

**CENTRO DE ESTUDOS DO MAR  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
FABIAN GUALDA DIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL  
INCIDENTE E ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA  
ATMOSFÉRICA ENTRE 2002 E 2009 EM PONTAL DO  
PARANÁ, PARANÁ.**

**PONTAL DO PARANÁ  
2010**

**FABIAN GUALDA DIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL  
INCIDENTE E ANÁLISE DA INTERFERÊNCIA  
ATMOSFÉRICA ENTRE 2002 E 2009 EM PONTAL DO  
PARANÁ, PARANÁ.**

Monografia apresentada junto ao curso de graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Paraná, concentrado no Centro de Estudos do Mar em Pontal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg

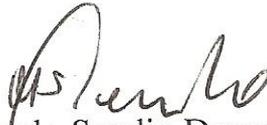
PONTAL DO PARANÁ  
2010

# TERMO DE APROVAÇÃO

**Fabian Gualda Dias**

“Caracterização da radiação solar global incidente e análise da interferência atmosférica entre 2002 e 2009 em Pontal do Paraná, Paraná.”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Marcelo Sandin Dourado-CEM/UFPR



Prof. Dr. Mauricio Garcia Camargo-CEM/UFPR



Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg-CEM/UFPR  
Presidente

Pontal do Paraná, 09 de dezembro de 2009

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por ter me ensinado a confiar n'Ele, perseverar e me permitir concluir este trabalho.

À minha família pelo amor, dedicação e apoio ilimitado.

À minha namorada Sara pelo carinho, paciência e companheirismo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg. Obrigado pelo esforço e paciência sempre que surgiram dúvidas e pela confiança e amizade.

Ao Msc. Joaquim Pereira Bento Netto Júnior pela ajuda valiosa com o Matlab.

À todos os professores do Centro de Estudos do Mar que transmitiram seus conhecimentos durante o curso.

À todos os colegas de oceanografia e companheiros da música que tornaram estes anos inesquecíveis.

## RESUMO

Informações sobre a incidência de radiação solar no litoral paranaense são freqüentemente necessárias para estudos climáticos, interação oceano-atmosfera, produtividade primária, entre outros. Neste trabalho foram calculadas as médias e desvios padrão mensal e anual de radiação solar global incidente entre os anos de 2002 e 2009 no balneário de Pontal do Sul, Pontal do Paraná, Paraná. A radiação incidente no topo da atmosfera foi modelada para a latitude local e a porcentagem de radiação medida em relação à modelada foi separada em classes que refletem o grau diário de atenuação da radiação solar pela atmosfera. Uma análise de correlação foi aplicada entre os dados medidos e modelados e aqueles dias com  $R^2$  maior que 0.98 foram denominados livres de cobertura de nuvens. Através da radiação incidente nestes dias limpos a porcentagem média sazonal e semestral de transmitância da atmosfera foi calculada. O mês de fevereiro revelou a maior média de radiação incidente e junto a março foi o mês sujeito à menor interferência atmosférica, enquanto setembro e outubro foram os meses sujeitos à maior interferência. Os períodos de outono e inverno continham maior quantidade de dias limpos do que primavera e verão, apresentando maio o seu maior número.

**Palavras-chave:** radiação solar, modelo, interferência atmosférica, nuvens, transmitância.

## ABSTRACT

Information about the incoming solar radiation over Paraná's coast is frequently needed in climate studies, of ocean-atmosphere interface, primary productivity, and others. In this work, annual and monthly means and standard deviations of incoming global solar radiation were calculated between 2002 and 2009 in Pontal do Sul, Pontal do Paraná, Paraná. The solar radiation on the top-of-atmosphere was modeled to the local latitude and the surface radiation percentage in relation to the modeled one was distributed in three pools that reflected the degree of diurnal solar attenuation by atmosphere. A correlation statistic was applied between the recorded and modeled data and every day with  $R^2 > 0.98$  were called cloud-free. The mean percentage of atmosphere transmittance was calculated for each season and semester through incoming radiation on clean days. February revealed the higher mean of incoming radiation and, as March, was subjected to the lower atmospheric interference while September and October were subjected to the higher one. Autumn and winter had a greater number of cloud-free days than spring and summer, owing May its largest amount.

**Key-words:** solar radiation, model, atmospheric interference, clouds, transmittance.

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                          | <b>7</b>  |
| 1.1 ÁREA DE ESTUDO .....                            | 9         |
| 1.2 OBJETIVO GERAL.....                             | 10        |
| 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                    | 10        |
| 1.3 JUSTIFICATIVA .....                             | 11        |
| <b>2. METODOLOGIA .....</b>                         | <b>12</b> |
| 2.1 MODELO DE RADIAÇÃO NO TOPO DA ATMOSFERA.....    | 12        |
| 2.2 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS .....            | 14        |
| <b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>              | <b>16</b> |
| 3.1 QUALIDADE DOS DADOS .....                       | 16        |
| 3.2 MÉDIAS DE RADIAÇÃO SOLAR .....                  | 16        |
| 3.3 TRANSMITÂNCIA DA ATMOSFERA LIVRE DE NUVENS..... | 19        |
| 3.4 CLASSIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ATMOSFÉRICA..... | 20        |
| <b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                | <b>26</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar exerce um importante controle no balanço térmico da atmosfera e nos processos de circulação da atmosfera e do oceano. Ela é determinante no comportamento climático global e nos fenômenos meteorológicos (GAMBI et. al., 1998). É por meio da radiação que a energia do sol chega à Terra, sendo o principal modo de propagação de energia no sistema Superfície-Atmosfera (SSA) correspondendo, em média, a  $2 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$  ou  $338 \text{ W/m}^2$  no topo da atmosfera (MENDONÇA; OLIVEIRA, 2007).

A quantidade de radiação que incide sobre o topo da atmosfera terrestre depende de três fatores principais: período do ano, período do dia e latitude. A altitude do sol é o ângulo entre seus raios e uma tangente à superfície no ponto de observação e é determinada pela latitude do local, pelo período do dia e pela estação. Quanto maior sua altitude, mais concentrada será a intensidade da radiação por unidade de área. A duração do dia varia com a latitude e com a estação. Ela afeta a quantidade total de radiação recebida em determinado local. (AYOADE, 1983).

Quando a radiação solar se propaga na atmosfera, interage com seus componentes e sofre atenuação, resultado de três fenômenos distintos, denominados absorção, espalhamento e reflexão. Através do processo de absorção a energia radiante é transformada em outro tipo de energia, geralmente calor. O espalhamento é o resultado do desvio do fluxo de sua trajetória normal, sem perda de energia (FERREIRA, 2006). A reflexão ocorre quando toda ou parte da radiação que atinge a interface de dois meios diferentes é enviada de volta com um ângulo igual ao ângulo de incidência (ISAACS, 2003). Em situação de céu limpo e com o sol no zênite, a radiação solar total em uma superfície horizontal ao nível do mar é reduzida em aproximadamente 14% em condição de atmosfera seca e limpa e em 40% em atmosfera úmida e suja (KIRK, 1994). A razão entre a radiação transmitida pela atmosfera e a radiação que incide nela é chamada de transmitância atmosférica (YAMASOE, 2006).

Dentre os componentes da atmosfera, a cobertura de nuvens é o principal agente nos processos de absorção e espalhamento da luz solar que incide sobre a

Terra, seguido pelos gases e pelos aerossóis. (ECHER; MARTINS; PEREIRA, 2006). Através de observações em plataformas orbitais constatou-se, que essa cobertura de nuvens, embora variável, pode atingir aproximadamente 50% do planeta. Esse percentual de cobertura aliado ao potencial de reflexão que pode chegar a 23% para radiação solar incidente, tornam as nuvens, os agentes mais significativos para o balanço radiativo da Terra (ECHER; MARTINS; PEREIRA, 2006).

Ao longo de um ano 34% da radiação incidente é refletida para o espaço pela atmosfera, outros 19% são absorvidos por esta, e 47% da radiação em média chega à superfície da terra. Destes 47%, 24% consistem de radiação solar direta, e 23% de luz difusa espalhada pelas nuvens (17%) e pelo ar (6%) (KIRK, 1994). A luz difusa exclui o brilho direto do disco solar mas inclui a contribuição da reflexão da superfície que é novamente espalhada pela atmosfera ou por outras superfícies vizinhas (YAMASOE, 2006). Em situação de céu com poucas nuvens isoladas a maior quantidade de luz difusa pode aumentar a irradiância, que é o quociente entre o fluxo de radiação pela área do elemento de superfície em  $W/m^2$  (YAMASOE, 2006), em 5-10%, enquanto em situação de nuvens intermitentes a radiação pode variar do seu valor máximo a 20-50% deste. (KIRK, 1994)

A utilização de satélites tem aumentado a qualidade e o detalhamento das informações sobre a distribuição global das nuvens e o papel desempenhado por elas no balanço radiativo da Terra. No entanto, dados coletados em superfície continuam sendo essenciais tanto para a alimentação dos modelos como para validação dos resultados fornecidos pelos mesmos (ECHER; MARTINS; PEREIRA, 2006).

Sem dúvida, a forma mais precisa para se avaliar a intensidade da radiação solar na superfície é a sua medida direta, com equipamentos operando em estações meteorológicas. Contudo, a rede mundial dessas estações é muito esparsa e, com raras exceções, concentrada nos territórios dos países mais desenvolvidos economicamente. No Brasil, após o desmantelamento da rede solarimétrica nacional gerenciada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir dos anos 90, o número de estações em operação ficou extremamente reduzido. (GAMBI et. al., 1998).

Neste trabalho se pretende caracterizar e analisar a variação da incidência de radiação solar global (radiação direta e difusa) e da interferência atmosférica sobre Pontal do Paraná através da análise de uma série de dados de oito anos (2002 a 2009) de radiação coletados pela estação meteorológica do Centro de Estudos do Mar (CEM) em Pontal do Sul, Pontal do Paraná, Paraná.

## 1.1 ÁREA DE ESTUDO

Na costa sul do Brasil, a acentuada amplitude topográfica, a orientação do relevo e a proximidade do oceano condicionam o clima. As principais influências ocorrem na temperatura, na redução da amplitude térmica diária e anual, no aumento da umidade do ar e na quantidade de chuva. O mês mais frio apresenta temperatura média inferior a 18°C, porém superior a -3°C, e o mais quente, temperatura média superior a 22°C (IPARDES, 1990, 1991).

As chuvas que caem no litoral são dos tipos ciclônico, orográfico e de convecção. No primeiro tipo, as massas de ar formadoras de chuva possuem muitas vezes 500km de largura e extensão superior a esse valor, podendo as precipitações durarem varias horas e até mesmo dias. A média anual está em torno de 2.500 mm (máxima 5.300 mm) e em torno de 85% de umidade do ar. Um período tipicamente chuvoso se inicia no final da primavera e dura a maior parte do verão quando ocorrem as maiores precipitações em 24 horas variando aproximadamente entre 50mm e 400mm, com média em torno de 100mm. Durante esta estação a precipitação média é três vezes maior que no período seco e provoca excedentes hídricos durante todo o ano. A estação seca ocorre do final do outono ao final do inverno, mas é geralmente interrompida por um período curto de chuvas fracas no inicio do inverno. (IPARDES 1990, 1991; ANGULO, 2006; LANA *et. al.*, 2001). No litoral paranaense a quantidade de dias de chuva por ano é superior a 100. A média de dias com chuva por ano na planície litorânea no período 1975-84 foi geralmente superior a 170 dias, com boa distribuição ao longo do ano (IPARDES, 1990).

O clima na região depende da atuação de dois sistemas de meso-escala: do deslocamento para norte ou sul do giro anticiclônico semi-permanente do atlântico

sul e da passagem de massas de ar polar (LANA *et. al.*, 2001). O anticiclone do Atlântico Sul se caracteriza por ar subsidente, divergente e límpido. Nele se originam os ventos alísios de SE-E e de NE-NW, que incidem sobre o litoral paranaense. O anticiclone migratório Polar desenvolve-se em latitudes subpolares pelo acúmulo de ar oriundo dos turbilhões polares sobre os oceanos e bifurca-se em duas frentes: Polar Atlântica e Polar Pacífica, o que ocorre principalmente pela presença dos Andes (IPARDES, 1991). As frentes frias ocorrem na região com uma frequência mensal de 3 a 4 vezes em todos os meses do ano com um número ligeiramente maior durante a primavera (RODRIGUES; FRANCO; SUGAHARA, 2004). A serra do mar age como um anteparo ao movimento das frentes o que faz com que as condições de mal tempo perdurem na região, até que se produza a eclosão ou frontólise. (BIGARELLA *et. al.*, 1978).

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a radiação solar incidente em Pontal do Paraná entre 2002 e 2009 e a interferência atmosférica na atenuação da radiação solar nos diferentes meses e anos.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Aplicar um modelo anual de radiação solar incidente no topo da atmosfera para a latitude local.
- Calcular as médias anuais e mensais de radiação solar incidente.
- Calcular a porcentagem de radiação incidente na superfície da terra em relação à modelada para cada dia e sua média mensal.
- Correlacionar as curvas medidas com as modeladas e estabelecer um coeficiente de determinação representante de dias livres de nuvens.

- Calcular a transmitância da atmosfera em dias limpos nos diferentes períodos do ano.
- Estabelecer uma porcentagem limiar para classificação de dias sujeitos à baixa, média e alta atenuação da radiação solar pela atmosfera.
- Quantificar a porcentagem de dias por mês sujeitos a cada classe de interferência atmosférica.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A radiação solar tem um papel muito importante no controle da produtividade primária e na composição biológica dos ecossistemas aquáticos. Seu entendimento é essencial para aplicação de modelos de simulação de produção de biomassa, uma vez que a radiação fotossinteticamente ativa constitui 38% da radiação no topo da atmosfera (KIRK, 1994). Também nos oceanos a radiação incidente é responsável pela produção dos fluxos de calor que geram a estratificação térmica das massas d'água.

A disponibilidade de informações sobre os níveis de radiação na superfície da terra são indispensáveis a estudos do clima, química da atmosfera, balanço de energia, aproveitamento de energia solar, interação oceano-atmosfera, agricultura e no litoral, em especial, à atividades portuárias e ao planejamento do turismo e balneabilidade.

## 2. METODOLOGIA

Para analisar e caracterizar a incidência solar no litoral paranaense foram utilizados 8 anos de dados instantâneos de radiação (2002 - 2009), obtidos a cada 5 minutos em unidade de  $mW/m^2$  e  $W/m^2$ . Estes dados foram coletados através da estação meteorológica automática do Centro de Estudos do Mar, UFPR, posicionada à latitude  $25^{\circ}34'46''S$ , longitude  $48^{\circ}21'15''W$  e altitude de 4 metros em Pontal do Sul, Pontal do Paraná. Os dados foram coletados por um Piranômetro LI200X, com erro máximo em luz natural de  $\pm 5\%$ , e registrados em um Datalogger CR10X – 27832 – Campbell.

### 2.1 MODELO DE RADIAÇÃO NO TOPO DA ATMOSFERA

Os valores de radiação solar modelados para o topo da atmosfera foram calculados através da seguinte equação (RENNÉ, *et. al.*, 2007):

$$H_0 = I_{SC} \cdot E_0 \cdot \sin \beta, \quad (1)$$

na qual,  $I_{SC}$  é a radiância solar total (chamada por muitos autores de constante solar) e  $E_0$  é o fator de correção para a excentricidade da órbita da terra. O valor da constante solar  $I_{SC}$  fornecida pelo Centro de Radiação Mundial em Davos Dorf, Suíça, é  $1367 W/m^2$ .

O fator de correção pode ser calculado com a seguinte equação que permite o ajuste diário da constante solar (RENNÉ, *et. al.*, 2007):

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos(360n/365), \quad (2)$$

na qual,  $n$  é o dia juliano.

A radiação varia de acordo com a elevação solar que é representada por  $\sin \beta$  na seguinte equação (KIRK, 1994):

$$\text{sen } \beta = \text{sen } \gamma \text{ sen } \delta - \text{cos } \gamma \text{ cos } \delta \text{ cos } \tau, \quad (3)$$

na qual  $\tau$  é o tempo expresso em ângulo calculado através da equação

$$\tau = 360^\circ \cdot t/24; \quad (4)$$

$t$  são as horas e minutos em decimais calculados pela divisão dos minutos por 60 e somados à hora cheia. As horas são contadas de 0 a 23 e os minutos de 0 a 55 a cada 5.

O símbolo  $\gamma$  representa a latitude  $25,57944^\circ\text{S}$ , coordenada na qual se encontra a estação meteorológica.

A declinação solar,  $\delta$ , é o ângulo pelo qual um dado hemisfério está posicionado em relação ao sol. A declinação solar para o hemisfério sul foi calculada através de uma relação derivada por Spencer<sup>1</sup> (1971, *apud* KIRK, 1994):

$$\begin{aligned} \delta = & - 0,39637 + 22,9133 \text{ cos } \psi - 4,02543 \text{ sen } \psi + 0,3872 \text{ cos } 2\psi \\ & - 0,052 \text{ sen } 2\psi, \end{aligned} \quad (5)$$

na qual  $\psi$  é a data expressa em ângulo através da seguinte equação:

$$\psi = 360 \cdot d/365; \quad (6)$$

$d$  é igual ao número do dia, variando de 0, em primeiro de janeiro, à 364, em 31 de dezembro nos anos não bissextos.

Cada valor apresentado em ângulo foi transformado em radianos através da multiplicação por  $\text{Pi}/180$ .

---

<sup>1</sup> SPENCER, J. W. **Fourier series representation of the position of the sun** (1971). Search, 2. 172. 35

## 2.2 TRATAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

No aplicativo Matlab o modelo de radiação no topo da atmosfera forneceu uma tabela de 365 colunas (dias) por 288 linhas (horas e minutos). Os valores negativos que representavam os horários sem iluminação solar foram descartados. Os horários de início e fim de cada dia do modelo foram utilizados como base para selecionar apenas os horários diurnos nos dados medidos. Esta padronização foi necessária devido à configuração da estação que algumas vezes mantinha valores variados para os dados noturnos e tornava difícil a identificação do início e fim da radiação solar realmente medida. Em outros casos os dados eram medidos somente nos períodos de radiação solar e nem sempre começavam ou terminavam nos mesmos horários que o modelo.

Devido a estas configurações de medição e armazenagem dos dados e eventuais falhas da estação as tabelas apresentavam alguns períodos sem dados e houve de se estabelecer um período máximo aceitável de dados não medidos por dia para se manter a qualidade das análises. Este período foi estabelecido de maneira empírica em uma hora e meia, ou seja, dias com mais de 18 medições faltando foram eliminados das análises.

As médias mensais e anuais de radiação foram calculadas no aplicativo Excel. Uma estatística de correlação de Pearson que mede o grau e direção da correlação linear entre duas variáveis através de um índice (R) que vai de -1 a 1, foi aplicada para todos os dias entre os dados medidos e modelados através do Matlab. Os coeficientes de correlação foram elevados ao quadrado a fim de se obter o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) a partir do qual se buscou um alto valor que refletisse dias livres de cobertura de nuvens a fim de se calcular uma estimativa da transmitância da radiação solar pela atmosfera nas quatro estações do ano e semestralmente entre outubro-março e abril-setembro.

Para todos os dias foram calculadas as porcentagens de radiação incidente medida pela radiação modelada e suas médias mensais. Estas porcentagens foram divididas em três classes que caracterizavam dias sujeitos à alta, média e baixa atenuação da radiação solar pela atmosfera. Esta atenuação foi chamada também de interferência atmosférica neste trabalho. As porcentagens limiares de cada faixa

foram definidas com base em observações visuais da porcentagem de cobertura de nuvens local, feitas, sempre que possível, três vezes ao dia entre 2008 e 2009, e através da comparação destas com as respectivas curvas de radiação medidas. Os dias com alto coeficiente de determinação compunham uma quarta classe na qual o céu se apresentava livre de qualquer tipo de nuvens ao longo de praticamente todo o período diurno, e por apresentarem sempre uma alta porcentagem de incidência solar foram subtraídos da classe de dias sujeitos à baixa interferência atmosférica.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 QUALIDADE DOS DADOS

Os dias foram considerados completos quando continham medições durante todo o período diurno estabelecido pelo modelo, dias com falhas aceitáveis quando estas eram menores que 1:30h, e dias incompletos ou sem dados quando as falhas eram maiores que 1:30h. O ano de 2002 teve apenas quatro meses completos de dados: Maio, Junho, Novembro e Dezembro. Os outros anos apresentaram melhores condições, sendo 2007 o ano com maior qualidade. 2008 apresentou o mês de Maio sem dados e 2009 continha dados até Outubro (Figura 1).

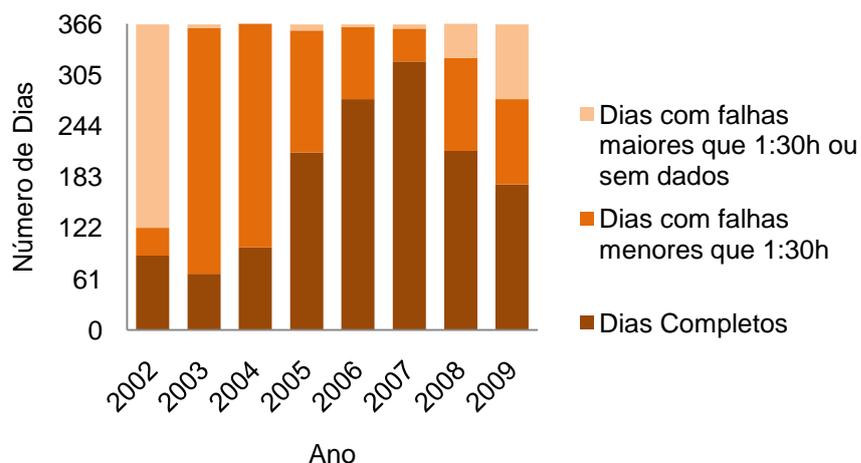
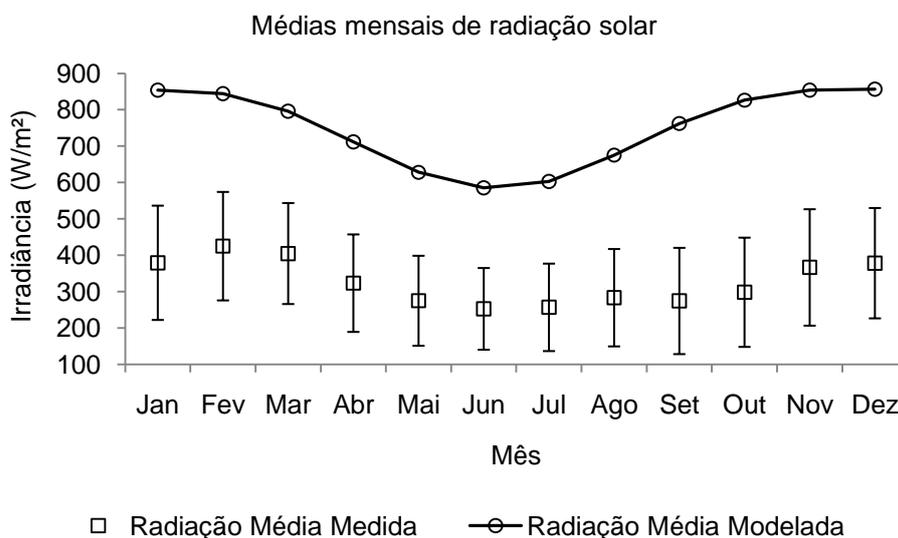


FIGURA 1. Qualidade dos dados por ano

#### 3.2 MÉDIAS DE RADIAÇÃO SOLAR

As médias mensais de radiação apresentaram um padrão sazonal com maiores valores medidos e modelados durante o verão e menores durante o período próximo ao inverno. O desvio padrão mostrou o mesmo perfil das médias, com variação mais alta no verão e diminuindo próximo ao inverno (Figura 2). Isto se deve

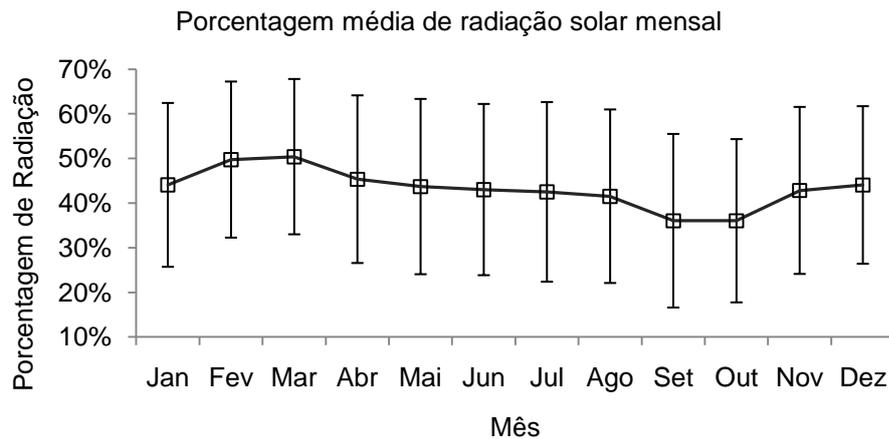
ao nível de incidência solar mais baixo durante o inverno que ocasiona uma menor diferença na radiação entre dias de alta e baixa interferência atmosférica. O mês de junho apresentou a menor média, 253 W/m<sup>2</sup>, e menor desvio padrão, 112,24 W/m<sup>2</sup>, enquanto fevereiro continha a maior média, 425,26 W/m<sup>2</sup>, e novembro o maior desvio padrão, 160 W/m<sup>2</sup>.



**FIGURA 2.** Média e desvio padrão mensal de radiação solar medida e modelada

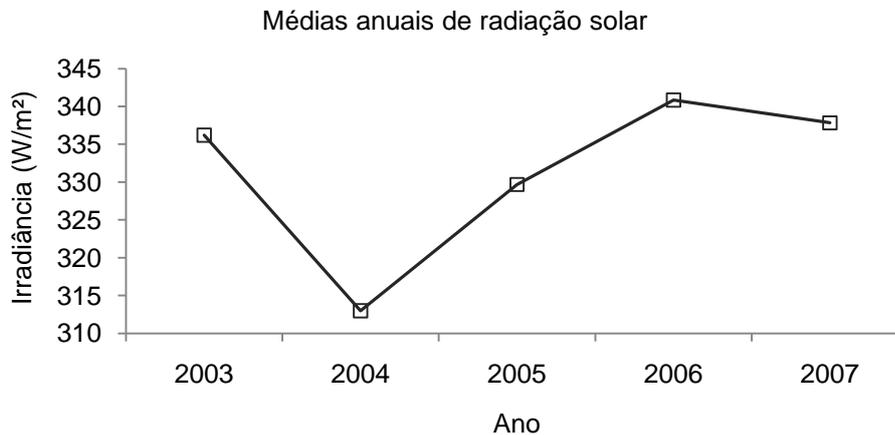
A porcentagem mais alta de radiação solar incidente em Pontal do Paraná ocorreu no mês de março (Figura 3), correspondendo a 50,38% da radiação total que incide no topo da atmosfera, e a partir disso diminuiu até outubro, quando alcançou seu valor mais baixo, 36,02%.

O desvio padrão das porcentagens se apresentou mais homogêneo entre os meses do que o dos valores absolutos, revelando inclusive um padrão inverso, no qual o inverno apresenta maior variação de radiação porcentual incidente do que o verão. Com a radiação normalizada ao longo do ano era possível que a maior frequência de frentes frias atuantes durante a primavera aumentasse o desvio padrão neste período, entretanto, isto não foi observado (RODRIGUES; FRANCO; SUGAHARA, 2004). O maior desvio padrão ocorreu em julho, 20,11%, e o menor em março, 17,39%.



**FIGURA 3.** Porcentagem média e desvio padrão mensal de radiação solar.

As médias anuais de radiação foram calculadas para todos os anos que continham dados ao longo de todos os meses. 2004 apresentou a menor média, 313 W/m<sup>2</sup>, enquanto 2006 apresentou a maior, 440,84 W/m<sup>2</sup>. Apesar de ser uma série curta, entre 2004 a 2006 se observou uma tendência de aumento da radiação (Figura 4). Em comparação com as informações fornecidas pelo centro de previsão de tempo e estudos climáticos (CPTEC) apresentadas na Tabela 1, não se pode observar uma relação entre as médias anuais e a Oscilação Sul – El niño (ENSO).



**FIGURA 4.** Médias anuais de radiação solar

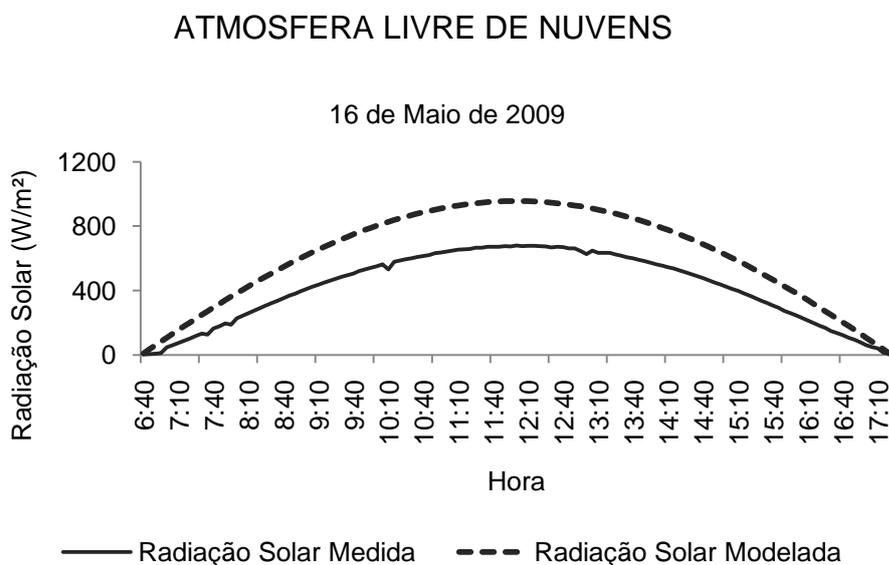
**TABELA 1.** Ocorrência de El Niño – La Niña

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| El Niño Moderado | 2002-2003            |
| El Niño Fraco    | 2004-2005; 2006-2007 |
| La Niña Forte    | 2007-2008            |

FONTE: CPTEC/INPE

### 3.3 TRANSMITÂNCIA DA ATMOSFERA LIVRE DE NUVENS

A transmitância média da atmosfera foi calculada para diferentes períodos do ano através da razão entre os valores modelados e medidos, ou seja, pela irradiância incidente no topo da atmosfera e sua porcentagem transmitida até a superfície da terra em dias totalmente livres de nuvens. Foram considerados como tais, dias que apresentavam coeficiente de determinação ( $R^2$ ) com o modelo maior que 0.98 (Figura 7). Estes dias foram filtrados dos 8 anos de dados existentes e totalizavam 7 dias para primavera, 13 dias para o verão, 72 para o outono e 36 para o inverno.



**FIGURA 7.** Exemplo de condição atmosférica livre de nuvens.  $R^2 = 0,9965$

Houve uma pequena variação na transmitância média da atmosfera entre as quatro estações do ano, conforme se observa na Tabela 2, aumentando do outono

até o verão, quando alcançou a porcentagem máxima de incidência solar de 68,56%. Inverno e verão se destacaram com o maior e menor desvio padrão respectivamente enquanto primavera e outono apresentam valores muito semelhantes.

**TABELA 2.** Porcentagem média de radiação solar incidente em dia limpo para cada estação

| Estação do Ano | Média          | Desvio Padrão |
|----------------|----------------|---------------|
| Primavera      | <b>68,15 %</b> | <b>2,60 %</b> |
| Verão          | <b>68,56 %</b> | <b>1,97 %</b> |
| Outono         | <b>66,27 %</b> | <b>2,46 %</b> |
| Inverno        | <b>66,48 %</b> | <b>4,10 %</b> |

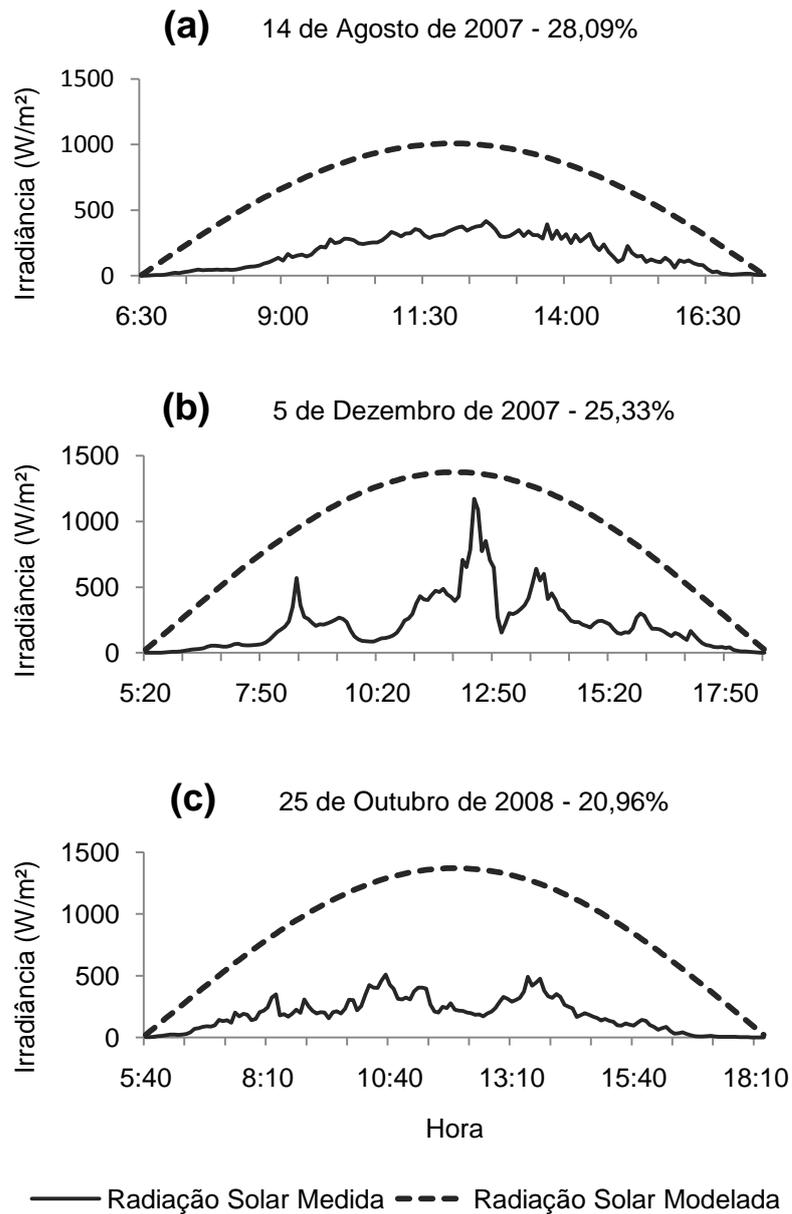
A partir de uma análise semestral dos dados, outubro-março e abril-setembro, separando-se assim o período próximo ao verão de alta incidência solar do período próximo ao inverno de baixa incidência solar, se calculou uma transmitância média de 66,40% para o período de inverno, e desvio padrão de 3,18%. Para o verão a transmitância média foi de 67,88% e o desvio padrão foi menor que no inverno, 2,20%. Pode-se especular que esta diferença se deveu à maior deposição úmida de aerossóis no período chuvoso de verão (LANA, et. al., 2001), entretanto, estudos mais detalhados são necessários.

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO DA INTERFERÊNCIA ATMOSFÉRICA

Os dias foram classificados em faixas de baixa, média, e alta atenuação da radiação conforme a porcentagem de radiação incidente medida em relação à modelada. Para alta interferência atmosférica foi estabelecido um intervalo de 0 a 35% de radiação incidente (Figura 8); para média interferência atmosférica foi determinado o intervalo de 35 a 57% (Figura 9); acima de 57% de radiação incidente (Figura 10) os dias foram classificados como sujeitos à baixa interferência atmosférica. Uma quarta classe foi estabelecida com base nos coeficientes de

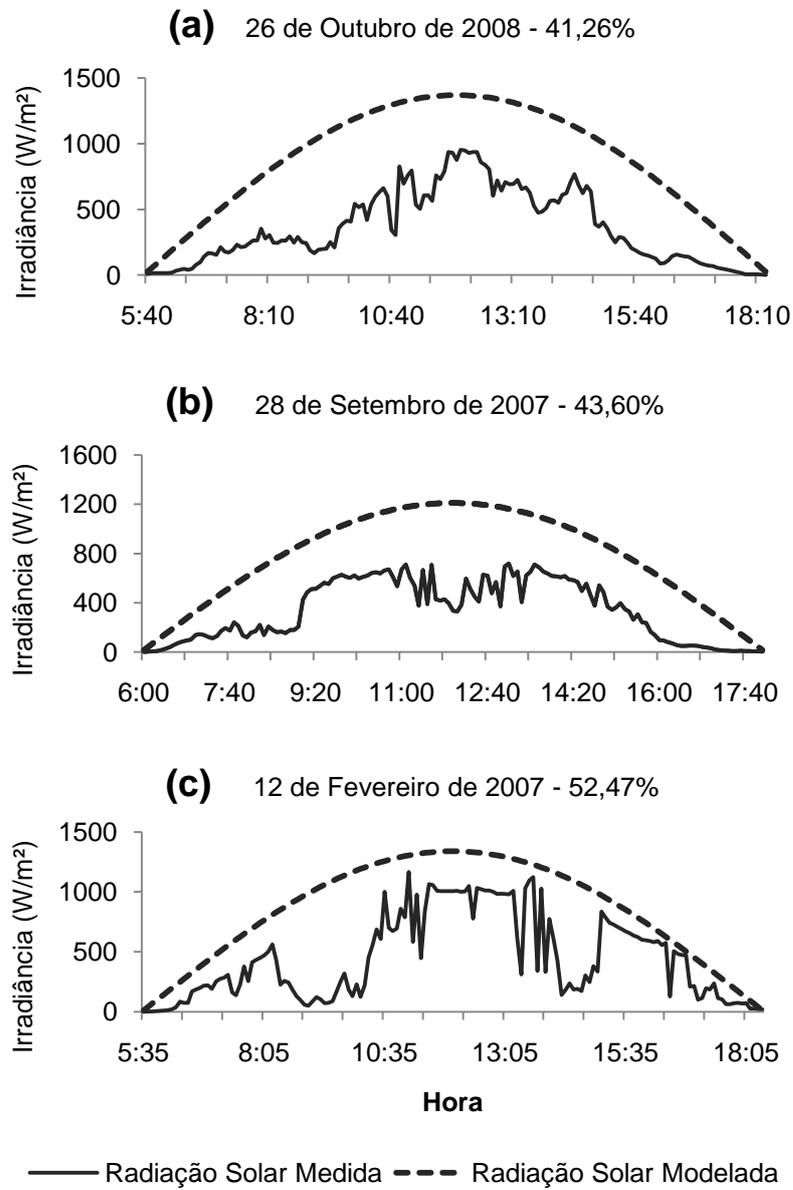
determinação maiores que 0.98 (Figura 7), considerados dias livres de nuvens, e foram subtraídos da classe sujeita à baixa interferência atmosférica.

### ALTA INTERFERÊNCIA ATMOSFÉRICA



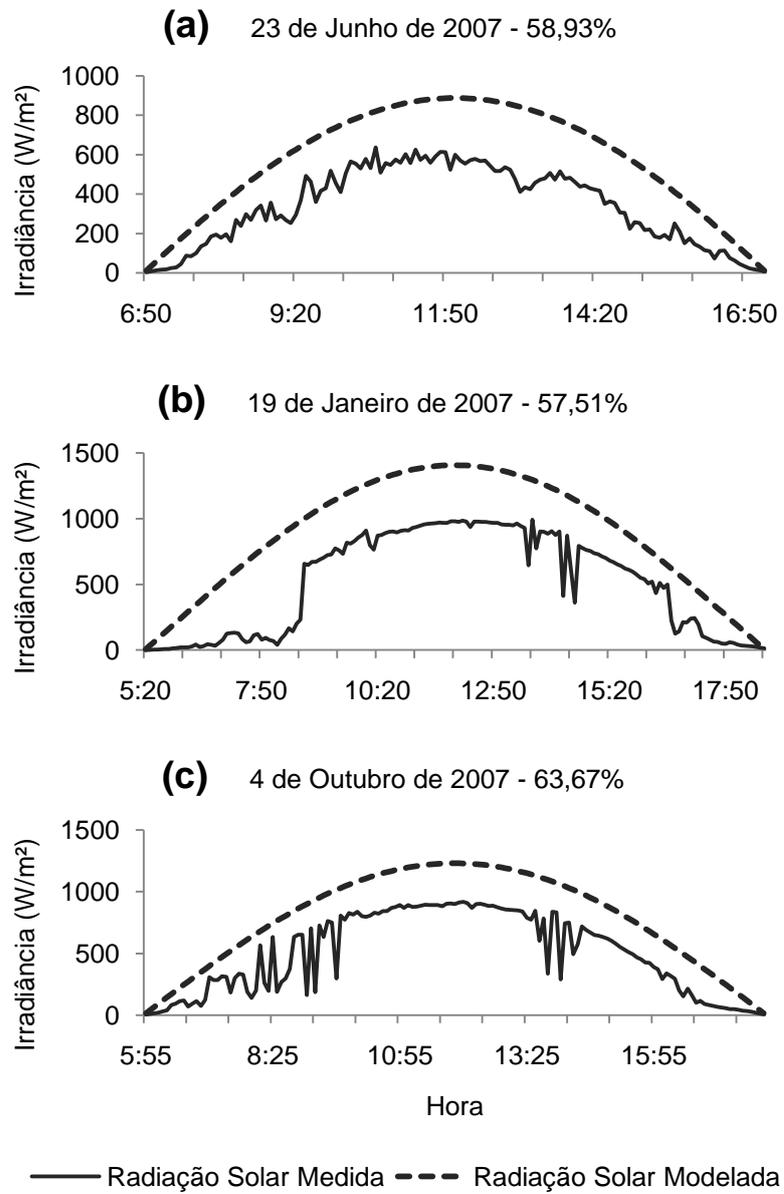
**FIGURA 8.** Exemplos de condição de alta interferência atmosférica (0 a 35 %)

## MÉDIA INTERFERÊNCIA ATMOSFÉRICA



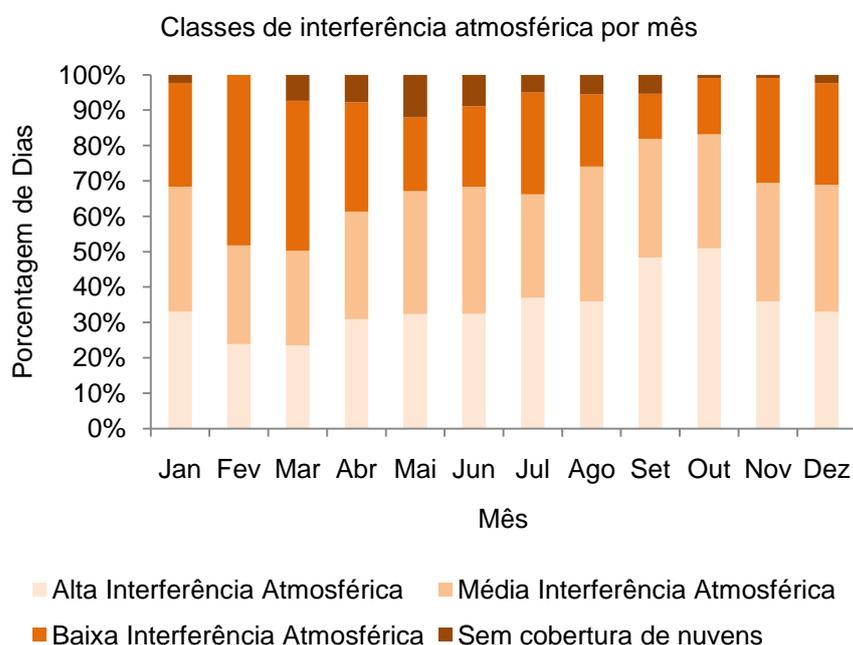
**FIGURA 9.** Exemplos de condição de média interferência atmosférica (35 a 57%).

## BAIXA INTERFERÊNCIA ATMOSFÉRICA



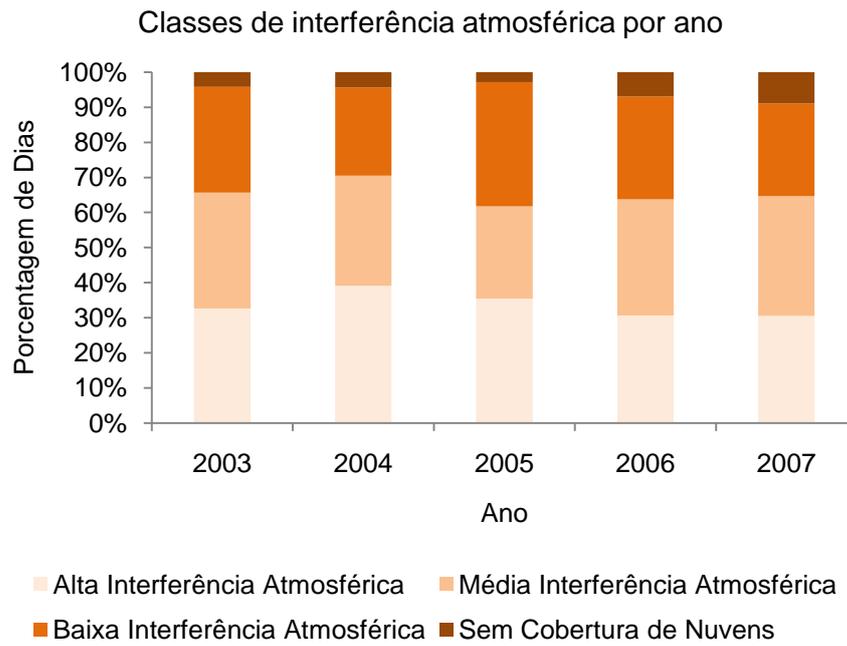
**FIGURA 10.** Exemplos de condição de baixa interferência atmosférica (> 57%)

Os meses de fevereiro e março apresentaram a maior porcentagem de dias sujeitos à baixa interferência atmosférica, porém março apresentou uma maior quantidade de dias totalmente livre de nuvens, englobando 49,76% dos seus dias nestas duas classes (Figura 11). O mês de outubro teve a maior porcentagem média de dias sujeitos à alta interferência atmosférica, com um total de 50,93% dos dias classificados desta forma. Outono e inverno apresentaram as maiores quantidades de dias livres de nuvens, alcançando no mês de maio seu número máximo, totalizando 12%, o que corresponde a aproximadamente quatro dias.



**FIGURA 11.** Porcentagem mensal de dias por classes de interferência atmosférica.

O ano de 2004 apresentou a maior porcentagem de dias sujeitos à alta interferência atmosférica, um total de 143 dias sob esta condição. 2005 conteve o maior número de dias sujeitos à baixa interferência atmosférica, um total de 127 dias. O número de dias livres de cobertura de nuvens variou desde 10 em 2005 até um máximo de 32 em 2007 (Figura 12). A média aproximada destes 5 anos foi de 123 dias sujeitos à alta interferência atmosférica, 115 dias sujeitos à interferência intermediária, 107 dias sujeitos à baixa interferência atmosférica e 20 dias livres de nuvens. De acordo com Maack (1968) os dias límpidos (utilizando um critério de nebulosidade de 0 a 30%) em Paranaguá (média de 42 anos) e Curitiba (média de 77 anos) também são em número médio de 20 por ano.



**FIGURA 12.** Porcentagem anual de dias por classe de interferência atmosférica.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho é um esforço de tentar caracterizar de maneira geral a variação de cobertura de nuvens e outros componentes atmosféricos atenuantes da radiação solar incidente através de uma abordagem da qual não se tem muitas informações ou publicações que utilizem de metodologia semelhante.

O modelo de radiação no topo da atmosfera se mostrou confiável na medida em que apresentou curvas muito condizentes com aquelas medidas em dias limpos. As classes de interferência atmosférica da maneira que foram separadas refletiram bem as características de cada mês e se mostraram de acordo com a porcentagem média de radiação mensal incidente, variando de maneira semelhante entre os meses. Estas classes podem ser associadas, da alta para baixa atenuação da radiação solar, à dias encobertos, com muita variação de nuvens, com predomínio de sol, e à dias livres de nuvens.

O total de dias por classe de interferência atmosférica pode ser visualizado de maneira mais individual no Apêndice A. Sua média anual entre 2003 e 2007 foi de aproximadamente 123 dias sujeitos à alta interferência atmosférica, 115 dias sujeitos à interferência intermediária, 107 dias sujeitos à baixa interferência e 20 dias livres de nuvens.

Os períodos de outono e inverno continuam o maior número de dias livres de nuvens, englobando maio a maior quantidade, aproximadamente quatro dias, e fevereiro a menor. As médias mensais, entretanto, revelaram fevereiro o mês com os maiores valores de radiação incidente. Juntamente com março, este foi o mês sujeito à menor interferência atmosférica, enquanto setembro e outubro se destacaram por estarem mais sujeitos aos processos atmosféricos de atenuação da radiação solar.

Os resultados deste trabalho fornecem informações sobre os períodos mais adequados para atividades turísticas e de lazer que dispõem de iluminação solar bem como para diversas atividades econômicas desenvolvidas no litoral. O maior detalhamento de informações sobre a radiação fornece dados mais precisos para validação de modelos e estudos de diversas áreas do conhecimento. Para trabalhos futuros é interessante a comparação dos resultados deste estudo junto a outros

dados atmosféricos, como dados pluviométricos e informações mais detalhadas de cobertura de nuvens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGULO, R. J.; SOARES, C. R.; MARONE, E.; SOUZA, M. C.; ODRESKI, L. L. R.; NOERNBERG, M.A. Paraná. In: MUEHE, D. (Org.) **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. p. 361–373.
- AYOADE, J. O. A radiação e o balanço térmico. In:\_\_\_\_\_ **Introdução à climatologia para os trópicos**. 10 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. Cap. 3, p. 23-49.
- BIGARELLA J.J.; BECKER R.D.; MATOS D.J. de; WERNER A.. **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná**: Um problema de segurança ambiental e nacional. Curitiba, Gov. Par./SEPL/ADEA, 1978. 249 p.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. LI200X Pyranometer: **Instruction Manual**. Logan, USA: Campbell Scientific, Inc., 1994.
- ECHER, M. P. S.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: Metodologias para aquisição de dados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 3, p. 341-352, março/maio 2006.
- FERREIRA, A. G. Fundamentos de Sensoriamento Remoto. In:\_\_\_\_\_ **Meteorologia prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. Cap. 1, p. 15-24.
- GAMBI, W.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; COLLE, S. Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar do modelo "IGMK" no Brasil. **Revista Brasileira Geofísica**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 15-25, mar. 1998.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). CPTEC. Insolação Média Mensal: América do Sul. 2 imagens de satélite. Disponível em: <<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/imgacervo.jsp?idProd=3310>> Acesso em: Nov. 2009
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). CPTEC. El Niño e La Niña. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>> Acesso em: Nov. 2009.
- IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Macrozoneamento da APA de Guaraqueçaba**. Curitiba: IPARDES, 1990, 1 v., 269 p., Disponível em: <[http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/macro\\_apa\\_guaraquecaba\\_02\\_90\\_v1.pdf](http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/macro_apa_guaraquecaba_02_90_v1.pdf)> Acesso em: Nov. 2009.
- IPARDES – INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Diagnóstico físico-ambiental da Serra do Mar – área sul**. Curitiba: IPARDES, 1991, 1 v., 107 p., Disponível em:

<[http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/diag\\_fisico\\_serradomar\\_04\\_91\\_v1.pdf](http://www.ipardes.gov.br/biblioteca/docs/diag_fisico_serradomar_04_91_v1.pdf)> Acesso em: Nov. 2009.

ISAAKS, A. **Dictionary of Physics**. 4. ed. reissued with new covers. New York, Oxford University Press, 2003

KIRK, J. T. O. Incident solar radiation. In: \_\_\_\_\_ **Light and photosynthesis in aquatic ecosystems**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Cambridge University Press, 1994. Cap. 2, p. 26-40.

LANA, P.C.; E. MORONE; R.M. LOPES & E.C. MACHADO. 2001. The Subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil, p. 131-145. In: U. SEELIGER & B. KJERFVE (Eds). **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**. Berlin, Springer-Verlag, 360p.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Curitiba: M. Roesner, 1968. 350 p.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. A atmosfera terrestre. In:\_\_\_\_\_ **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. Cap. 2, p. 27-39.

RENNÉ, D. S.; WILCOX, S.; MARION, W.; MAXWELL, G. L.; RYMES, M; PHILLIPS, J. Solar Energy. In KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. **Handbook of energy efficiency and renewable energy**. Boulder: CRC Press, 2007. Cap. 19, p. 1-31.

RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**. São Paulo, vol. 22, n° 2, mai/ago 2004.

YAMASOE, M. A. **Apostila da disciplina de meteorologia física II**. Instituto de Astronomia, Geofísica, e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. 2006. Cap. 1 e 4. Disponível em:  
<<http://www.dca.iag.usp.br/www/material/akemi/fisicall/>> Acesso em: 04 de Jan. 2010

## APÊNDICE

**Apêndice A – Total de dias separados por classes de interferência atmosférica.**

|             | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>2002</b> | -   | -   | -   | -   | 12  | 15  | -   | -   | -   | -   | 9   | 11  |
|             | -   | -   | -   | -   | 14  | 12  | -   | -   | -   | -   | 11  | 12  |
|             | -   | -   | -   | -   | 5   | 3   | -   | -   | -   | -   | 10  | 8   |
|             | -   | -   | -   | -   | 0   | 0   | -   | -   | -   | -   | 0   | 0   |
| <b>2003</b> | 11  | 4   | 8   | 10  | 4   | 10  | 14  | 10  | 10  | 12  | 12  | 13  |
|             | 10  | 8   | 8   | 6   | 13  | 8   | 9   | 14  | 13  | 10  | 7   | 13  |
|             | 10  | 16  | 13  | 12  | 6   | 11  | 7   | 5   | 6   | 9   | 11  | 3   |
|             | 0   | 0   | 2   | 2   | 8   | 1   | 0   | 1   | 1   | 0   | 0   | 0   |
| <b>2004</b> | 10  | 6   | 8   | 12  | 18  | 9   | 16  | 7   | 19  | 15  | 11  | 12  |
|             | 15  | 9   | 3   | 9   | 4   | 17  | 6   | 14  | 8   | 9   | 13  | 8   |
|             | 6   | 14  | 17  | 8   | 6   | 2   | 8   | 6   | 1   | 7   | 6   | 11  |
|             | 0   | 0   | 3   | 1   | 3   | 2   | 1   | 4   | 2   | 0   | 0   | 0   |
| <b>2005</b> | 11  | 3   | 7   | 12  | 8   | 8   | 8   | 7   | 20  | 24  | 10  | 9   |
|             | 9   | 6   | 9   | 9   | 14  | 6   | 5   | 9   | 3   | 6   | 10  | 8   |
|             | 9   | 18  | 15  | 8   | 6   | 14  | 18  | 14  | 5   | 1   | 9   | 10  |
|             | 0   | 0   | 0   | 1   | 3   | 2   | 0   | 1   | 2   | 0   | 1   | 0   |
| <b>2006</b> | 6   | 8   | 9   | 6   | 7   | 10  | 6   | 10  | 12  | 14  | 12  | 11  |
|             | 10  | 8   | 11  | 8   | 8   | 13  | 11  | 11  | 10  | 9   | 9   | 12  |
|             | 15  | 12  | 11  | 10  | 11  | 4   | 11  | 6   | 5   | 7   | 8   | 6   |
|             | 0   | 0   | 0   | 6   | 4   | 3   | 3   | 4   | 3   | 1   | 1   | 0   |
| <b>2007</b> | 6   | 6   | 2   | 7   | 11  | 6   | 12  | 20  | 11  | 14  | 9   | 6   |
|             | 12  | 6   | 7   | 9   | 11  | 14  | 7   | 9   | 17  | 12  | 7   | 12  |
|             | 10  | 16  | 13  | 13  | 5   | 7   | 5   | 2   | 2   | 4   | 10  | 8   |
|             | 3   | 0   | 9   | 0   | 4   | 3   | 7   | 0   | 0   | 1   | 0   | 5   |
| <b>2008</b> | 14  | 7   | 10  | 9   | -   | 9   | 7   | 16  | 14  | 16  | 11  | 7   |
|             | 11  | 9   | 10  | 10  | -   | 9   | 14  | 9   | 7   | 11  | 12  | 10  |
|             | 5   | 13  | 11  | 6   | -   | 7   | 10  | 6   | 4   | 3   | 7   | 14  |
|             | 1   | 0   | 0   | 2   | -   | 2   | 0   | 0   | 2   | 0   | 0   | 0   |
| <b>2009</b> | 13  | 13  | 7   | 7   | 10  | 10  | 15  | 8   | 12  | 8   | -   | -   |
|             | 9   | 9   | 10  | 11  | 11  | 6   | 8   | 14  | 11  | 5   | -   | -   |
|             | 8   | 6   | 12  | 7   | 6   | 6   | 4   | 5   | 1   | 2   | -   | -   |
|             | 1   | 0   | 2   | 5   | 4   | 8   | 0   | 2   | 0   | 0   | -   | -   |

|                    |                     |                     |                 |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| Alta Interferência | Média Interferência | Baixa Interferência | Livre de nuvens |
|--------------------|---------------------|---------------------|-----------------|