre os pesquisadores que utilizaram essa partição para seus modelos encontramos: ORIGILL e HOLLANDS (1977), REINDL, BECKMAN e DUFFIE (1990), CHANDRASEKARAN e KUMAR (1994), SKARTVEIT e OLSETH (1987) e SRIVASTAVA et al. (1995), entre outros. Assim como a instantânea, a partição horária também é muito utilizada nas áreas de interesses dos fenômenos instantâneos da radiação solar, como aproveitamento da radiação solar.

Para aplicações agronômicas e climatológicas, nas quais a natureza dos fenômenos não é instantânea, as partições das irradiações global e difusa são freqüentemente representadas em intervalos de tempo maiores, como diários ou mensais. LIU e JORDAN (1960), COLLARES-PEREIRA e RABL (1979), RICIERI (1998), entre outros, utilizaram a partição diária. Como a partição média mensal exige séries de dados de vários anos, os trabalhos utilizando esta partição são encontrados em menor quantidade, como TULLER (1976), IQBAL (1983) e PAGE (1961).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

Os dados foram colhidos e cedidos pela Estação Experimental Agrometeorológica de Cascavel, apresentada na Figura 1, que coleta os níveis diários da radiação direta, global e difusa pelo método padrão e pelo método do anel de sombreamento. A Estação situa-se no *Campus* da cidade de Cascavel, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, com coordenadas 24°53' latitude Sul, 53°23' longitude Oeste e altitude 682 m.



Figura 1 - Estação Experimental Agrometeorológica de Cascavel

Os dados foram obtidos diariamente, das 8 às 17 horas, no período de 3 de janeiro de 2001 a 14 de fevereiro de 2003, totalizando 690 dias de dados analisados, sendo: 328 dias referentes ao ano de 2001, 320 dias referentes ao ano de 2002 e 42 dias referentes ao ano de 2003. O período de 15 de fevereiro de 2002 a 14 de fevereiro de 2003 foi destinado à validação do modelo. Os dias não totalizados referem-se à manutenção e calibração dos instrumentos.

Os 367 dias utilizados para a construção do modelo dividiram-se em 66 dias de céu nublado, 182 dias de céu parcialmente nublado e 119 dias de céu limpo. O período destinado à validação do modelo foi dividido em 56 dias de céu nublado, 159 dias de céu parcialmente nublado e 108 dias de céu limpo.

3.2 INSTRUMENTOS, MÉTODOS E MEDIDAS

Todos os instrumentos foram instalados a uma altura de 3 m do solo, com boa visão do horizonte.

3.2.1 Radiação Solar Global

A radiação global foi monitorada por um piranômetro KIPP & ZONEN-CM3, com constante de calibração igual a 18,99 μ V/W m⁻², posicionado em um plano horizontal.

3.2.2 Radiação Solar Difusa

A radiação difusa foi monitorada por dois métodos: diferença e anel de sombreamento:

Método padrão (ou método da diferença): a radiação difusa foi obtida pela diferença entre a radiação global e direta, projetada na horizontal, através da Equação (1), para cada ponto.

Método de sombreamento por anel: utilizou-se um anel com diâmetro externo de 80 cm por 10 cm de largura, alinhado na direção leste-oeste e inclinado no sentido norte, com um ângulo igual à latitude local (ϕ = 24°53'), sombreando um piranômetro KIPP & ZONEN, modelo CM-3¹, com constante de calibração igual a 20,31µV/Wm⁻².

A Figura 2 apresenta os piranômetros utilizados na medida das radiações global e difusa medida pelo método do sombreamento por anel.



Figura 2 - Piranômetro utilizado na medição da radiação global (a) e piranômetro (b) sombreado pelo anel, utilizado na medição da radiação difusa

Para manter o posicionamento do sensor no centro da faixa de sombra projetada pelo anel, a cada dia os piranômetros sobre a base móvel eram avançados. Esses deslocamentos tiveram como finalidade compensar a variação diária da declinação solar.

As citações de marcas comerciais dos materiais e equipamentos, ao longo deste trabalho, não constituem recomendação comercial, somente a identificação dos materiais e equipamentos para o registro da pesquisa.

3.2.3 Radiação Solar Direta

A radiação direta é monitorada na incidência normal por um pireliômetro EPPLEY-NIP¹, com constante de calibração igual a 8,4 μ V/Wm⁻², acoplado a um rastreador solar EPPLEY modelo ST-1, fixo na direção norte-sul e ajustado à latitude local, apresentado na Figura 3.



- Figura 3 Pireliômetro EPPLEY-NIP (a), acoplado a um rastreador solar EPPLEY ST-1 (b)
- 3.2.4 Horas de Brilho Solar

O número de horas de brilho solar diário incidente na superfície da Terra (n) foi obtido por heliógrafo WILH LAMBRECHT KG GÖTTINGEN do tipo 1603, mostrado na Figura 4.



Figura 4 - Heliógrafo WILH LAMBRECHT KG GÖTTINGEN

3.2.5 Aquisição dos Dados

Para a aquisição dos dados, utilizou-se um coletor de dados CAMPBELL SCIENTIFIC-INC, modelo CR10X, Figura 5, programado para realizar uma leitura por segundo e armazenar a média aritmética a cada cinco minutos dos dados das componentes da radiação solar global, direta e difusa.



Figura 5 - Coletor de dados CAMPBELL SCIENTIFIC-INC, modelo CR10X

A partir do arquivo de dados, foi elaborado um programa específico no *software* ORIGIN, para o seu tratamento, assim como da parte gráfica e os cálculos do fator de correção diário da radiação difusa, da hora do nascer e pôr do sol, da declinação solar, da irradiância solar no topo da atmosfera, do cosseno do ângulo zenital, da transformação da hora solar em hora local, das irradiações global, difusa e direta diárias na superfície.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DO CÉU

Os intervalos que caracterizam o céu como nublado, parcialmente nublado e limpo foram obtidos aplicando-se a metodologia sugerida por RICIERI (1998), que propõe uma comparação gráfica dos valores das irradiações global, difusa e direta na incidência normal em função do índice de claridade. O intervalo em que as irradiações global e difusa são praticamente iguais e a irradiação direta é próxima de zero foi classificado como céu nublado; o intervalo em que existe alternância entre as irradiações difusa e direta é classificado como céu parcialmente nublado e o intervalo em que a irradiação direta tende a se aproximar da irradiação global enquanto a irradiação difusa tende a um mínimo, o céu é classificado como limpo.

3.4 A FUNÇÃO NUMÉRICA DE RICIERI

No modelo proposto por RICIERI (1998), a irradiação difusa medida com o método do anel sem correção é relacionada diretamente com a
irradiação difusa, obtida pelo método da diferença através de regressão linear. O pesquisador admitiu a irradiação difusa obtida pelo método da diferença como correta, dentro das margens de erro estabelecidas pelos fabricantes do equipamento e que a função numérica somente seria válida para o local do experimento e com o anel nas mesmas condições geométricas, quanto à largura e diâmetro.

3.5 A PARTIÇÃO DOS MODELOS

Embora fosse possível realizar o estudo da radiação solar difusa utilizando outras partições, esta pesquisa utiliza a partição diária por se tratar da aplicação do método proposto por RICIERI (1998), elaborado para a cidade de Botucatu - SP.

3.6 O CÁLCULO DAS IRRADIAÇÕES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA

As irradiações global, direta e difusa diárias foram calculadas através da integração das curvas formadas pelas médias, a cada cinco minutos, dos valores das respectivas radiações.

Por se tratar de um estudo comparativo ao trabalho desenvolvido por RICIERI (1998), utilizou-se o mesmo intervalo diário: entre 8 e 17 horas. Esse intervalo foi utilizado em Botucatu - SP, devido ao fato da área experimental estar contida no meio de um declive, tendo o lado correspondente ao nascer do sol mais baixo que o lado em que o sol se põe. O desnível proporciona falta de simetria nas condições de medida da radiação solar, quando o sol passa pelo plano meridional da localidade.

3.7 EQUAÇÕES UTILIZADAS

A seguir são apresentadas as principais equações utilizadas nesta pesquisa:

O índice de claridade foi obtido pela razão entre a irradiação solar global (R_G) e a irradiação no topo da atmosfera (R_o), definido pela equação:

$$K_{t} = \frac{R_{G}}{R_{o}}$$
(11)

A razão da irradiação difusa K_d foi obtida pela razão entre a radiação difusa (R_d) e global (R_G), na superfície terrestre, pela equação:

$$K_d = \frac{R_d}{R_G} \tag{12}$$

A razão de insolação é a razão entre o total de horas de brilho solar diário na superfície da Terra (n) e o número máximo de brilho solar no topo da atmosfera (N), dada pela equação:

$$r = \frac{n}{N} \tag{13}$$

O número máximo de brilho solar incidente no topo da atmosfera (N), em horas, foi obtido utilizando a equação:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} \tag{14}$$

O desvio relativo diário foi calculado pela expressão:

$$\delta(\%) = \{ [(R_d)_{ref} - (R_d)_{med}] / (R_d)_{ref} \} \times 100$$
(15)

Em que:

 $(R_d)_{ref}$ é a radiação difusa obtida pelo método de referência;

 $(R_d)_{med}$ é a radiação difusa medida pelo método do anel de sombreamento corrigido pelo fator de correção de DRUMMOND (1956).

O coeficiente de determinação (R²) foi calculado pela expressão:

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} \times 100 \tag{16}$$

A declinação solar (δ), em graus, foi obtida pela equação:

$$\delta = 23,45 \cdot sen\left[\frac{360}{365}(284 + DJ)\right]$$
(17)

Em que, DJ é o dia Juliano.

O ângulo horário do nascer do sol (ω_s), em graus, foi obtido pela equação:

$$\omega_{\rm s} = \cos^{-1} \left(-tg\phi \cdot tg\delta \right) \tag{18}$$

Em que:

 ϕ é a latitude local em graus;

 δ é a declinação solar em graus.

O fator de correção da excentricidade da órbita terrestre foi obtido pela fórmula:

 $E_o = 1,000110 + 0,034221\cos\Gamma + 0,00128sen\Gamma + 0,000719\cos2\Gamma + 0,000077sen2\Gamma$ (19)

Sendo:

$$\Gamma = \frac{2\pi (DJ - 1)}{365,242} \tag{20}$$

A equação do tempo, dada em minutos, foi obtida através da fórmula:

 $E_{t} = (0,000075 + 0,00186 \cos \Gamma - 0,03207 sen \Gamma - 0,01461 \cos 2\Gamma - 0,0408 \sin 2\Gamma) \cdot 229,18$ (21)

A radiação solar no topo da atmosfera (Ro) foi dada por:

$$R_0 = 1367E_0(sen\phi sen\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega_s)$$
(22)

O cosseno do ângulo zenital é dado por:

$$\cos z_t = sen\delta sen\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega_s \tag{23}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 NÍVEIS DAS IRRADIAÇÕES DIFUSA PADRÃO, DIRETA E GLOBAL NA CIDADE DE CASCAVEL.

Na Figura 6 estão representadas as médias diárias mensais das irradiações global (R_G), direta (R_D) e difusa padrão (R_d), assim como a irradiação incidente no topo da atmosfera (R_o), obtidas a partir da média de todos os dias dos respectivos meses de 2001, verificadas na cidade de Cascavel - PR.



Figura 6 - Média diária mensal das radiações global (R_G), direta projetada no plano horizontal (R_D), difusa padrão (R_d) e radiação incidente no topo da atmosfera (R_o), entre janeiro e dezembro de 2001

No gráfico da Figura 6, é possível verificar que os índices da radiação solar incidente no topo da atmosfera são variáveis ao decorrer do ano. Entre o equinócio de outono (março) e o equinócio de primavera (setembro), a radiação incidente na superfície da terra é menor que a radiação incidente no período compreendido entre o equinócio de primavera e o equinócio de outono. Essa variação está diretamente relacionada à declinação solar, que é o ângulo formado entre a linha que une o sol ao centro da Terra e a linha que une o centro da Terra ao seu plano equatorial. Nos equinócios, o ângulo de declinação solar é zero, o que justifica o fato do dia e da noite terem a mesma duração. Já nos solstícios de verão e inverno, a declinação tem valores aproximadamente $23 \frac{1}{2}^{\circ}$ e $-23 \frac{1}{2}^{\circ}$, respectivamente, o que justifica as diferenças de incidência da irradiação no topo da atmosfera. A irradiação incidente no topo da atmosfera apresentou como limites: mínimo 20,93 MJ/m², verificado no mês de junho e máximo de 37,40 MJ/m², verificado no mês de dezembro.

Os comportamentos das radiações global e difusa padrão acompanham, em média, a radiação incidente no topo da atmosfera: os maiores índices são verificados nos meses de verão, enquanto os menores índices são verificados nos meses de inverno. A radiação global apresentou como limites: mínimo 10,86 MJ/m² e máximo 20,58 MJ/m², verificados nos meses de junho e dezembro, respectivamente. A irradiação difusa padrão apresentou como limites: mínimo 3 MJ/m² e máximo 8,67 MJ/m² para junho e janeiro, respectivamente. A irradiação direta na incidência normal apresentou como limites: mínimo 6,59 MJ/m² e máximo 12,75 MJ/m² para maio e outubro, respectivamente.

A Figura 7 apresenta as razões entre as médias mensais das irradiações global, direta e difusa obtida pelo método padrão com a irradiação incidente no topo da atmosfera. As variações encontradas entre as médias mensais das razões estudadas ocorrem devido à declinação solar e à nebulosidade. Os índices médios encontrados para a R_G/R_o, R_D/R_o e R_d/R_o foram, respectivamente, 51,89%; 32,72% e 20,17%. Ao relacionar a média mensal da irradiação global com a irradiação incidente no topo da atmosfera, verificou-se que mais de 50% da radiação que incidiu no topo da atmosfera

atingiu a superfície terrestre. A razão $R_G/R_o = 51,89\%$ define a transmissividade atmosférica média do local; $R_D/R_o = 32,72\%$ está relacionado à transmissividade efetiva e $R_d/R_o = 20,17\%$ está relacionado à difusão da atmosfera nessa localidade.



Figura 7 - Médias diárias mensais das razões da irradiação global, direta e difusa pela irradiação incidente no topo da atmosfera

4.2 MÉDIAS MENSAIS DO ÍNDICE DE INSOLAÇÃO

Na Figura 8 está representada a insolação relativa mensal, no período compreendido entre 3 de janeiro e 31 de dezembro de 2001. A insolação relativa média mensal (r) é definida como a razão entre o total de horas de brilho solar diário incidente na superfície da Terra (n) e o número máximo de brilho solar no topo da atmosfera (N). Quando a razão da insolação relativa tender a zero, a cobertura do céu tende ao máximo. O mês de fevereiro apresentou o menor índice de insolação relativa, seguido por janeiro e

novembro: 34,35%, 38,40% e 38,80%, respectivamente. O período foi caracterizado pela alta nebulosidade e pelos elevados índices da radiação difusa (R_d), que atingiram seu valor máximo em fevereiro, chegando a atingir 49,1% da radiação incidente na superfície terrestre. Quando a insolação relativa tende a um, o céu é denominado limpo. O mês de agosto apresentou maior índice de insolação relativa, seguido por junho e julho: 61,43%, 55,74% e 53,34%, respectivamente. Esse período foi caracterizado por dias de céu limpo e baixos índices da radiação difusa, sendo o menor índice registrado no mês de junho, quando atingiu 27,6% da radiação incidente na superfície.



Figura 8 - Médias mensais da insolação relativa

4.3 ÍNDICE DE CLARIDADE (Kt)

Na Figura 9 estão apresentados os valores de K_t, durante o período compreendido entre 3 de janeiro e 31 de dezembro de 2001.



Figura 9 - Distribuição diária da razão entre as irradiações global e incidente no topo da atmosfera

A amplitude do índice de claridade variou entre 0 e 0,8. Como não foram verificados valores de K_t superiores a 0,8, este constitui o limite máximo de claridade local. Isso sugere que 80% da radiação incidente no topo da atmosfera atingiu a superfície terrestre. O intervalo de K_t compreendido entre 0,8 e 0,6 é o que apresenta maior densidade dos pontos: 43,32%, seguido pelo intervalo de K_t entre 0,6 e 0,4, com 30,52%; K_t entre 0,4 e 0,2 com 16,07% dos pontos e, com menor incidência, o intervalo entre 0,2 e 0, com 10%.

4.4 RAZÃO DA IRRADIAÇÃO DIFUSA (K_d)

Na Figura 10 está representada a fração da radiação difusa transmitida na radiação global.



Figura 10 - Distribuição diária da razão entre as irradiações difusa e global

A dispersão dos dados de K_d , no mesmo período experimental, apresenta um intervalo com amplitude variando entre 0 e 1,0, ou seja, a radiação difusa incidente na superfície terrestre pode variar de 0 a 100% da radiação global incidente no mesmo local. A dispersão dos pontos não é completamente uniforme, mas é mais homogênea que a verificada nos dados de K_t : o intervalo de K_d compreendido entre 0,2 e 0,4, com 31% dos pontos, apresenta maior densidade, seguido pelos intervalos: 0 e 0,2 com 28%; 0,4 e 0,6 com 16%, 0,6 e 0,8 com 13% e, com menor incidência, o intervalo compreendido entre 0,8 e 1, com 12% dos pontos.

4.5 CLASSIFICAÇÃO DO CÉU EM FUNÇÃO DOS ÍNDICES DE CLARIDADE, PARA A CIDADE DE CASCAVEL

Na Figura 11 está representada a distribuição das irradiações global, difusa padrão e direta na horizontal em função do índice de claridade (K_t). No intervalo de K_t compreendido entre 0 e 0,3, as irradiações global e difusa são praticamente iguais e a irradiação direta é próxima de zero, o que classifica a cobertura do céu como nublado; para $0,3 \le K_t \le 0,65$ existe alternância entre as irradiações difusa e direta, o que classifica o céu como parcialmente nublado; para K_t acima de 0,65, a irradiação direta tende a se aproximar da irradiação global, enquanto a irradiação difusa tende a um mínimo, o que classifica o céu como limpo.



 Figura 11 - Distribuição das irradiações global, difusa e direta na horizontal, em função do índice de claridade (Kt)

Os intervalos do índice de claridade, caracterizando céu nublado, parcialmente nublado e limpo para a região de Cascavel – PR coincidem com os intervalos encontrados por RICIERI (1998), na cidade de Botucatu – SP, ou

seja, para ambas as localidades o céu foi caracterizado nublado, quando $K_t < 0,3$, parcialmente nublado quando $0,3 \le K_t \le 0,65$ e limpo quando $K_t > 0,65$.

4.6 AVALIAÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DE DRUMMOND (1956)

A Figura 12 mostra a distribuição dos desvios relativos diários entre as medições da radiação difusa, por meio dos métodos padrão e anel corrigido pelo fator de correção de DRUMMOND (1956).



Figura 12 - Desvio relativo diário entre as medidas da radiação difusa obtida através dos métodos padrão e anel corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956)

Os desvios relativos diários não apresentaram simetria à abscissa zero. A grande maioria dos pontos está localizada na parte superior, apresentando valores positivos. Ou seja, a radiação difusa obtida através do método padrão é, na maioria das vezes, superior à radiação difusa obtida pelo anel de sombreamento e corrigida pelo fator de correção de DRUMMOND (1956).

A curva de freqüência dos desvios apresentados na Figura 13 mostra que a distribuição dos desvios relativos entre os métodos não é simétrica em relação à linha que passa pela ordenada zero, sendo que, aproximadamente, de 94% dos dias estão localizados acima desta linha de referência. Em uma escala de desvios, 17% dos pontos encontram-se na faixa de \pm 5%; 25% encontram-se na faixa entre \pm 5% e \pm 10%; 26% encontram-se na faixa entre \pm 10% e \pm 15%; 14% encontram-se entre \pm 15% e \pm 20%; 7% encontram-se na faixa entre \pm 20% e \pm 25%, 8% encontram-se entre \pm 25% e \pm 35% e 3% encontram-se acima dos desvios de 35%. O desvio relativo médio total é de, aproximadamente 10,59%.



Figura 13 - Distribuição de freqüência dos desvios relativos da radiação difusa entre os métodos padrão e anel corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956)

Utilizando os intervalos do índice de claridade para a cidade de Cascavel - PR, foram calculados os desvios relativos diários para cada cobertura de céu: limpo, parcialmente nublado e nublado.

A Figura 14 mostra a distribuição dos desvios diários da radiação solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento corrigido pelo fator de correção de DRUMMOND (1956) em relação ao método de referência, para dias de céu nublado, ou seja, para dias em que $K_t < 0.3$. Em geral, os valores dos desvios relativos diários encontram-se dispostos em torno da linha zero.



Figura 14 - Desvio relativo entre as medições da irradiação difusa pelos métodos da diferença e anel, corrigido pelo fator de DRUMMOND, para K_t < 0,3</p>

A Figura 15 mostra a distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para o intervalo de K_t < 0,3. Dos 65 dias estudados, cerca de 84% apresentam desvios na faixa compreendida entre \pm 5%; 11% apresentam desvios na faixa compreendida entre \pm 5% e \pm 10% e apenas 5% apresentam desvios compreendidos entre \pm 10% e \pm 15%. O desvio relativo médio foi 4,71%.

A Figura 16 mostra a distribuição dos desvios diários da radiação solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento e corrigido pela correção de DRUMMOND (1956) em relação ao método padrão, para dias de céu parcialmente nublado, ou seja, para dias em que $0.3 \le K_t \le 0.65$. Os valores

dos desvios relativos diários encontram-se, na grande maioria das vezes, dispostos acima da linha zero.



Figura 15 - Desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido por DRUMMOND, para $K_t < 0.3$



Figura 16 - Desvio relativo entre as medidas da radiação difusa através dos métodos padrão e anel corrigido pelo fator de correção de DRUMMOND, quando $0.3 \le K_t \le 0.65$

A Figura 17 mostra a distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido por DRUMMOND (1956), para o intervalo $0,3 \le K_t \le 0,65$. A distribuição encontra-se deslocada no sentido positivo, sugerindo que o método do anel subestima a medida da radiação difusa, quando o céu encontra-se parcialmente nublado. Dos 181 dias estudados, 22% apresentaram desvios na faixa de ±5%, 46% dos dias apresentaram desvios entre ±5% e ±10%, 23% dos dias apresentaram desvios entre ±10% e ±15% e 2% dos dias apresentaram desvios acima de 15%. O desvio relativo médio foi 8,64%.



Figura 17 - Desvios relativos da radiação difusa entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido por DRUMMOND, para $0.3 \le K_t \le 0.65$

A Figura 18 mostra a distribuição dos desvios diários da radiação solar difusa medida pelo método do anel de sombreamento e corrigida pelo fator de DRUMMOND (1956), em relação ao método de referência, para dias de céu limpo, ou seja, para dias em que $K_t > 0,65$.



Figura 18 - Desvio relativo entre as medidas da radiação solar difusa obtida através dos métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para K_t > 0,65

Os valores dos desvios relativos diários encontram-se, na grande maioria das vezes, dispostos acima da abscissa zero, com exceção de alguns pontos localizados sobre a linha de referência e outros poucos localizados abaixo dela.

A distribuição de fregüência dos desvios relativos entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para o intervalo de céu limpo, ilustrada na Figura 19, também se encontra deslocada no sentido positivo. Isto sugere que o método do anel corrigido por DRUMMOND (1956) subestima a medida da radiação difusa quando o céu encontra-se limpo. Dos 119 dias estudados, 3% dos dias apresentaram desvios relativos na faixa entre -20% e -10%, 17% dos dias apresentaram desvios na compreendidos entre ±5%. 50% dos dias apresentaram desvios compreendidos entre 10% e 15%, cerca de 16% dos dias apresentaram desvios entre 20% e 25% e 14% dos dias apresentaram desvios superiores a 30%. O desvio relativo médio de todas as observações foi 17,88%.



Figura 19 - Desvios relativos da radiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido por DRUMMOND, para K_t > 0,65

4.7 FUNÇÃO NUMÉRICA GLOBAL DE RICIERI

A Figura 20 mostra a correlação entre as irradiações difusas diárias, medidas pelos métodos padrão e anel de sombreamento sem correção, para um total de 367 dias, no período compreendido entre 3 de janeiro de 2001 e

14 de fevereiro de 2002. A equação de regressão linear ajustada para a localidade de Cascavel - PR, denominada função numérica global de RICIERI (1998), é definida por:

$$R_d = 0,16545 + 1,21715R'_d, R^2 = 0,98383$$
 (24)

Em que:

R_d é a irradiação difusa medida pelo método padrão:

R'_d é a irradiação difusa medida pelo método do anel de sombreamento.

O coeficiente de determinação (R²) explica 98,38% a relação entre a irradiação difusa sem correção e a irradiação difusa de referência, podendo a equação ser utilizada com elevada probabilidade de acerto.



Figura 20 - Correlação entre a irradiação difusa medida pelo método padrão e pelo anel de sombreamento sem correção, para Cascavel - PR

4.7.1 Desvios Relativos Diários da Função Numérica Global de RICIERI (1998)

Os desvios relativos diários da radiação solar difusa obtida pelo anel de sombreamento e corrigida pela função numérica global de RICIERI (1998), ilustrados na Figura 21, encontram-se dispostos ao redor da abscissa zero.

A Figura 22 apresenta a curva de freqüência dos desvios relativos. Cerca de 54% dos dias apresentam desvios relativos maiores que zero, enquanto que 46% dos dias apresentam desvios negativos. Em uma escala de desvios, cerca de 51% do total encontram-se na faixa compreendida entre \pm 5%; 20% dos dias encontram-se na faixa entre \pm 5% e \pm 10%; 14% dos dias encontram-se entre \pm 10% e \pm 15%; 6% dos dias encontram-se entre \pm 15% e \pm 20% e 9% dos dias encontra-se na faixa entre \pm 20% e \pm 60%. O desvio relativo médio da radiação solar difusa obtida pelo anel de sombreamento e corrigida pela função numérica de RICIERI (1998) é de 6,75%.



Figura 21 - Desvio relativo entre as medidas da radiação solar difusa através dos métodos da diferença e anel corrigido pela função numérica global



Figura 22 - Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa padrão e a obtida pelo anel sombreado e corrigido pela função numérica global

Para a verificação da precisão do modelo numérico proposto, compararam-se os desvios relativos médios da irradiação difusa corrigida através do modelo de RICIERI (1998) com os desvios obtidos pela radiação difusa corrigida pelo fator de correção de DRUMMOND (1956). O desvio relativo médio apresentado pelo fator de correção de RICIERI (1998) para a cidade de Cascavel (6,75%) é consideravelmente menor que o desvio relativo médio apresentado por DRUMMOND (10,59%). Também é menor que o apresentado para céu limpo (17,88%) e parcialmente nublado (8,64%), sendo superior apenas em condições ideais de isotropia da radiação difusa, ou seja, em condições de céu nublado (4,71%).

4.7.2 Níveis Médios Mensais da Irradiação Difusa

Na Figura 23 estão representados os níveis médios mensais da irradiação difusa obtida pelo anel de sombreamento sem correção, corrigido pelo modelo de DRUMMOND (1956), pela função numérica de RICIERI (1998) e através do método da diferença.

Os níveis da irradiação difusa corrigidos pela função global de RICIERI (1998) estão mais próximos aos níveis de referência que os apresentados por DRUMMOND (1956), em todos os meses estudados. A irradiação difusa padrão apresentou como limites: mínimo 3 MJ/m², verificado no mês de junho e máximo 8,67 MJ/m², verificado no mês de janeiro de 2001, enquanto que a irradiação difusa medida pelo método do anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998) apresentou 3,34 MJ/m² como limite mínimo e 8,51 MJ/m² como limite máximo, para mesmos meses. A irradiação difusa média obtida pelo anel de sombreamento e corrigida pela função numérica global é a mesma registrada pelo método da diferença: 6,29 MJ/m².

A irradiação medida pelo método do anel de sombreamento corrigido pelo fator de correção de DRUMMOND (1956) apresentou 2,75 MJ/m² como limite mínimo e 7,95 MJ/m² como limite máximo, para os meses de junho e fevereiro de 2001, respectivamente. Durante todos os meses estudados, verifica-se que os níveis da irradiação corrigida por DRUMMOND (1956) são inferiores aos níveis de referência. O valor médio corrigido por DRUMMOND (5,73 MJ/m²) é inferior ao registrado pelo método padrão (6,29 MJ/m²).



Figura 23 - Médias mensais da irradiação difusa obtida pelo anel de sombreamento sem correção, corrigido pelo modelo de DRUMMOND (1956), pela função numérica de RICIERI (1998) e através do método da diferença

4.8 FUNÇÕES NUMÉRICAS PARCIAIS DE RICIERI

Com o objetivo de melhorar as aproximações, separaram-se os 367 dias estudados em função da cobertura de céu: foram encontrados 66 dias em que K_t apresentava valor inferior a 0,3, que caracterizou o período como céu nublado; 182 dias em que $0,3 \le K_t \le 0,65$, caracterizados como dias de céu parcialmente nublado; e 119 dias em que K_t era superior a 0,65, caracterizados como dias de céu limpo. Em seguida, foi ajustado um modelo de regressão linear para cada intervalo de K_t.

A Figura 24 apresenta as regressões lineares entre a irradiação difusa padrão e a irradiação difusa sem correção, em (MJ/m²), para dias de céu nublado (a), parcialmente nublado (b) e limpo (c).



b)

a)





Figura 24 - Regressões lineares entre a irradiação difusa padrão e difusa sem correção, para céu nublado (a), parcialmente nublado (b) e limpo (c).

Foram determinadas as seguintes funções de correções para as três coberturas do céu:

Céu nublado (CN):

C)

$$R_d = -0,41324 + 1,23871 R_d^{'}, R^2 = 0,9872$$
(25)

Céu parcialmente nublado (CPN):

$$R_d = 0,00496 + 1,24167 R_d$$
, $R^2 = 0,98125$ (26)

Céu limpo (CL):

$$R_d = 0,20265 + 1,29492 R_d$$
, $R^2 = 0,97033$ (27)

A Figura 25 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram encontrados através da comparação entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para dias de céu nublado, ou seja, para dias em que $K_t < 0.3$. Em geral, os valores dos desvios relativos diários encontram-se simetricamente dispostos em torno da linha que passa pela abscissa zero.



Figura 25 - Desvio relativo diário entre as medidas da irradiação difusa através dos métodos padrão e anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), quando K_t < 0,3</p>

A Figura 26 mostra a distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para o intervalo de K_t < 0,3.

A maior parte dos desvios relativos é positiva (68%). A maioria dos pontos encontra-se próxima da abscissa 0: 97% dos pontos apresentam desvios compreendidos entre -10% e 15%. Dos 65 dias estudados, 51% apresentam desvios na faixa de \pm 5%, 32% dos dias apresentam desvios na faixa de \pm 10% e 17% dos dias apresentam desvios na faixa de \pm 10% a \pm 20%. O desvio relativo médio foi 5,63%.



Figura 26 - Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), quando K_t < 0,3</p>

A Figura 27 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram encontrados pela comparação entre a radiação solar difusa obtida pelos métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para dias de céu parcialmente nublado, ou seja, para dias em que $0,3 \le K_t \le 0,65$. Os valores dos desvios relativos diários encontram-se dispostos ao redor da abscissa zero, sendo que cerca de 51% dos pontos encontram-se dispostos.

A Figura 28 apresenta a distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado. Dos 181 dias estudados, 64,6% apresentaram desvios na faixa compreendida entre \pm 5%, 27% dos dias apresentaram desvios entre \pm 10%, 6% dos dias apresentaram desvios entre \pm 10% e \pm 15%, e \pm 2% dos dias apresentaram desvios entre \pm 15% e \pm 25%. O desvio relativo médio de todas as observações foi 4,72%.



Figura 27 - Desvio relativo entre as medidas da irradiação difusa através do método padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para $0.3 \le K_t \le 0.65$



Figura 28 -Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação
difusa entre os métodos padrão e sombreamento do anel corrigido
pela função numérica parcial de RICIERI, para $0.3 \le K_t \le 0.65$

A Figura 29 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram encontrados pela comparação entre a radiação difusa obtida pelos métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para dias de céu limpo, ou seja, para dias em que $K_t > 0,65$.



Figura 29 - Desvio relativo entre as medidas da irradiação difusa através do método padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para K_t > 0,65

Os desvios relativos diários encontram-se deslocados no sentido positivo, sendo que cerca de 66% dos pontos encontram-se dispostos acima dessa linha de referência e cerca de 34% encontram-se abaixo. Os pontos encontram-se mais dispersos quando comparados aos gráficos das situações anteriores, ou seja, os desvios relativos diários variam mais. Pode-se verificar uma grande concentração de pontos nos intervalos $\pm 20\%$ a $\pm 30\%$ o que não foi verificado em céu nublado e parcialmente nublado.

A Figura 30 mostra a distribuição de freqüência dos desvios relativos entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido pela função parcial de RICIERI (1998), para o intervalo de céu limpo (K_t > 0,65). Dos 119 dias estudados, 31% apresentaram desvios na faixa de \pm 5%, cerca de 32% dos dias apresentaram desvios entre \pm 5% e \pm 10%, 14% dos dias apresentaram desvios entre \pm 10% e \pm 15%, 11% dos dias apresentaram desvios entre \pm 15% e \pm 20%, 5% dos dias apresentam desvios entre \pm 25% e \pm 35%. O desvio relativo médio foi 8,23%.



Figura 30 - Distribuição de freqüência dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e sombreamento do anel corrigido pela função numérica parcial de RICIERI, para K_t > 0,65

Na Tabela 1 estão apresentados os desvios relativos da irradiação solar difusa, obtidos pelas correções de DRUMMOND (1956) e funções numéricas parciais de RICIERI (1998), em função da cobertura do céu, utilizando a partição diária.

Tabela 1 - Desvios relativos médios da irradiação difusa, obtidos pelas correções de DRUMMOND (1956) e funções parciais de RICIERI (1998)

COBERTURA DO CÉU	DRUMMOND	FUNÇÕES PARCIAIS DE RICIERI
Céu limpo	17,88%	8,23%
Céu parcialmente nublado	8,64%	4,72%
Céu nublado	4,71%	5,63%

Os desvios relativos obtidos pela correção de DRUMONND (1956) foram 54% e 45% superiores aos apresentados pelas funções parciais de RICIERI (1998), para céu limpo e parcialmente nublado, respectivamente. Em céu nublado ocorre o contrário: o desvio foi cerca de 16% inferior ao encontrado pela função parcial, para céu nessa condição. Na média, pode-se observar que o uso das funções numéricas parciais de RICIERI (1998) é mais eficiente, sendo cerca de 40% inferior ao apresentado pela correção de DRUMMOND (1956).

4.9 VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para a validação do modelo, as equações citadas anteriormente foram empregadas em uma série de dados obtidos no período compreendido entre 15 de fevereiro de 2002 e 14 de fevereiro de 2003, totalizando 323 dias, dos quais, 56 dias foram classificados como céu nublado, 159 dias foram classificados como céu nublado, 159 dias foram classificados e 108 dias como céu limpo.

Os dados da radiação solar difusa foram monitorados pelos métodos padrão e anel de sombreamento, sendo as medidas deste último corrigidas pelo fator de DRUMMOND (1956) e pelas funções numéricas propostas por

RICIERI (1998) e, em seguida, foram comparados os desvios relativos diários entre os dois métodos.

A Figura 31 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos da diferença e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para o período de validação.

Os desvios relativos diários não apresentaram simetria à abscissa zero: a grande maioria dos pontos (cerca de 93%) está localizada na parte superior à linha de referência. Além disso, é verificada uma grande dispersão, resultando em uma grande amplitude dos desvios: cerca de 7% dos dias encontram-se entre -5% e 0%; 15% dos dias apresentam desvios diários na faixa compreendida entre 0% e 5%; 22% dos dias apresentam desvios entre 5% e 10%; 23% dos dias apresentam desvios na faixa entre 10% e 15%; 15% dos dias apresentam desvios compreendidos entre 15% e 20% e 17% dos dias apresentam desvios superiores a 20%. O desvio relativo médio é de aproximadamente 11,79%.



Figura 31 - Dispersão dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para o período de validação

A Figura 32 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para o período de validação.

Os desvios relativos diários apresentados pela função numérica global de RICIERI (1998) estão ligeiramente deslocados no sentido positivo: cerca de 60% dos pontos encontram-se dispostos acima da abscissa zero. Cerca de 61,6% dos dias apresentam desvio diário entre $\pm 5\%$, 24% dos dias encontram-se entre $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, 7,5% dos dias encontram-se entre $\pm 10\%$ e $\pm 15\%$ e cerca de 6,9% dos dias encontram-se na faixa entre $\pm 15\%$ e $\pm 25\%$. O desvio relativo médio total é de 7,37%.



Figura 32 - Dispersão dos desvios relativos da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para o período de validação

Os desvios relativos médios obtidos pelos métodos padrão e anel de sombreamento, corrigidos pelo fator de DRUMMOND (1956) e pela função numérica global de RICIERI (1998), para o período de validação foram, respectivamente, 11,79% e 7,37%. O estudo desses índices mostra que o desvio relativo médio da radiação difusa medida pelo anel e corrigida pela

função numérica global de RICIERI (1998) é em torno de 37,5% menor que o apresentado pela equação de DRUMMOND (1956).

A Figura 33 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu nublado (Kt < 0,3). Cerca de 62% dos desvios relativos encontram-se dispostos acima da abscissa zero. A grande maioria dos pontos, cerca de 92%, apresentam desvios entre -5% e 5%, enquanto 8% dos pontos apresentam desvios compreendidos entre 5% e 10%. Pode-se verificar através do gráfico que o desvio relativo médio total é muito baixo (2,68%) e isso se deve ao fato da correção de DRUMMOND (1956) ser estimada para condições de céu consideradas isotrópicas, ou seja, condições de céu nublado.



Figura 33 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu nublado (Kt < 0,3)</p>

A Figura 34 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu nublado (K_t < 0,3). Os pontos, quase em sua totalidade, encontram-se abaixo da abscissa zero. Outra característica dos pontos é sua grande dispersão: cerca de 17% dos dias apresentam desvios relativos entre \pm 5%; 32% dos dias apresentam desvios entre -5% e -10%; 17% dos dias encontram-se entre -10% e -15%; 17% dos dias encontram-se entre -15% e -20%; 16% dos dias apresentam desvios entre -20% e -30%. O desvio relativo médio é 11,12%.

A Figura 35 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu nublado.



Figura 34 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu nublado (Kt < 0,3)</p>



Figura 35 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu nublado (K_t < 0,3)</p>

Os desvios relativos diários encontram-se deslocados no sentido positivo: cerca de 69% dos pontos encontram-se dispostos acima da abscissa zero. A maioria dos pontos, cerca de 76,3%, apresentam-se dispostos entre -5% e 5%; 10,9% dos dias apresentam desvios diários entre $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$; 7,3% apresentam desvios diários entre $\pm 10\%$ e $\pm 15\%$ e 5,5% dos pontos estão localizados acima de 15%. O desvio relativo médio é 4,6%.

A Figura 36 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu parcialmente nublado $(0,3 \le K_t \le 0.65)$.


Figura 36 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu parcialmente nublado $(0,3 \le K_t \le 0,65)$

Os desvios relativos diários apresentam-se dispostos acima da abscissa zero, com exceção de um único ponto localizado sobre essa linha de referência. Também se verifica uma grande dispersão dos pontos: cerca 13,5% dos dias apresentam desvios compreendidos entre 0 e 5%; 40% dos dias apresentam desvios entre 5% e 10%; 33% dos dias apresentam desvios entre 10% e 15%; 11% dos dias apresentam desvios entre 15% e 20% e 2% dos dias apresentam desvios entre 20% e 25%. O desvio relativo médio total é 9,55%.

A Figura 37 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado ($0,3 \le K_t \le 0,65$). A maior concentração dos pontos é verificada ao redor da abscissa zero: cerca de 78% dos dias apresentam desvios diários entre ±5%, 16% apresentam desvios entre ±5% e ±10% e 6% apresentam desvios entre ±10% e ±15%. O desvio relativo médio é 4,62%.



Figura 37 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado ($0,3 \le K_t \le 0,65$)

A Figura 38 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado ($0,3 \le K_t \le 0,65$). A dispersão dos desvios relativos diários da função numérica parcial se comporta de maneira similar à dispersão dos pontos da função numérica global: 80% dos dias apresentam desvios relativos diários compreendidos entre -5% e 5%, 14% apresentam desvios compreendidos entre ±15% e ±20%. O desvio relativo médio é 4,66%.

A Figura 39 mostra o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram obtidos pela comparação entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND (1956), para céu limpo ($K_t > 0,65$).



Figura 38 - Dispersão dos desvios relativos diários irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu parcialmente nublado ($0,3 \le K_t \le 0,65$)



Figura 39 - Desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pelo fator de DRUMMOND, para céu limpo (K_t > 0,65)

A correção de DRUMMOND apresenta grandes desvios relativos diários, sendo que estes se encontram dispostos acima da abscissa zero e apresentam amplitude compreendida entre 5% e 40%. A maioria dos dias, cerca de 60%, encontram-se concentrados entre 15% e 25%, cerca de 24% dos dias encontram-se entre 5% e 15% e 16% dos dias encontram-se acima de 25%. O desvio relativo médio para dias é 19,82%.

A Figura 40 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram obtidos pela comparação entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu limpo (K_t > 0,65). A maioria dos desvios relativos diários encontra-se no sentido positivo: cerca de 95% dos pontos estão dispostos acima da abscissa zero. A maior concentração dos desvios relativos é verificada no intervalo compreendido entre $\pm 5\%$: 59%, cerca de 32% dos desvios encontram-se entre $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ e cerca de 8% dos dias apresentam desvios maiores que 15%. O desvio relativo médio é 7,47%.



Figura 40 - Desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica global de RICIERI (1998), para céu limpo (K_t > 0,65)

A Figura 41 apresenta o gráfico de dispersão dos desvios relativos diários da irradiação solar difusa. Os desvios foram encontrados através da comparação entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu limpo (K_t > 0,65). Os pontos encontram-se concentrados ao redor da abscissa zero: cerca de 81% dos dias apresentam desvios entre \pm 5%, cerca de 19% dos dias apresentam desvios maiores que 15%. O desvio relativo médio é 4,8%.



Figura 41 - Dispersão dos desvios relativos diários da irradiação difusa entre os métodos padrão e anel de sombreamento corrigido pela função numérica parcial de RICIERI (1998), para céu limpo (K_t > 0,65)

Na Tabela 2 estão apresentados os desvios relativos médios obtidos pela equação global e equações parciais para as três coberturas de céu: limpo, parcialmente nublado e nublado, no período de validação. Para céu nublado, situação em que a radiação difusa é considerada isotrópica, o desvio relativo médio da correção de DRUMMOND (1956) é inferior aos apresentados pelas funções numéricas global e parcial de RICIERI (1998), entretanto, para

condições consideradas anisotrópicas (céu limpo e parcialmente nublado) a correção de DRUMMOND (1956) apresenta altos desvios, o que comprova que ela subestima a medida da radiação difusa para céu nessas condições.

Esses erros devem-se ao fato de que o fator de correção de DRUMMOND (1956) é calculado em função da latitude, declinação solar e parâmetros geométricos do anel, não considerando a anisotropia da radiação difusa e a variação da massa ótica. Na média, o uso das funções numéricas parciais de RICIERI (1998) é cerca de 56% mais eficiente que o fator de correção de DRUMMOND (1956).

Tabela 2 - Desvios relativos da irradiação solar difusa para a correção de DRUMMOND (1956) e funções numéricas de RICIERI (1998), para as três condições de cobertura do céu

COBERTURA DO CÉU	DRUMMOND	FUNÇÃO GLOBAL DE RICIERI	FUNÇÕES PARCIAIS DE RICIERI
Céu limpo	19,82%	7,47%	4,80%
Céu parcialmente nublado	9,55%	4,62%	4,66%
Céu nublado	2,68%	11,12%	4,60%

Ao comparar a função global às funções parciais de RICIERI (1998), é verificado que, em média, essas últimas são cerca de 39% mais precisas. Ao comparar os valores dos desvios relativos para céu limpo, eles caem de 7,47%, obtido para a função global, para 4,8%, para a função parcial; para céu parcialmente nublado não são verificadas diferenças significativas (4,62% para 4,66%) e, para céu nublado, o desvio varia de 11,12% para 4,60%, para a função global e parcial de RICIERI (1998), respectivamente.

4.10 UNIVERSALIZAÇÃO DAS FUNÇÕES NUMÉRICAS DE RICIERI (1998)

Embora as funções numéricas parciais de RICIERI (1998), desenvolvidas para a cidade de Cascavel - PR, apresentem desvios relativos diários consideravelmente menores que a correção de DRUMMOND (1956), a sua dedução exige coleta e estudo de uma série de dados envolvendo as radiações difusa (obtida pelo método padrão e anel de sombreamento), global e direta, obtidas especificamente para a localidade, necessitando o uso de aparelhos raramente disponíveis nas estações meteorológicas. Com o objetivo de estudar a universalização das funções obtidas por RICIERI (1998), compararam-se os desvios obtidos através do ajuste das funções numéricas desenvolvidas para Botucatu – SP (latitude 22°54'S, longitude 48°27'O, altitude 786 m) aos dados de Cascavel - PR (latitude 24°53'S, longitude 53°23'O, altitude 682 m).

Os estudos da universalização das funções de RICIERI (1998) foram desenvolvidos apenas para as funções numéricas parciais, pois estas apresentam desvios relativos significativamente menores aos apresentados pela função numérica global.

Na Tabela 3 estão apresentadas as funções numéricas parciais, desenvolvidas para as cidades de Botucatu - SP e Cascavel - PR. O comportamento das funções parciais para as duas localidades é semelhante: o coeficiente, embora não apresente uma diferença significativa, é maior para céu nublado que para céu parcialmente nublado e limpo e o coeficiente de intercepto e o coeficiente angular são crescentes no sentido do céu nublado, parcialmente nublado e limpo.

	BOTUCATU	CASCAVEL
Parcial K _t < 0,3	Rd = -0,4179 + 1,2549R'd (R ² =98,8)	Rd = -0,41324+1,23871R'd (R ² =98,7)
Parcial 0,3 $\leq K_t \leq$ 0,65	Rd = -0,2425 + 1,2894R'd (R ² =98,4)	Rd = 0,00496+1,24167R'd (R ² =98,1)
Parcial K _t > 0,65	Rd = -0,2164+1,3468R'd (R ² =97,1)	Rd = 0,20265+1,29492R'd (R ² =97,0)

Tabela 3 - Funções numéricas parciais, para Botucatu-SP e Cascavel-PR

A Tabela 4 apresenta os desvios relativos médios encontrados pelo emprego das funções parciais deduzidas em Botucatu - SP e Cascavel - PR, ajustadas aos dados desta última.

Tabela 4 - Desvios relativos médios encontrados por meio das funções numéricas parciais deduzidas para Botucatu - SP e Cascavel - PR, ajustadas aos dados desta última

COBERTURA DO CÉU	PARCIAL DE	PARCIAL DE
	BOTUCATU	CASCAVEL
K _t < 0,3	4,60%	4,80%
$0,3 \leq K_t \leq 0,65$	4,80%	4,66%
K _t > 0,65	5,29%	4,60%

Apesar das funções numéricas parciais desenvolvidas para as localidades de Botucatu - SP e Cascavel - PR apresentarem coeficientes angulares e lineares diferentes, os desvios relativos médios encontrados foram muito próximos entre si. Isso sugere que as funções parciais de RICIERI (1998) desenvolvidas para a cidade de Botucatu - SP, quando utilizadas na correção da radiação solar difusa obtida através do anel de sombreamento em outras latitudes, tendem a apresentar desvios relativos próximos aos obtidos pelas funções numéricas desenvolvidas na própria localidade.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O nível médio mensal das irradiações global, direta na incidência e difusa verificadas na cidade de Cascavel foram, respectivamente, 51,8%, 31,7% e 20,17% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os limites mínimos para essas componentes foram 10,86 MJ/m², 3 MJ/m² e 6,59 MJ/m², e os limites máximos foram 20,58 MJ/m², 8,67 MJ/m² e 12,75 MJ/m², respectivamente.
- O índice de claridade (Kt), obtido através da metodologia de RICIERI (1998), apresentou limite máximo 0,8 e mínimo 0, caracterizando os limites da claridade local. O intervalo de Kt compreendido entre 0,6 e 0,8 apresenta maior densidade dos pontos: 43,32%.
- A fração difusa da radiação global incidente na superfície (K_d) apresenta limites locais mínimo de 0,051 e máximo de 0,97, ou seja, a radiação difusa incidente na superfície terrestre pode variar entre 0 e 100% da radiação global incidente no mesmo local. A maior incidência foi verificada no intervalo de K_d, variando entre 0,2 e 0,4, com 30,87% dos dias.
- Os intervalos do índice de claridade caracterizando céu nublado (K_t < 0,3), parcialmente nublado (0,3 ≤ K_t ≤ 0,65) e limpo (K_t > 0,65) para a região de Cascavel - PR, coincidem com os intervalos de K_t encontrados para a cidade de Botucatu - SP, mesmo se tratando de latitudes e condições climáticas diferentes.
- O método da medida da irradiação difusa através do anel de sombreamento, utilizando o fator de correção de DRUMMOND (1956) subestima a medida da irradiação difusa em, aproximadamente, 11,79%, mostrando ser dependente da natureza anisotrópica da radiação difusa e apresentando desvios maiores

para dias de céu aberto com média de 19,82%, 9,55% para dias parcialmente nublados e 2,68% para dias nublados.

- A função numérica linear R_d = 0,16545 + 1,21715R'_d, foi proposta para a correção da radiação difusa medida pelo método do anel de sombreamento. Essa correlação melhora em torno de 38% a correção da fração difusa, diminuindo o desvio relativo médio de 11,79%, calculado para o método de DRUMMOND (1956), para 7,37%.
- As funções numéricas parciais, propostas em função do tipo de cobertura do céu, diminuem significativamente o valor do desvio relativo médio, quando comparadas ao fator de correção de DRUMMOND (1956): Os desvios relativos diminuíram de 19,82% para 4,8% para céu limpo, de 9,55% para 4,66% para céu parcialmente nublado e, para céu nublado, aumentou de 2,68% para 4,6%.
- A correção da radiação solar difusa para o método do anel de sombreamento, utilizando as funções numéricas parciais desenvolvidas para a cidade de Botucatu - SP, foi considerado apropriado para a cidade de Cascavel - PR, sugerindo que essas, mesmo quando empregadas em outras latitudes, tendem a apresentar desvios relativos próximos aos obtidos pelas funções numéricas desenvolvidas na própria localidade.

REFERÊNCIAS

BATLLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, United States, v. 54, n. 2, p. 105-114. 1995.

BRUNO, R. A correction procedure for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v. 20, p. 97-100, 1978.

CHANDRASEKARAN, J.; KUMAR, S. Hourly diffuse fraction correlation at a tropical location. **Solar Energy,** United States, India, v. 53, n. 6, p. 505-510. 1994.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A.; The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. **Solar Energy**, v. 22, n. 2, p. 155-164. 1979.

CONFALONE, A. E., COSTA, L. C.; PEREIRA, C. R.; Crescimento e captura de luz em soja sob estresse hídrico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 165-169. 1998.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Modelo de estimativa da radiação solar difusa instantânea. SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. **Anais...** São Paulo: UNESP-FCA Gráfica e Editora Tiponic, 1999.

DIDONET, A. D.; RODRIGUES, O.; MÁRIO, J. L.; IDE, F. **Taxa de crescimento de grãos e radiação solar global incidente em cinco épocas de plantio de milho.** Centro de pesquisa de trigo – EMBRAPA. 1988. Disponível em: <<u>http://www.cnpt.embrapa.br/agromet.htm</u>> Acesso em: 10 jan. 2004.

DRUMMOND, A. J. On measurement of sky radiation. **Archiv fur Meteorologie Geophysik Bioklimatologie**, New York, v. 7, p. 413-35, 1956.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Solar Energy**, Great Britain, v. 4, n. 28, p. 293-304. 1982.

FANCELLI, A. L. Fisiologia da produção e aspectos básicos de manejo para alto rendimento. In: SANDINI, I.; FANCELLI, A. L. (Ed.). **Milho**: estratégias de manejo para a região Sul. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2000. p. 103-116.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Vancouver, Canada: Academic Press, 1983.

GANSLER, R. A.; KLEIN, S. A.; BECKMAN, W. A. Investigation of minute solar radiation data. **Solar Energy**, Madison, U.S.A, v. 55, n.1, p, 21-27. 1995.

JACOVIDES, C. P. ; HADJIOANNOU, L.; PASHIARDIS, S.; STEFANOU, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. **Solar Energy,** Nicosia, Cyprus, v. 56, n. 6, p. 565-572. 1996.

LEBARON, B. A.; PETERSON, W. A.; DIRMHIRN, I. Corrections for diffuse irradiance measured with shadowbands. **Solar Energy,** Great Britain, v. 25, p. 1-13, 1980.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. Daily Insolation on surfaces tilted toward the equator. **Ashrae Journal**, s.l. Outubro, 1961, p. 53-59.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. **Solar Energy,** Washington, v. 4, n. 3, p. 1–19. 1960.

MADUEKWE, A. A. L.; CHENDO, M. A. C. Atmospheric turbidity and the diffuse irradiance in Lagos, Nigeria. **Solar Energy,** Great Britain, v. 61, n. 4, p. 241-249. 1997.

MARTINEZ-GARCIA, P. F. **Características climáticas de los invernaderos de plástico**. Madrid – España: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias – INIA, 1978.

MOTA, F. S. Meteorologia agrícola. São Paulo. Nobel, 1977.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

ORGILL, J. F.; HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy,** Waterloo, Canada, v. 19, p. 357-359, 1977.

PAINTER, H. E. The shade ring correction for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy,** Great Britain, v. 26, p. 361-363. 1981.

PAGE, J. K. The estimation of monthly mean values of daily total shortwave radiation on vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40°N-40°S. **New Sources of Energy,** Roma, Italia, v. 4, p. 378-390.1961.

REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Diffuse Fraction Correlations. **Solar Energy,** United Sates, v. 45, n. 1, p. 1-7. 1990.

RICIERI, R. P., ESCOBEDO, J. F. Radiação solar global e difusa em estufas túneis com cobertura de polietileno. **Energia na Agricultura,** [s.l.]:Botucatu, v. 11, n.1, p. 15-28. 1996.

RICIERI, R. P. Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa. Botucatu, 1998. f. 89. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

RUTH, D.W.; CHANT, R. E. The relationship of Diffuse Radiation to Total Radiation in Canada. **Solar Energy,** Great Britain, v. 18, p. 153-154. 1976.

SKARTVEIT, A.; OLSETH, J. A.; TUFT, M. E. An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. **Solar Energy,** Great Britain, v. 63, n. 3, p. 173-183. 1998.

SKARTVEIT, A.; OLSETH, J. A. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. **Solar Energy,** Great Britain, v. 38, n. 4, p. 271-274. 1987.

SOLER, A. The dependence on solar elevation of the correlation between monthly average hourly diffuse and global radiation. **Solar Energy,** v. 41, n. 4, p. 335-340. 1988.

SPENCER, J. W. A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation. **Solar Energy**, Victoria, Austrália, v. 29, n.1, p. 19-32, 1982.

SRIVASTAVA, S. K.; GAUR, A.; SINGH O. P.; TIWARI R. N. Comparison of methods for estimating daily and hourly diffuse solar radiation. **Applied Energy**, Uttar Pradesh, India, v. 51, p. 119-123. 1995.

SUEHRCKE, H.; McCORMICK, P. G. The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. **Solar Energy**, Nedlands, Australia, v. 40, n. 5, p. 423-430. 1988.

SUEHRCKE, H.; McCORMICK, P. G. A performance prediction method for solar energy systems. **Solar Energy**, Nedlands, Australia, v. 48, n. 3, p. 169-175.1992.

TOVAR, J.; BATLLES, F. J.; PEREZ, M. Intrahourly Variability of Global and Diffuse components of solar radiation. **Euro Sun** Almería, Espanha, v. 1, n. 22, p. 1-4. 1998.

TULLER, S. E. The relationship between diffuse, total and extraterrestrial solar radiation. **Solar Energy**, British Columbia, Canada, v. 3, p. 259-263, 1976.