



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
OTACILIO LEANDRO DE MENEZES NETO

METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO
SOLAR APLICADA A
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

FORTALEZA – CEARÁ
2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

OTACILIO LEANDRO DE MENEZES NETO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR APLICADA A
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho apresentado ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre.

Universidade Estadual do Ceará

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinto Ramalho

Co-orientador: Phd. Alexandre Araújo Costa

FORTALEZA, 2007

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR APLICADA A
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

Este trabalho foi julgado adequado à obtenção do grau de Mestre e aprovado em sua forma final pelo Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará.

Fortaleza, 17 de agosto de 2007.

Prof. Dr. Fernando Pinto Ramalho
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Alexandre Costa Araújo
Universidade Estadual do Ceará

Prof. Dr. Marcos Pimenta de Abreu
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof.(a) Dr.(a) Jaidete Monteiro de Souza
Universidade Estadual do Ceará

M551m Menezes Neto, Otacilio Leandro de
Metodologia para estimativa de radiação solar aplicada a
região nordeste de Brasil / Otacilio Leandro de Menezes
Neto. _____Fortaleza, 2007.
132p. ; il.
Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinto Ramalho.
Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) -
Universidade Estadual de Ceará, Centro de Ciências e
Tecnologia.
1. Energia solar. 2. Transferência radiativa. 3. Modelagem
Numérica. I. Universidade Estadual de Ceará, Centro de
Ciências e Tecnologia.

CDD: 333.7

Dedico este trabalho a todos os professores e amigos que ajudaram, incentivaram e deram força para que ele fosse concluído.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à minha namorada, Sueny Angelim, pelo apoio, compreensão e paciência.

Agradeço ao apoio do CENEA que colaborou de várias formas.

Agradeço a parceria da FUNCEME, sem a qual este trabalho não poderia ter sido concluído.

Agradeço aos meus orientadores, aos colegas da FUNCEME, Sérgio Sombra, Carlos Santana e Wagner Melcíades;

Agradeço, ainda, a todos os amigos do MFCA.

A morte do homem começa no instante em que ele desiste de aprender

— *Albino Teixeira*

RESUMO

Devido ao uso intensivo dos combustíveis fósseis nas últimas décadas, aumentou significativamente a concentração de gases indutores de efeito estufa na atmosfera, causando o fenômeno conhecido como aquecimento global, que por sua vez obriga a uma mudança significativa na matriz energética mundial devido aos possíveis efeitos nocivos desse aumento da temperatura média do planeta sobre o meio ambiente. Em resposta a essa demanda, a utilização de fontes alternativas de energias, como a solar, a eólica e a biomassa, vem crescendo significativamente nos últimos anos, sendo a energia solar, em particular, uma fonte abundante na região Nordeste do Brasil. O conhecimento preciso da radiação solar incidente é assim de grande importância para o planejamento energético brasileiro, servindo de base para o desenvolvimento de futuros projetos de plantas fotovoltaicas e de aproveitamento da energia solar pelas mais diversas tecnologias. Este trabalho apresenta uma metodologia alternativa para o mapeamento da energia solar incidente ao nível do solo para a região Nordeste do Brasil, utilizando o modelo atmosférico de meso-escala RAMS, validado e ajustado utilizando dos dados medidos pela rede de plataformas de coleta de dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Os resultados mostraram que o modelo apresenta erros sistemáticos sempre sobreestimando a radiação na superfície e após ajustes nos resultados, utilizando uma relação entre a fração de cobertura de nuvens e a radiação no topo da atmosfera, encontra-se correlações de 0,92 com intervalos de confiança de 13,5 W/m². O valor médio anual corrigido da radiação solar incidente no estado do Ceará, obtido pela presente metodologia é de 260 W/m².

Palavras-chave: Energia Solar, Transferência Radiativa, Modelagem Numérica.

ABSTRACT

Due to the intensive use of fossil fuels over the last decades, the concentration of greenhouse gases in the atmosphere has raised significantly, causing the phenomena known as global warming, and creating the need for a change in the world's energy matrix. Therefore, the use of renewable energies, like solar, wind power and biomass is strongly growing, and solar energy, in particular, is abundantly available in the Brazilian northeast region. The precise knowledge of the incoming solar radiation is of great importance for the Brazilian energy planning, serving as a basis for the development of future photovoltaic power plants and the use of solar energy through the most diverse technologies. This work presents an alternative methodology for mapping the solar energy at the ground level for the northeast area of Brazil, using the atmospheric mesoscale model RAMS, validated and corrected through the data gathered from the network of meteorological platforms (PCDs) belonging to the Foundation of Meteorology and Hydrological Resources of Ceará (FUNCEME). The results indicate that the model exhibits systematic errors always overestimating the solar radiation at ground level and after adjusting the data, using a relation developed for the cloud cover and the radiation at the top of atmosphere; correlations of 0.92 have been found with confidence intervals of 13.5 W/m². The average annual solar power for the state of Ceará at ground level, obtained through this methodology is 260 W/m².

Keywords: Solar Energy, Radiative Transfer, Numerical Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema solar de aquecimento de água, Florianópolis, SC. Foto: Paulo Henrique Santiago.....	3
Figura 2 – Distribuição espacial dos postos de coleta no estado do Ceará, utilizadas no Atlas Solarimétrico do Brasil. Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil.....	8
Figura 3 – Média anual para a radiação solar incidente em MJ/m ² . Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil.....	9
Figura 4 – Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	11
Figura 5 – Média anual da radiação solar global. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar....	17
Figura 6 – Média trimestral da radiação solar global. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.	18
Figura 7 – (a) a energia total necessária para aquecimento e (b) o tempo de retorno do investimento. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	21
Figura 8 – Efeito de redução de pico ao adicionar-se um pequeno número de módulos PV para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede numa curva de demanda típica de um centro urbano. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	23
Figura 9 – Eixo de rotação da Terra e as estações do ano. Fonte: http://www.seed.slb.com ...	25
Figura 10 – Gráfico da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície, assim como as bandas de absorção dos principais gases atmosféricos. Fonte: Reportagem “A energia que vêm do Sol”.....	27
Figura 11 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.....	30
Figura 12 – O modelo de transferência radiativa, F_{\downarrow} e F_{\uparrow} denotam os fluxos descendentes e ascendentes. $Re(n)$ e $A(n)$ representam respectivamente a refletância e a absortância na n -ésima camada. $Re(1, n+1)$ é a múltipla refletância para todas as camadas acima da camada $(n+1)$	41
Figura 13 - Distribuição espacial das PCDs. Fonte: www.funceme.br	55
Figura 14 – Sensitividade espectral do piranômetro SP LITE comparado com a radiação solar.	56

Figura 15 – Localização das PCDs escolhidas para validação do modelo. O contorno representa a topografia.	61
Figura 16 – Média anual da radiação solar incidente usando a parametrização de Chen & Cotton, com destaque para a grade horizontal usada na simulação.	65
Figura 17 – Comparação entre esquemas de Chen & Cotton (esquerda) e Harrington (direita). Média mensal para o mês de Maio.	67
Figura 18 – Comparação entre esquemas de Chen & Cotton (esquerda) e Harrington (direita). Média mensal para o mês de Setembro.	67
Figura 19 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, resultado do modelo sem correções. .	71
Figura 20 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, corrigida através de regressão de potência entre modelado e observado.	75
Figura 21 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, corrigida através de regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada sobre a radiação no topo da atmosfera.	78
Figura 22 – Média anual corrigida através de regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada sobre a radiação no topo da atmosfera.	78
Figura 23 – Médias trimestrais da radiação solar incidente para casos de El Nino (esquerda) e La Nina (direita) e as diferenças entre estes fenômenos (centro), na primeira grade da simulação.	92
Figura 24 – Mesmo que na Figura 23, porém para segunda grade da simulação.	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Média móvel da radiação solar incidente medida em W/m^2 em Quixadá, Ipú e Caucaia.	58
Gráfico 2 - Média móvel da radiação solar incidente medida em W/m^2 em Jati, Ubajara e Icapuí.	58
Gráfico 3 - Médias móveis por macro regiões: (a) Sertão, (b) Litoral e (c) Região Serrana. ..	60
Gráfico 4 - Médias mensais das localidades utilizadas para validar o modelo RAMS.	62
Gráfico 5 - Média entre as localidades utilizadas no Gráfico 4 e média da radiação no topo da atmosfera.	63
Gráfico 6 – Comparação entre o resultado do modelo (média diária) para os dois esquemas de radiação.	66
Gráfico 7 – Comparação entre as simulações e as PCDs para as localidades de (a) Icó e (b) Sobral.	68
Gráfico 8 – Regressão de potência entre a radiação solar modelada e observada.	73
Gráfico 9 – Regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada / radiação no topo da atmosfera.	76
Gráfico 10 – Comparação entre as radiações observadas, modeladas e corrigidas. O intervalo de confiança para a correção “cloud” é de $\pm 13,5 W/m^2$	79
Gráfico 11 – Gráfico de distribuição de frequência dos erros absolutos entre as séries modeladas e observadas.	80
Gráfico 12 – Comparação entre a correção de cobertura de nuvem e a radiação solar incidente observada para cada PCD analisada.	87
Gráfico 13: Médias mensais pra os anos de 1973-74 (La Niña) e 1982-83 (El Niño), para a segunda grade da simulação.	96
Gráfico 14: Comparação entre as médias móveis para os casos de El Niño e La Niña para a segunda grade da simulação.	96
Gráfico 15: Diferença entre as médias móveis do Gráfico 12.	97

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT THE EFFECTS	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE GRÁFICOS.....	XII
SUMÁRIO	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TRABALHOS RELEVANTES.....	6
1.1.1 <i>Atlas Solarimétrico do Brasil.....</i>	6
1.1.2 <i>Atlas Brasileiro de Energia Solar.....</i>	9
1.1.2.1 Metodologia Utilizada – O modelo BRASIL -SR.....	10
1.1.2.2 Mapas Solarimétricos.....	15
1.1.2.3 Cenários de Aplicações da Energia Solar.....	19
1.1.2.3.1 Aquecimento Solar.....	19
1.1.2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos interligados à rede em áreas urbanas.....	21
2 BASES TEÓRICAS	24
2.1 VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA.....	24
2.1.1 <i>A órbita da Terra</i>	24
2.1.2 <i>O espectro solar, a constante solar e distribuição da insolação no topo da atmosfera.</i>	26
2.2 TRANSFERÊNCIA RADIATIVA	29
2.3 CARACTERÍSTICAS DA MICROFÍSICA DE NUVENS	31
2.3.1 <i>Distribuição dos tamanhos das partículas.....</i>	31
2.3.2 <i>A concentração das gotículas</i>	36
3 O MODELO RAMS.....	38
3.1 PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS.....	39
3.1.1 <i>Chen & Cotton, 1983.....</i>	39
3.1.1.1 Equação da transferência radiativa.....	40
3.1.1.2 Parametrização da refletância, transmitância e absortância numa atmosfera sem nuvens.....	42
3.1.1.2.1 Parametrização da Absortância.	42
3.1.1.2.2 Espalhamento Molecular da Atmosfera.....	43
3.1.1.2.3 Absorção do Ozônio.....	43
3.1.1.3 Parametrização da refletância, transmitância e absortância numa atmosfera com nuvens.	44
3.1.1.4 Parametrização de refletância, transmitância e absortância numa atmosfera mista com céu claro e cobertura de nuvens.	46
3.1.2 <i>Harrington, 1997</i>	49
3.1.2.1 As equações básicas de fluxo para o método δ -dois fluxos.....	49
3.1.2.2 Propriedades ópticas das nuvens	51

4	DADOS OBSERVADOS	55
4.1	CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO	56
4.2	ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	57
5	SIMULAÇÕES	64
5.1	TESTES DE SENSIBILIDADE	64
5.2	AJUSTES AO MODELO DE CHEN & COTTON	69
5.3	ESTUDO NUMÉRICO DA VARIABILIDADE INTERANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR À SUPERFÍCIE ASSOCIADA A EVENTOS DE EL NIÑO E LA NIÑA	88
6	CONCLUSÕES	98
	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A.....	107

1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, no século XVIII, a humanidade começou a usar os combustíveis fósseis com mais intensidade, através da máquina a vapor, que tinha o carvão mineral como seu combustível básico. No século XIX, foi a vez do petróleo entrar na matriz energética dos países industrializados, de modo que estes dois combustíveis formaram a base energética do mundo de hoje, movimentando aviões, automóveis e navios e gerando a energia elétrica utilizada por grande parte da humanidade através das usinas termelétricas a carvão, óleo diesel e gás natural.

No entanto, os combustíveis fósseis não são renováveis. Estimativas apontam que o petróleo teria cerca de 50 anos de disponibilidade nas atuais taxas de consumo e o carvão mineral cerca de 400 anos.

Por outro lado, a quantidade de energia necessária para atender a demanda mundial vem crescendo continuamente, pois o crescimento populacional se dá num ritmo exponencial. Considerando as taxas atuais de fertilidade estima-se que a população mundial passará dos atuais 6,5 bilhões para 9 a 12 bilhões em 2050.

Outro fator complicador para o uso dos combustíveis fósseis pelas gerações futuras é o fenômeno do aquecimento global. O uso indiscriminado de combustíveis fósseis que serviram de base para o crescimento da civilização industrial em que vivemos, aumentou significativamente a concentração de gás carbônico (CO_2) na atmosfera terrestre. O CO_2 é um gás de efeito estufa, que impede a liberação para o espaço da radiação de onda longa (infravermelho), esta fica retida na atmosfera, colaborando para o aumento da temperatura da Terra. Deve-se lembrar que o efeito estufa em si não é prejudicial, pois mantém a temperatura média da Terra por volta do 15°C . No entanto, a emissão de gases poluentes, como o CO_2 e o meta-

no (CH₄) na atmosfera tende a provocar até o final do século XXI um aumento da temperatura média de até 5°C, o que geraria uma série de efeitos indesejáveis, tais como: a elevação do nível médio dos oceanos, submergindo regiões costeiras, inviabilização de regiões agrícolas em todo o planeta, resultando em catástrofe social generalizada, fenômenos climáticos mais severos, etc.

Para se contornar este problema, busca-se mudar, de forma urgente, a matriz energética mundial, reduzindo o uso dos combustíveis fósseis. Neste contexto, as fontes de energias alternativas, como a solar, a biomassa e a eólica, vêm crescendo de forma significativa no mundo nos últimos 10 anos, impulsionadas pela pressão ambiental que gera mecanismos econômicos de incentivo a essas fontes alternativas de energia.

A energia que recebemos do Sol é indispensável para a vida na Terra, pois essa energia é responsável pelos mais diversos processos que ocorrem em nosso planeta, desde a fotossíntese realizada pelas plantas e os fenômenos atmosféricos, até a formação dos próprios combustíveis fósseis que resultaram da decomposição de matéria orgânica a milhões de anos atrás.

Esta energia solar pode também ser aproveitada para gerar energia elétrica ou aquecimento. Nas regiões Sul e Sudeste do país, em particular, o aquecimento de água é importante, pois os invernos apresentam temperaturas baixas e o uso de energia solar para aquecimento evita o consumo de combustíveis fósseis ou de eletricidade, contribuindo assim para a redução da demanda energética convencional. A Figura 1 exemplifica o uso de um sistema de aquecimento solar utilizado na cidade de Florianópolis, em Santa Catarina.



Figura 1 – Sistema solar de aquecimento de água, Florianópolis, SC. Foto: Paulo Henrique Santiago.

A conversão direta de energia solar em eletricidade se dá através de células fotovoltaicas, que são dispositivos semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz. O uso dessa energia enfrenta dois problemas: a intermitência devido ao ciclo diurno do sol e a ocorrência de nuvens que diminui a energia disponível ao nível do solo, além da variação do ângulo de incidência da radiação solar ao longo do ano.

Outro fator que inibe o crescimento do uso de células fotovoltaicas é o seu alto custo e baixo rendimento. Embora as células fotovoltaicas de silício monocristalino, por exemplo, já atinjam em laboratório eficiência de conversão de até 28%, o rendimento dos produtos disponíveis comercialmente são tipicamente da ordem de 12% a 15%. As pesquisas nesta área vêm avançando continuamente, bem como vem ocorrendo a implantação a nível mundial de usina fotovoltaicas de grande escala (5 a 10 MW) ligadas diretamente à rede elétrica de transmissão, o que cria uma economia de escala favorável a redução do preço.

O estado do Ceará, assim como todo o Nordeste, é abastecido de energia elétrica proveniente das hidroelétricas de Tucuruí no rio Tocantins e Paulo Afonso, Xingó, Itaparica,

Sobradinho e Três Marias localizadas no rio São Francisco. A distância entre a fonte e o centro consumidor aumenta consideravelmente as perdas devido ao transporte da energia e faz com que a extensão da rede elétrica para comunidades isoladas apresentem maiores limitações devido aos altos custos associados. Esse fator é ainda mais exacerbado devido à inexistência de novos aproveitamentos hídricos de grande escala na região que permitam o atendimento do crescimento da demanda, sendo que as novas hidroelétricas propostas, como Belo Monte estão localizadas na região Amazônica.

Alem disso, como ficou demonstrado durante a crise do assim chamado “Apagão Elétrico” em 2002, a grande dependência da fonte hídrica faz com que a região Nordeste seja particularmente vulnerável as condições climáticas, o que por sua vez acaba resultando na maior dificuldade de atração de novos investimentos para essa região.

A vantagem em relação à energia hidráulica, que é a base atual da matriz de energia elétrica no Brasil, é que os sistemas de energia solar podem ser instalados em regiões isoladas, e gerar energia de forma descentralizada, permitindo que a água dos reservatórios das usinas hidroelétricas seja economizada. No caso do estado do Ceará o custo médio por residência da eletrificação rural vem aumentando continuamente, possibilitando que a energia solar fotovoltaica seja uma opção atrativa.

Por outro lado, o crescimento da demanda de energia elétrica no Nordeste associado às condições climáticas extremamente favoráveis, faz com que essa região seja ideal para implantação futura de plantas solares de grande potência ligadas diretamente à rede elétrica de transmissão da Chesf. Pode-se prever que em algum momento futuro teremos no Ceará usinas fotovoltaicas de capacidade da ordem de 100 MW, semelhante a proposta atualmente para Portugal na região de Alentejo, ou usinas solares por ciclo térmico de como a existente no deserto de Mojave nos EUA com potencia nominal total de 350 MW, o que certamente contri-

buirá para poupar a água armazenada nos reservatórios das usinas hidroelétricas, permitindo o seu uso para fins mais nobres.

Por tudo isso o mapeamento da radiação solar incidente no estado do Ceará e na sua extensão para a região Nordeste como um todo é de extrema importância para o planejamento energético brasileiro permitindo que projetos de instalação de plantas fotovoltaicas e de aproveitamento de energia solar pelas mais diversas tecnologias possam ser efetuados numa base sólida que reduza inclusive os riscos econômicos e estratégicos para os investidores ou o próprio governo.

No presente trabalho foi utilizado o modelo atmosférico CSU RAMS na sua última versão 6.0 (Walko, Tremback, 2001), para os cálculos da radiação solar incidente. Este modelo de meso-escala é comumente usado para o cálculo das mais diversas variáveis atmosféricas, inclusive a radiação solar, sobre uma região delimitada.

Com a utilização dos dados coletados nos últimos 2 anos pelas mais de 70 estações meteorológicas (PCDs) operadas pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), usados na fase de validação do modelo, pode-se estabelecer com boa precisão, o mapeamento da radiação solar incidente sobre a região Nordeste do Brasil através da correção dos resultados do modelo RAMS pelas medidas reais obtidas das PCDs. A continuação desse projeto pode auxiliar também no estabelecimento de melhores modelos de atmosféricos regionais uma vez que a estimativa exata dessa radiação é fator primordial para o estabelecimento preciso do efeito de nuvens e aerossóis na reflexão da radiação solar para o espaço.

1.1 TRABALHOS RELEVANTES

É importante para o desenvolvimento desta dissertação conhecer também os dois trabalhos mais importantes sobre o estudo da estimativa da radiação solar à superfície. Na sequência temos um breve resumo sobre o Atlas Solarimétrico do Brasil e em seguida, o Atlas Brasileiro de Energia Solar, recentemente publicado.

1.1.1 Atlas Solarimétrico do Brasil

Em janeiro de 1993 foi criado, sob a coordenação da ELETROBRÁS, o Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica (GTEF) que tinha como meta impulsionar a tecnologia de captação solar no Brasil. Com a criação do GTEF, foi criado também um Grupo de Trabalho em Solarimetria, sob a coordenação do Grupo FAE-UFPE/DEFA-CHESF, que tinha como meta descrever a crítica situação da Solarimetria no Brasil e propor algumas medidas que permitiriam suprimir partes destas deficiências. Logo após, em 1994, foi submetido ao CEPEL o Projeto para a elaboração do Atlas Solarimétrico Nacional. Finalmente, em maio de 1996 foi assinado o convênio FADE-UFPE/CEPEL que permitiu executar o projeto da elaboração do Atlas.

O Atlas Solarimétrico do Brasil foi elaborado usando-se de publicações nacionais (artigos, teses e dissertações) sobre solarimetria nos últimos 40 anos. Foram selecionadas publicações que continham dados de radiação, de insolação, mapas solarimétricos, mapas climatológicos e fitogeográficos do Brasil e de países limítrofes. Estas informações foram sistematicamente selecionadas e organizadas para que pudessem ser utilizadas no Atlas. Os dados de radiação solar estão na unidade de MJ/m^2 .

Com relação ao conteúdo do Atlas, algumas informações merecem destaque:

a. Quanto aos equipamentos utilizados:

- Heliógrafos: produzem informações sobre a insolação diária.
- Actinógrafos: é destinado à medição da radiação solar global sobre um plano horizontal.
- Piranômetros: são equipamentos destinados a medir a radiação solar global e difusa.

Os dois primeiros têm uma alta margem de erro (algo em torno de 15 a 20%) enquanto o último tem uma margem de erro de 5%.

b. Quanto à distribuição espacial dos instrumentos de medida:

A Figura 2 mostra a distribuição espacial dos postos de coleta no estado do Ceará, onde se vê que apenas um piranômetro foi utilizado (na cidade de Fortaleza) para todo o estado, o que resulta numa maior margem de erro com relação ao produto final. Para suprir esta deficiência foram feitas extrapolações assumindo que uma medida seria válida por 200 km, com uma margem de erro de 15% e com um nível de confiança de 90%.

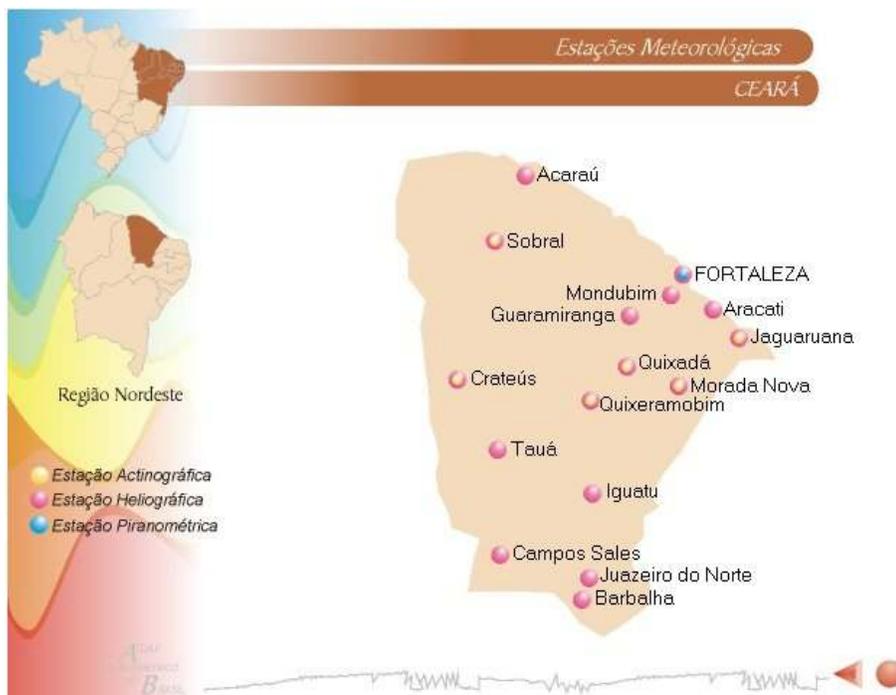


Figura 2 – Distribuição espacial dos postos de coleta no estado do Ceará, utilizadas no Atlas Solarimétrico do Brasil. Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil

c. Quanto à distribuição temporal:

A maioria dos dados coletados para o estado de Ceará são basicamente da década de 70, por este motivo, uma atualização se faz necessária.

d. Resultados:

A Figura 3 mostra a média anual para a radiação solar incidente. Nesta figura todo o estado do Ceará apresenta uma única média anual de 18 MJ/m^2 . Nota-se que para o Ceará, não apresentam-se variações significativas, por isso necessita-se uma melhor resolução para se obterem melhores resultados.

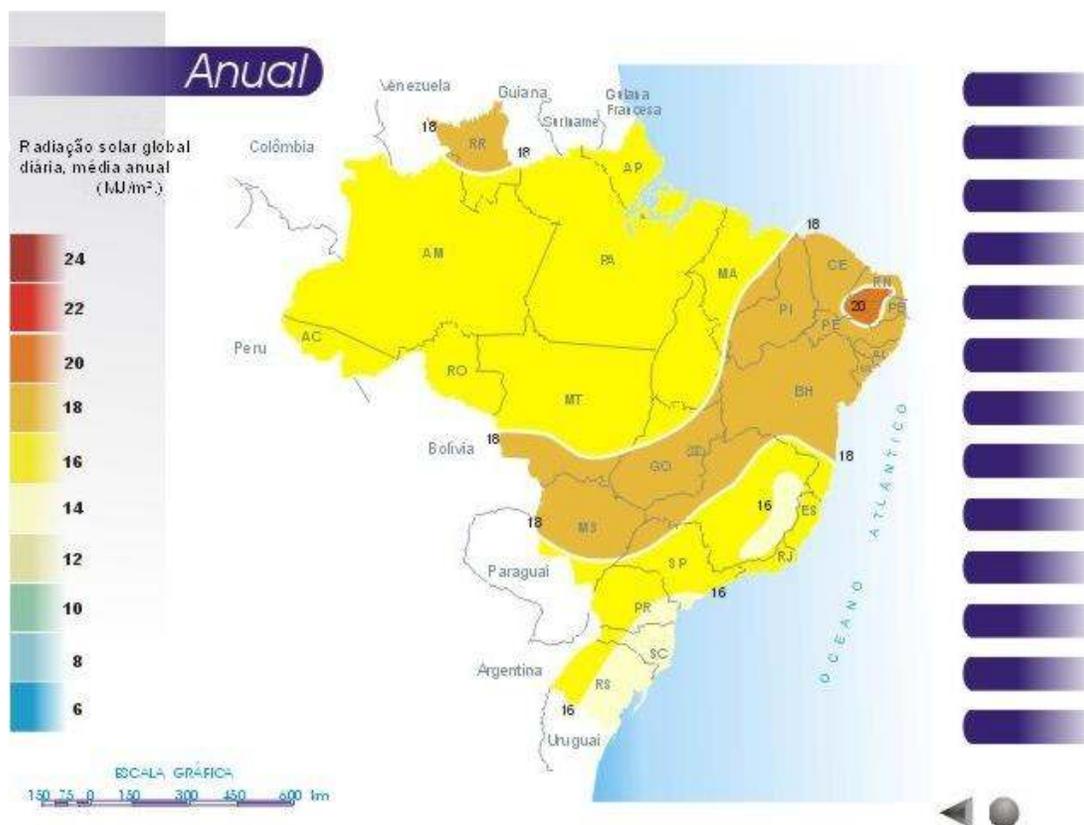


Figura 3 – Média anual para a radiação solar incidente em MJ/m². Fonte: Atlas Solarimétrico do Brasil.

1.1.2 Atlas Brasileiro de Energia Solar

Esta publicação foi desenvolvida dentro do escopo do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), financiado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e co-financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF). O projeto, iniciado em 2001, sob a coordenação da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DMA/CPTEC/INPE), tem como foco principal promover o levantamento de uma base de dados confiável e de alta qualidade visando auxiliar no planejamento e desenvolvimento de

políticas públicas de incentivo a projetos nacionais de energia solar e eólica; e atrair o capital de investimentos da iniciativa privada para a área de energias renováveis.

1.1.2.1 Metodologia Utilizada – O modelo BRASIL -SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de informações climatológicas e parâmetros determinados a partir de imagens de satélite. O modelo BRASIL-SR foi desenvolvido com base no modelo IGMK de autoria de pesquisadores do GKSS Forschungszentrum e descrito por Stuhlman et al. (1990). A Figura 4 mostra o fluxograma dos procedimentos executados para obtenção das estimativas de irradiação solar utilizando o modelo BRASIL-SR. A obtenção da estimativa do fluxo de radiação solar incidente na superfície é dividida em três etapas:

- Tratamento dos dados climatológicos e das imagens de satélite;
- Solução da equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos”, que constitui em fluxo de energia ascendente e outro descendente em relação a uma certa camada da atmosfera;
- Cálculo de cada uma das componentes do fluxo de radiação solar (global, direta e difusa).

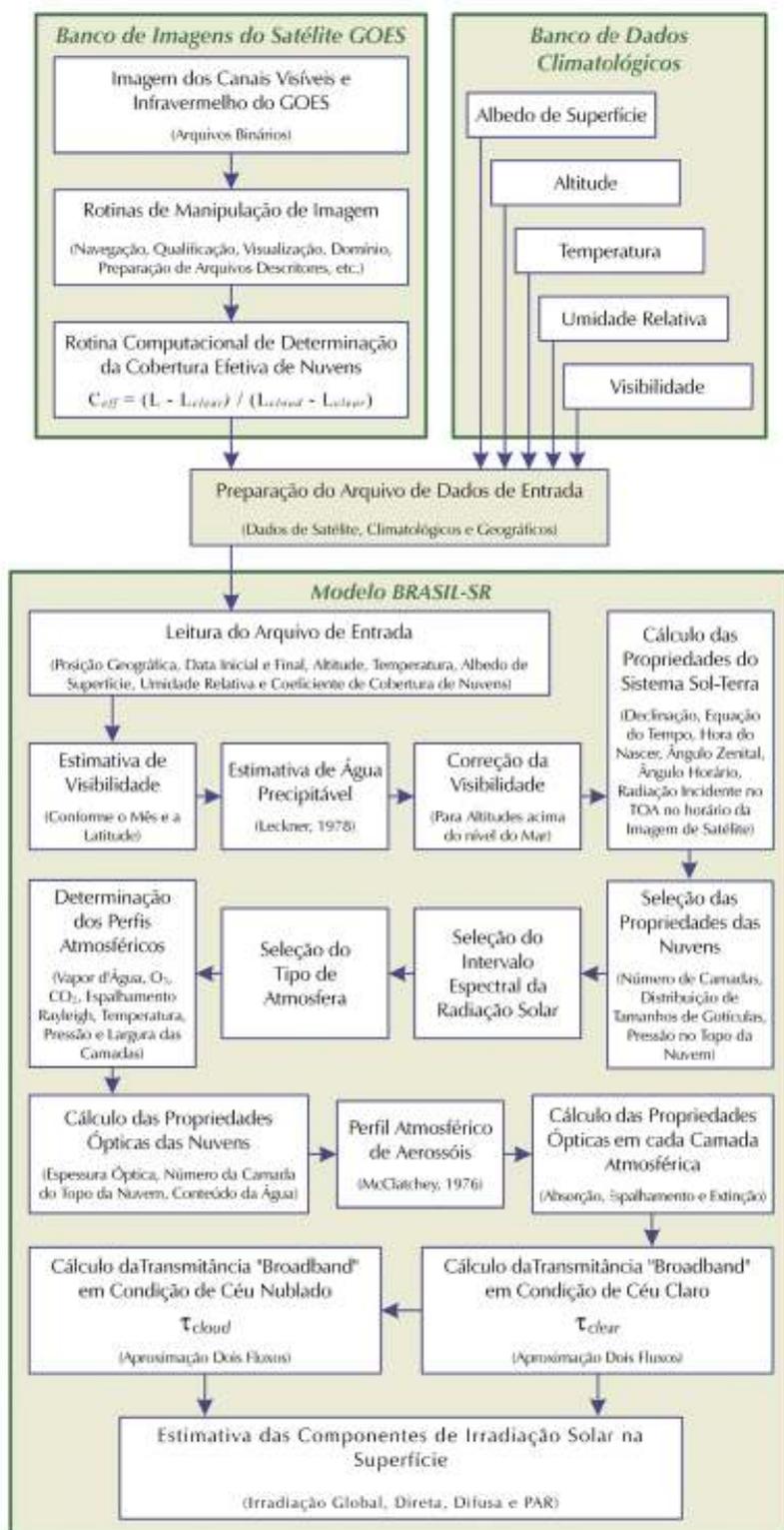


Figura 4 – Fluxograma do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

A primeira etapa tem como objetivo preparar os dados de entrada necessários para alimentar o modelo. A base de dados necessária para tal é constituída de 6 variáveis: temperatura do ar, albedo de superfície, umidade relativa, visibilidade atmosférica, cobertura efetiva de nuvens e elevação da superfície. A descrição das características e propriedades da base de dados utilizada para alimentar o modelo será descrita em detalhes no próximo tópico. Nas duas etapas seguintes, o modelo assume três hipóteses básicas:

- A cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da transmitância atmosférica de modo que o modelo BRASIL-SR utiliza valores climatológicos das variáveis atmosféricas para estimar as demais propriedades óticas da atmosfera;
- O fluxo de radiação solar no topo da atmosfera está linearmente distribuído entre as duas condições atmosféricas extremas: céu claro e céu completamente encoberto;
- O modelo assume, também, a existência de uma relação linear entre o fluxo de radiação solar global na superfície e o fluxo de radiação refletida no topo da atmosfera.

Dessa forma, o fluxo de radiação solar global incidente na superfície, Φ_g , pode ser obtido a partir de:

$$\Phi_g = \Phi_0 \left\{ (\tau_{clear} - \tau_{cloud})(1 - C_{eff}) + \tau_{cloud} \right\} \quad (1.1)$$

onde Φ_0 é a radiação incidente no topo da atmosfera, τ_{clear} e τ_{cloud} são as transmitâncias atmosféricas em condições de céu claro e completamente nublado, respectivamente, e C_{eff} é a cobertura efetiva de nuvens dada pelas imagens de satélite:

$$C_{eff} = \frac{L - L_{clear}}{L_{cloud} - L_{clear}} \quad (1.2)$$

A leitura instantânea obtida para um pixel da imagem do satélite está representada por L e os índices “clear” e “cloud” referem-se à leitura em condições de céu claro e de céu encoberto por nuvens, respectivamente.

Dessa forma, a determinação do fluxo de radiação solar global incidente na superfície pode ser estimada a partir de duas componentes independentes: a primeira componente corresponde à condição de céu claro, τ_{clear} , e a segunda refere-se à condição de céu totalmente encoberto, τ_{cloud} . A natureza estocástica do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é avaliada através do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} . A componente τ_{clear} é função do albedo de superfície, do ângulo zenital solar e da espessura ótica dos constituintes atmosféricos. A componente τ_{cloud} é função do ângulo zenital solar, da espessura ótica e de propriedades óticas das nuvens.

As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos. Para determinação das transmitâncias τ_{clear} e τ_{cloud} , o modelo utiliza 135 intervalos espectrais na faixa de radiação de ondas curtas (0 – 4 μ m) e adota 30 camadas atmosféricas na solução da equação de transferência radiativa.

Esse processo de linearização da radiação solar através da medida da cobertura efetiva de nuvens C_{eff} apresenta a grande vantagem de eliminar os efeitos da degradação natural que sempre ocorre nos radiômetros dos satélites que, de outra forma, poderiam levar à informações errôneas na análise e comparação de resultados de um ano para outro ou de um satélite para outro.

A irradiação solar difusa é determinada a partir da subtração da componente direta horizontal do total de irradiação solar incidente na superfície. A irradiação direta horizontal

(DNI) é estimada assumindo que a absorção da radiação solar pelas nuvens não é significativa e que a contribuição do espalhamento da radiação solar causado pelas nuvens pode ser adicionada à transmitância atmosférica em condições de céu claro. Dessa forma, a componente direta da irradiação solar é estimada com o uso da expressão abaixo:

$$DNI = \Phi_0 \cdot \tau_{atm-dir} \cdot \tau_{cloud-dir} \quad (1.3)$$

onde $\tau_{cloud-dir}$ representa a transmitância das nuvens e $\tau_{atm-dir}$ é a transmitância de céu claro para a componente direta da irradiação solar. A transmitância $\tau_{cloud-dir}$ é estimada a partir do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens utilizando a seguinte aproximação:

$$\tau_{cloud-dir} = \frac{(1 - \tau_c)}{(\beta - \tau_c)} \quad (1.4)$$

$$\text{Onde } \begin{cases} \tau_c = (CCI + 0,05) & \text{se } CCI < 0,95 \\ \tau_c = 1 & \text{se } CCI > 0,95 \end{cases}$$

A transmitância $\tau_{atm-dir}$ refere-se aos processos radiativos envolvendo aerossóis e gases atmosféricos em condição de céu claro. Essa transmitância é estimada por meio da resolução da equação de transferência radiativa utilizando a aproximação de “Dois-Fluxos”.

A espessura de cada camada atmosférica e os perfis atmosféricos de temperatura e da concentração dos gases atmosféricos (CO_2 , O_3 , etc.) são estabelecidos para a atmosfera-padrão selecionada em função da temperatura do ar na superfície (dado de entrada). Para a modelagem do vapor d’água, o modelo adota a parametrização de água precipitável descrita por Leckner. O modelo utiliza o perfil continental de aerossóis atmosféricos, descrito por

McClatchey para altitudes de 0 a 50 km, corrigido nos primeiros 5 km de altitude com base em valores climatológicos de visibilidade.

Com relação à modelagem das nuvens, o modelo BRASIL-SR assume que: (a) a microfísica de nuvens é representada pela distribuição de tamanhos de gotículas do tipo de nuvem presente; (b) as nuvens atenuam totalmente a radiação direta proveniente do Sol e (c) as nuvens são vertical e horizontalmente homogêneas. Para o mapeamento apresentado neste Atlas, foi adotado que toda a cobertura de nuvens é formada por um único tipo de nuvens – *Altostratus* – com a base das nuvens em 500 mb e uniformemente distribuída em 2 camadas atmosféricas. Estudos anteriores mostraram que as nuvens *Altostratus* são o tipo de nuvem espessa mais freqüente nas áreas continentais situadas no intervalo de latitudes em que o Brasil se localiza. O modelo utiliza a parametrização de Stephens (1978) para determinar o coeficiente de extinção total e o conteúdo total de água líquida na nuvem. A espessura ótica das nuvens em cada uma das camadas atmosféricas em que estão presentes é determinada assumindo que o conteúdo total de água presente na nuvem está isotropicamente distribuído.

1.1.2.2 Mapas Solarimétricos

Todos os mapas a seguir apresentam os valores médios das estimativas do total diário de irradiação solar fornecidas pelo modelo de transferência radiativa BRASIL-SR para o período de julho de 1995 a dezembro de 2005 - uma década completa de dados. Os mapas estão na resolução espacial de 10 km x 10 km.

Apesar das diferentes características climáticas observadas no Brasil, pode-se observar que a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade, com médias anuais relativamente altas em todo país. O valor máximo de irradiação global – $6,5\text{kWh/m}^2$ - ocorre no norte do estado da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí. Essa área apresenta

um clima semi-árido com baixa precipitação ao longo do ano (aproximadamente 300 mm/ano) e a média anual de cobertura de nuvens mais baixa do Brasil. A menor irradiação solar global – $4,25\text{kWh/m}^2$ – ocorre no litoral norte de Santa Catarina, caracterizado pela ocorrência de precipitação bem distribuída ao longo do ano. Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro ($4200\text{-}6700\text{ kWh/m}^2$) são bastante superiores aos da maioria dos países da União Européia, como Alemanha ($900\text{-}1250\text{ kWh/m}^2$), França ($900\text{-}1650\text{ kWh/m}^2$) e Espanha ($1200\text{-}1850\text{ kWh/m}^2$), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

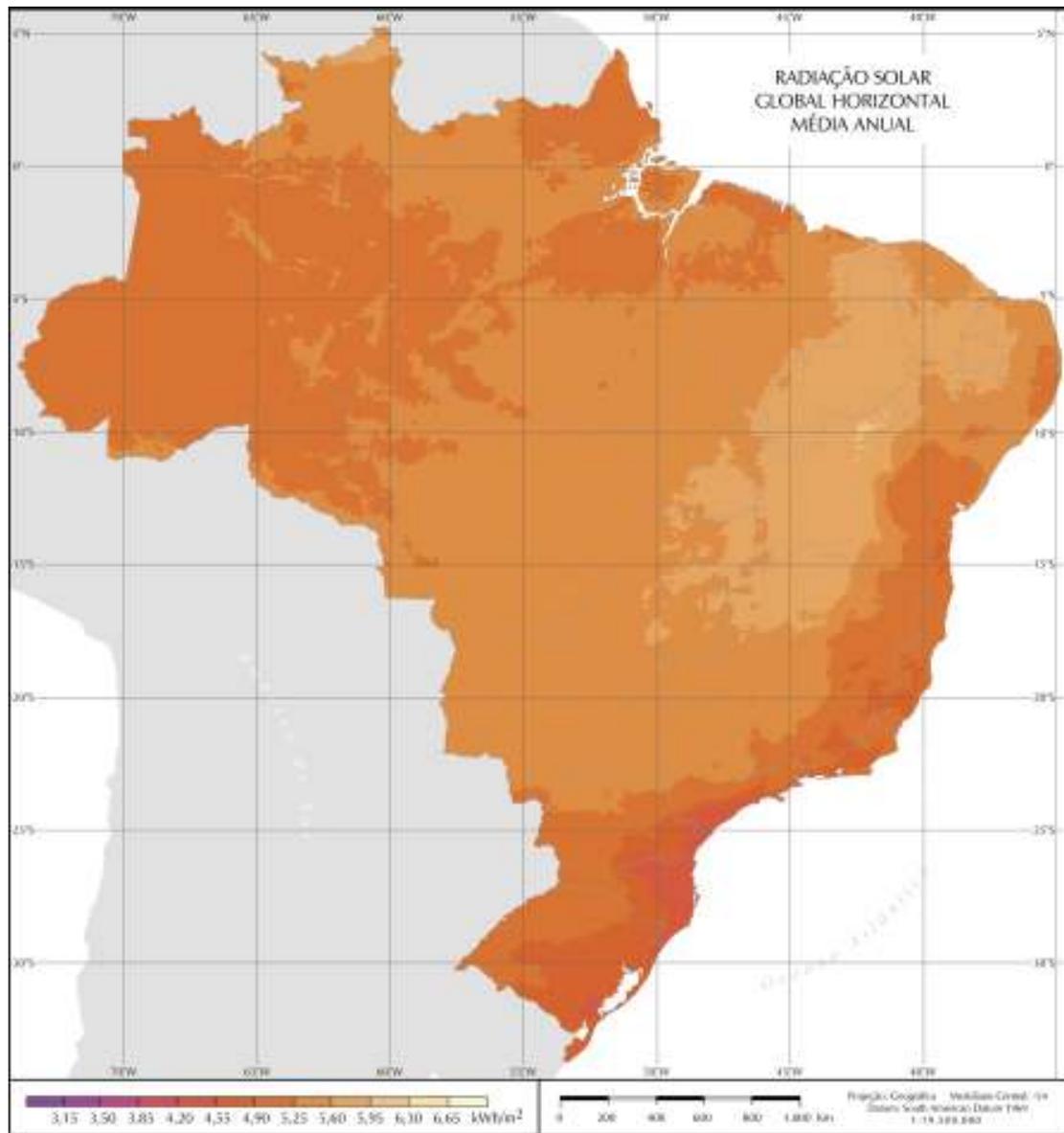


Figura 5 – Média anual da radiação solar global. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

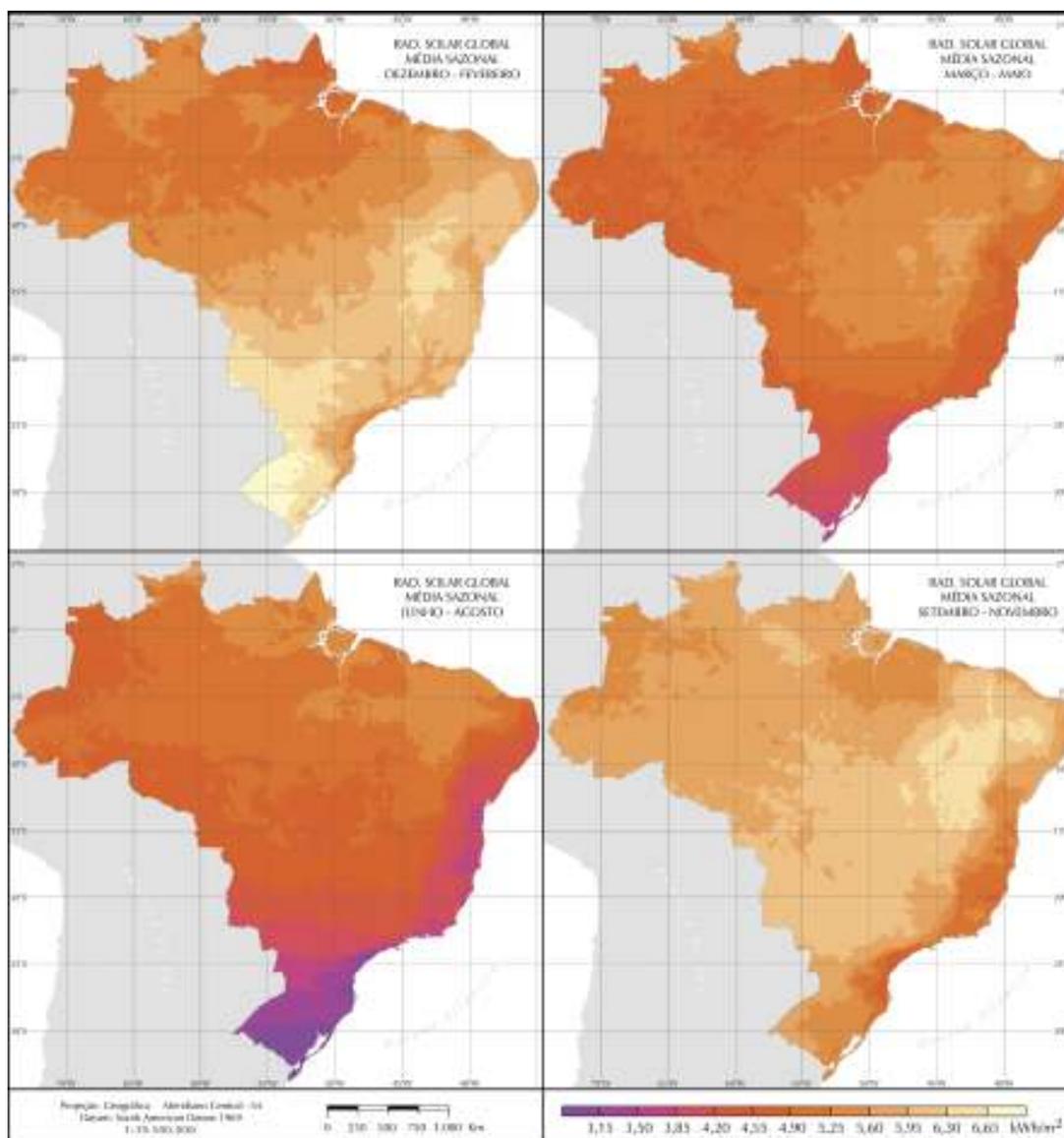


Figura 6 – Média trimestral da radiação solar global. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

A região Nordeste apresenta a maior disponibilidade energética, seguida pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste. As características climáticas da região Norte reduzem seu potencial solar médio a valores próximos da região Sul.

A incursão dos ventos Alísios também explica a menor irradiação solar no litoral e região costeira do Nordeste Brasileiro. Os valores máximos de irradiação solar são observados a oeste da região Nordeste, incluindo parcialmente o norte de Minas Gerais, o nordeste de Goiás e o sul de Tocantins. Durante todo o ano, a influência da Alta Tropical, que está associ-

ada ao Anticiclone Tropical do Atlântico Sul, confere um regime estável de baixa nebulosidade e alta incidência de irradiação solar para essa região semi-árida.

Para o estado do Ceará o Atlas Brasileiro de Energia solar estima uma média anual variando ordem de 5,6 a 6,3 KWh/m², com pouca resolução pois para toda a área do estado temos somente dois intervalos na escala de cores. O mesmo acontece na análise da Figura 6 que trata das médias trimestrais.

1.1.2.3 Cenários de Aplicações da Energia Solar

1.1.2.3.1 Aquecimento Solar

Estima-se que o aquecimento de água é responsável por 25% do total de energia elétrica consumida nas residências brasileiras o que representa um consumo da ordem de 20 bilhões de kWh. Tal demanda de energia elétrica ocorre principalmente no fim da tarde ocasionando um pico que poderia ser reduzido em grande parte com a exploração da energia solar, trazendo ainda vantagens econômicas e ambientais. O chuveiro elétrico, que é o equipamento mais empregado para esta tarefa, apresenta um custo reduzido para instalação (abaixo de US\$15) e pode consumir uma potência de até 6kWh.

Segundo informações da Sociedade Brasileira de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento (ABRAVA), existem aproximadamente 250.000 aquecedores solares instalados no Brasil, o que representa apenas 0,6% do total de residências brasileiras. O Brasil possui um número ainda pequeno de sistemas solares instalados para aquecimento de

água quando comparado com países como China, Israel, Turquia, Grécia, Alemanha, etc., e é, portanto, um grande mercado a ser explorado comercialmente.

O investimento inicial é a principal barreira para a adoção em larga escala de sistemas solares para aquecimento de água no Brasil. Um sistema compacto dimensionado para famílias de baixa renda apresenta um custo superior a US\$450, ou seja, cerca de 30 vezes superior ao custo de um chuveiro elétrico. No entanto, o custo pago pela empresa de distribuição de energia elétrica para atender a demanda de energia durante o pico causado pelo uso de chuveiros elétricos é consideravelmente maior, de forma que políticas de incentivo para adoção em larga escala de sistemas solares de aquecimento poderiam ser praticadas pelas empresas responsáveis pela distribuição de eletricidade. A Lei nº. 10.295 estabelece uma política nacional para a racionalização e conservação da energia que visa incentivar a adoção de aquecimento solar.

A Figura 7 mostra (a) a energia total necessária para aquecimento e (b) o tempo de retorno do investimento. O tempo de retorno do investimento é menor para as regiões com maior demanda de energia quando comparadas a regiões com maior disponibilidade de energia solar, o que indica que nessas regiões seriam obtidos melhores resultados com sistemas menores (menor custo).

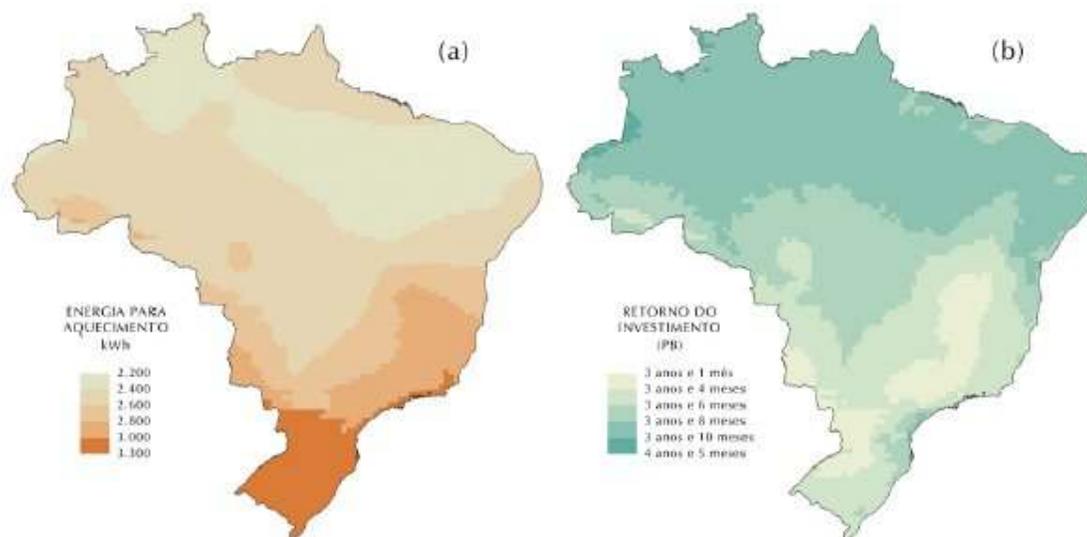


Figura 7 – (a) a energia total necessária para aquecimento e (b) o tempo de retorno do investimento. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

1.1.2.3.2 Sistemas Fotovoltaicos interligados à rede em áreas urbanas

A maior parte do impressionante crescimento do mercado de painéis fotovoltaicos está relacionado a instalações conectadas à rede nos países desenvolvidos. Existe um imenso potencial para essa aplicação em áreas urbanas ensolaradas por todo o mundo. O Brasil está particularmente bem situado para esse tipo de aplicação, por causa da considerável disponibilidade de recurso energético-solar, e o alto valor que pode ser dado a sistemas de painéis fotovoltaicos em áreas comerciais de centros urbanos (Rüther, 2004). Os mapas de irradiação solar em um plano inclinado no valor da latitude local apresentados no Atlas Brasileiro de Energia Solar demonstram tanto a possibilidade de utilização de painéis fotovoltaicos por todo o país quanto à pequena variação sazonal ao longo do ano. No levantamento da viabilidade econômica de projetos de painéis fotovoltaicos, informações mais detalhadas do comportamento sazonal da distribuição de radiação solar são necessárias, e a base de dados do projeto SWE-

RA disponibiliza o mapeamento desse recurso solar em resolução temporal mensal (<http://swera.unep.net/>).

Sistemas fotovoltaicos podem contribuir para a capacidade máxima de uma rede se o pico de demanda ocorre no período diurno. Regiões comerciais com altas cargas de ar-condicionado no horário do meio-dia, em geral possuem curvas de demanda em boa sincronia com a radiação solar (Perez et al., 2001 e Knob et al., 2004). Outro fator importante para essa análise é a comparação entre os valores de pico de carga no inverno e no verão. Quanto maior a demanda no verão em comparação com o período de inverno, maior a possibilidade de a carga coincidir com a disponibilidade do recurso solar. Esse é o comportamento típico na maioria das capitais do Brasil. Curvas de dados de consumo das áreas urbanas de todo o país mostram diferença entre as regiões onde prédios comerciais dominam, apresentando picos de demanda no período diurno, e regiões residenciais, onde os valores de pico de demanda ocorrem ao anoitecer. Para fazer melhor proveito da natureza distribuída da geração solar de eletricidade, é importante saber a capacidade de geração de energia através de painéis fotovoltaicos de diferentes regiões da cidade quando instalando uma nova estação fotovoltaica, de maneira a selecionar o consumidor com maior potencial de crédito.

Nesse contexto, o conceito de potencial efetivo de amenização de carga de painéis fotovoltaicos foi definido, para quantificar o potencial de crédito de uma instalação fotovoltaica localizada estrategicamente (Perez et al., 1996). A Figura 8 mostra, para uma curva de demanda típica em um centro urbano, o efeito de redução de pico ao adicionar um pequeno número de módulos fotovoltaicos (por exemplo, 2m² de painéis fotovoltaicos de filme fino de silício amorfo com 15% de eficiência) para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede. Para determinar o potencial benefício dos sistemas fotovoltaicos como mostrado na Figura 8, é necessário conhecimento da distribuição da radiação solar numa base horária, e essa informação pode ser acessada para todo o território brasileiro através da base de dados gerada

no projeto SWERA. Em um futuro próximo, quando o uso de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica se tornar mais difundido, com a redução dos custos e reconhecimento dos benefícios da geração de energia fotovoltaica distribuída, o levantamento do Potencial Efetivo de Amenização de Carga será de alto valor estratégico para fornecedores de energia e investidores.

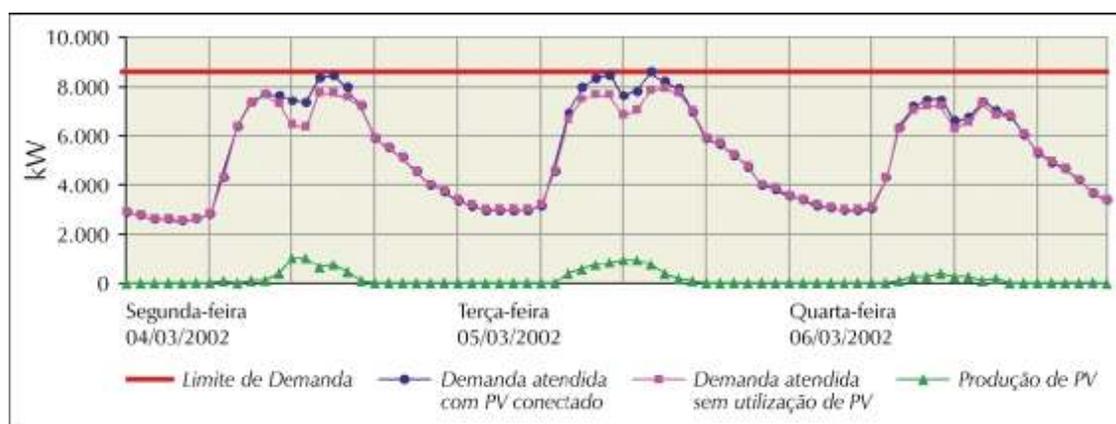


Figura 8 – Efeito de redução de pico ao adicionar-se um pequeno número de módulos PV para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede numa curva de demanda típica de um centro urbano. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

2 BASES TEÓRICAS

2.1 VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR NO TOPO DA ATMOSFERA

2.1.1 A órbita da Terra

A órbita da Terra ao redor do Sol e a rotação da Terra em torno do seu próprio eixo são os principais fatores que determinam a quantidade de energia solar que chega à Terra, e as mudanças do clima do sistema Terra-atmosfera. A rotação da Terra sobre seu eixo faz com que ela assuma a forma de um esferóide oblato com os raios polar e equatorial medindo 6356,79 e 6378,17km, respectivamente. A órbita da Terra é elíptica e o eixo de rotação é inclinado, em $23,5^\circ$, como mostra a Figura 9.

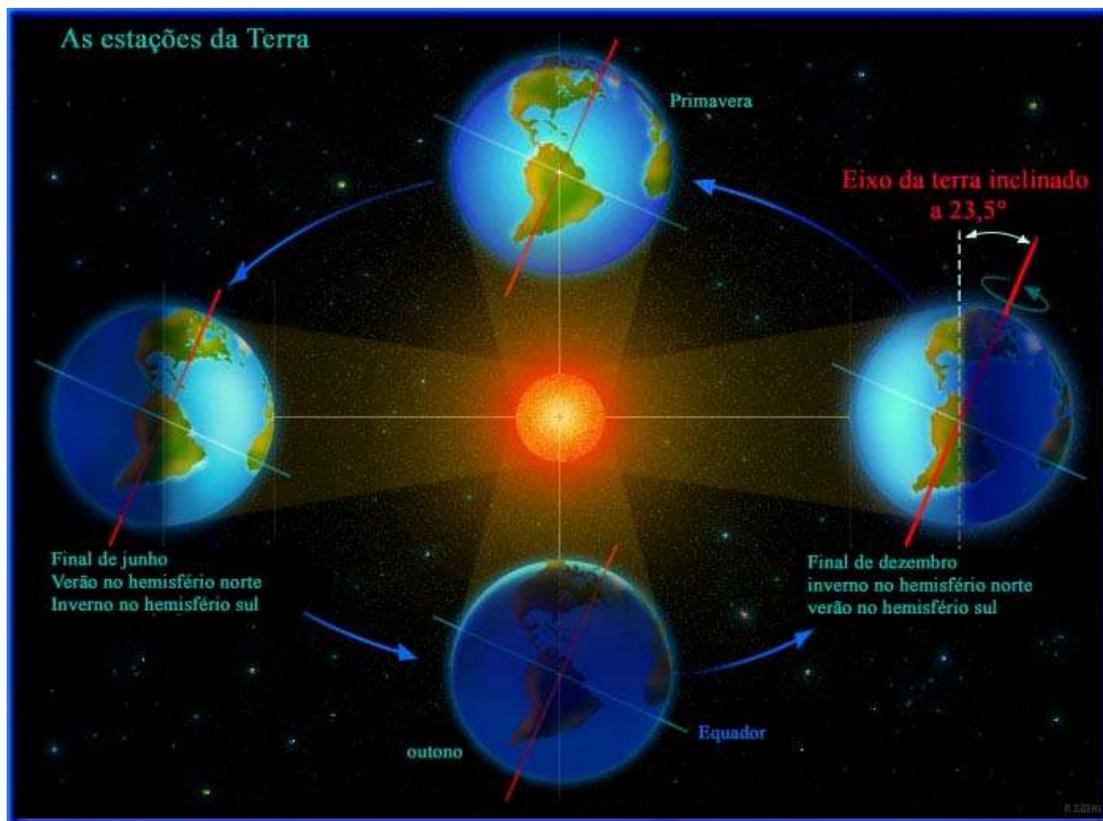


Figura 9 – Eixo de rotação da Terra e as estações do ano. Fonte: <http://www.seed.slb.com>

A órbita da Terra varia segundo três fatores: a excentricidade, a inclinação do eixo de rotação e a precessão. Os períodos de cada fator e suas variações são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Variações na órbita terrestre e seus períodos.:

Fenômeno	Período	Média	Variação
Excentricidade	100.000 anos	0,017	0,05
Inclinação do eixo	41.000 anos	23,5°	1,5°
Precessão	21.000 anos	-	-

Fonte: Liou

A característica mais destacável das variações climáticas, causadas pela inclinação do eixo de rotação, são as estações do ano. Durante o solstício de verão (no hemisfério norte), que acontece no dia 22 de junho, o Sol se posiciona diretamente acima da latitude 23,5°N ao

meio dia, chamada de trópico de Câncer. A elevação do sol acima do horizonte e a duração dos dias atingem os valores máximos no hemisfério norte durante o solstício de verão, e todas as latitudes acima do círculo Ártico ($66,5^{\circ}\text{N}$) tem o Sol acima do horizonte por vários dias ao longo do verão. No hemisfério Sul, a elevação do Sol é mínima nessa ocasião, os dias são mais curtos e para as latitudes abaixo do círculo Antártico ($66,5^{\circ}\text{S}$) o Sol não nasce. Este é o começo do verão no hemisfério Norte, sendo que no hemisfério Sul o verão começa no dia 22 de dezembro correspondendo ao solstício de inverno, do hemisfério Norte.

Durante os equinócios de primavera e outono os dias e as noites têm as mesmas durações (12 horas) e o Sol se posiciona diretamente acima do equador ao meio dia. O Sol cruza o equador de norte para sul no equinócio de outono e de sul para norte no equinócio de primavera. A distância entre os centros do Sol e da Terra varia entre os extremos de $147 \cdot 10^6 \text{ km}$ no solstício de inverno (dezembro) e $153 \cdot 10^6 \text{ km}$ no solstício de verão (junho). A distância média entre a Terra e o Sol é de $150 \cdot 10^6 \text{ km}$.

2.1.2 O espectro solar, a constante solar e distribuição da insolação no topo da atmosfera.

A distribuição da radiação eletromagnética emitida pelo Sol como função do comprimento de onda incidente no topo da atmosfera é chamado de espectro solar. A constante solar é a densidade superficial de potência solar no topo da atmosfera. A constante é definida como o fluxo de energia solar (energia por tempo) que cruza uma unidade de área normal a um raio solar na distância média entre o Sol e a Terra.

O espectro solar padrão em termos da irradiância espectral é mostrado na Figura 10. É mostrado, ainda, a irradiância que chega ao nível do mar e os níveis de absorção de vá-

rios gases atmosféricos. Note que o vapor d'água absorve a radiação solar em vários comprimentos de onda. A curva de irradiância de um corpo negro também é mostrada nesta figura.

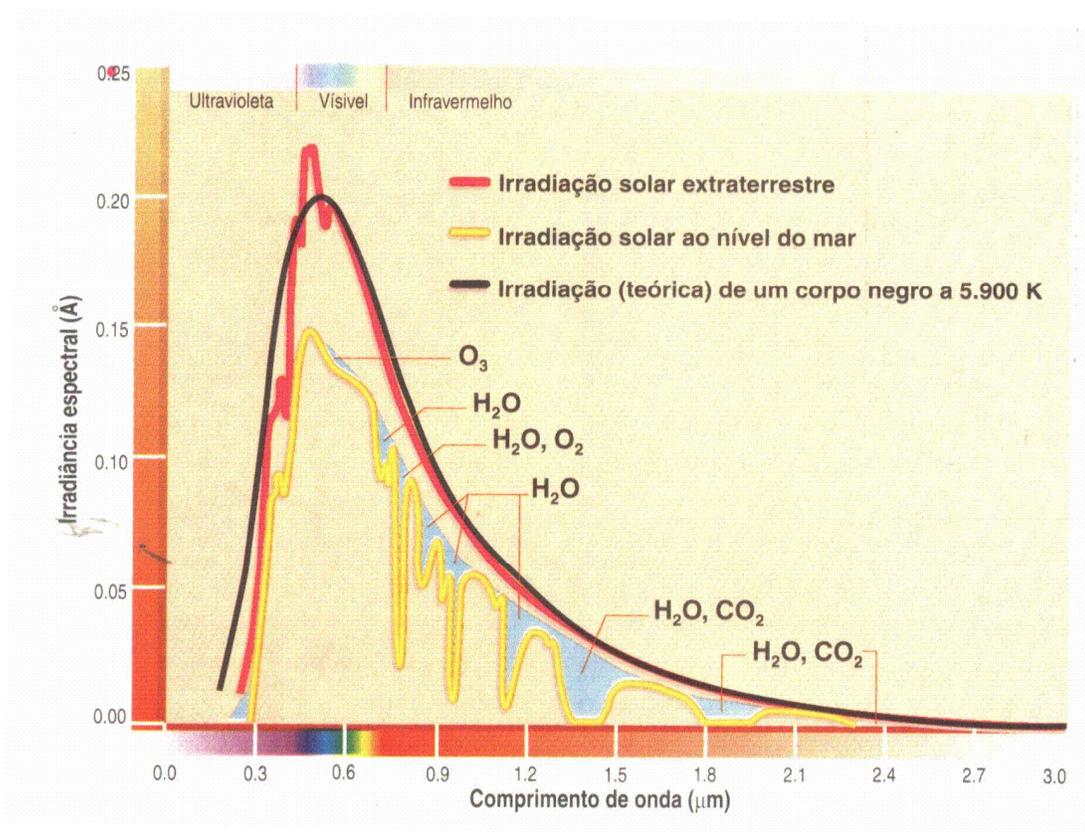


Figura 10 – Gráfico da radiação solar incidente no topo da atmosfera e na superfície, assim como as bandas de absorção dos principais gases atmosféricos. Fonte: Reportagem “A energia que vêm do Sol”.

Da energia eletromagnética que deixa o Sol, aproximadamente 50% ocorre em comprimentos de onda além da região do visível (infravermelho), cerca de 40% na região do visível e os 10% restantes na região do ultravioleta. Várias medidas foram feitas para se determinar o valor da constante solar e o primeiro valor encontrado foi de 1350 Wm^{-2} . Trabalhos subsequentes utilizando plataformas a altas altitudes (para diminuir os efeitos da atmosfera) encontraram valores variando entre 1396 e 1380 Wm^{-2} . Medidas da irradiância no topo da atmosfera foram feitas, também, a partir de satélites. O experimento ERB (sigla em inglês para balanço de radiação terrestre) lançou em 1975 dois satélites (Nimbus VI e VII, para tal

fim). Neste experimento a radiação solar foi observada por uma rede de 10 telescópios que mediam a irradiância solar total e as irradiâncias espectrais contidas em várias subdivisões (largas e finas) do espectro solar. Um dos objetivos do ERB foi observar continuamente a energia solar que chega ao sistema terra-atmosfera e investigar a variabilidade da constante solar. Os valores de 1391 e 1368 Wm^{-2} foram citados para a constante solar no período de 1975 a 1977 (Liou, 1980).

A insolação é definida como o fluxo de energia solar por unidade de área horizontal em um certo período de tempo. Ela depende fortemente do ângulo zenital e da variação da distância da Terra ao Sol. A densidade do fluxo no topo da atmosfera pode ser expressa como:

$$F = F_0 \cdot \cos \theta_0 \quad (2.1)$$

onde F_0 representa a densidade de fluxo solar no topo da atmosfera quando a distância instantânea entre a Terra e o Sol for d e θ_0 é o ângulo zenital.

Seja a constante solar $S = F_0(d / d_m)^2$, temos então:

$$F = S(d_m / d)^2 \cdot \cos \theta_0 \quad (2.2)$$

Definindo Q como a energia solar no topo da atmosfera por unidade de área, então a densidade de fluxo solar pode ser escrita como

$$F = \frac{dQ}{dt} \quad (2.3)$$

Então, a insolação para um dado período de tempo é

$$Q = \int_t F(t) dt \quad (2.4)$$

A energia total recebida em uma unidade de área em um dia pode ser calculada integrando a Equação (2.4) em relação ao número de horas do dia. Substituindo a Equação (2.2) na Equação (2.4), encontra-se que a insolação diária é:

$$Q = S \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \int_{\text{nascido do sol}}^{\text{pôr do sol}} \cos \theta_0(t) dt \quad (2.5)$$

2.2 TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

A radiação solar constitui a principal força motriz para processos térmicos (como o aquecimento da superfície e dos oceanos), dinâmicos (como a própria atmosfera) e químicos (como a fotossíntese das plantas). A energia proveniente do Sol chega até a superfície propagando-se como energia radiante ou simplesmente radiação. Como vimos, o fluxo de energia que o topo da atmosfera terrestre recebe do Sol por unidade de área é chamada de “constante solar” e vale aproximadamente 1367 W/m^2 . Sabe-se que este valor não é uma constante, pois existem vários fenômenos solares (manchas solares, erupções solares, etc.) que mudam a intensidade de energia emitida pelo Sol ao longo do tempo.

A principal característica de um campo de radiação é a radiância (ou intensidade de radiação). Essa grandeza se refere à quantidade de radiação solar num intervalo unitário de comprimento de onda e ângulo sólido que atravessa uma unidade de área tomada perpendicularmente à direção considerada, na unidade de tempo.

Conhecendo-se a radiância pode-se determinar outra grandeza muito importante no estudo da radiação atmosférica: a densidade de fluxo de radiação, que quando integrada para todo o espectro representa a quantidade de radiação solar que passa através de um plano na unidade de tempo e de área. Para melhor compreensão dos termos empregados chama-se irradiância, a densidade de fluxo de radiação sobre uma superfície, e emitância radiante, a densidade de fluxo de radiação emitida por uma superfície.

A irradiância solar que incide na superfície da Terra dependerá, além dos fenômenos referentes ao Sol, da interação da radiação eletromagnética com os constituintes do

sistema Terra-atmosfera. A transmissão da radiação solar através da atmosfera é um processo complexo e de difícil descrição devido ao grande número de propriedades físicas da atmosfera que a influenciam, como por exemplo, as concentrações de vapor d'água, concentração de gotículas, presença de cristais de gelo, etc., como citado anteriormente.

A razão entre a irradiância solar na superfície terrestre e no topo da atmosfera é definida como transmitância atmosférica. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar é atenuada por processos de espalhamento e absorção causados pelas partículas em suspensão (denominados aerossóis), nuvens e moléculas de gases atmosféricos. Os coeficientes de absorção e de espalhamento dependem do comprimento de onda da radiação e das espécies de gases e partículas presentes na atmosfera. A Figura 11 apresenta um diagrama com os principais processos de interação da radiação solar e térmica com a atmosfera.

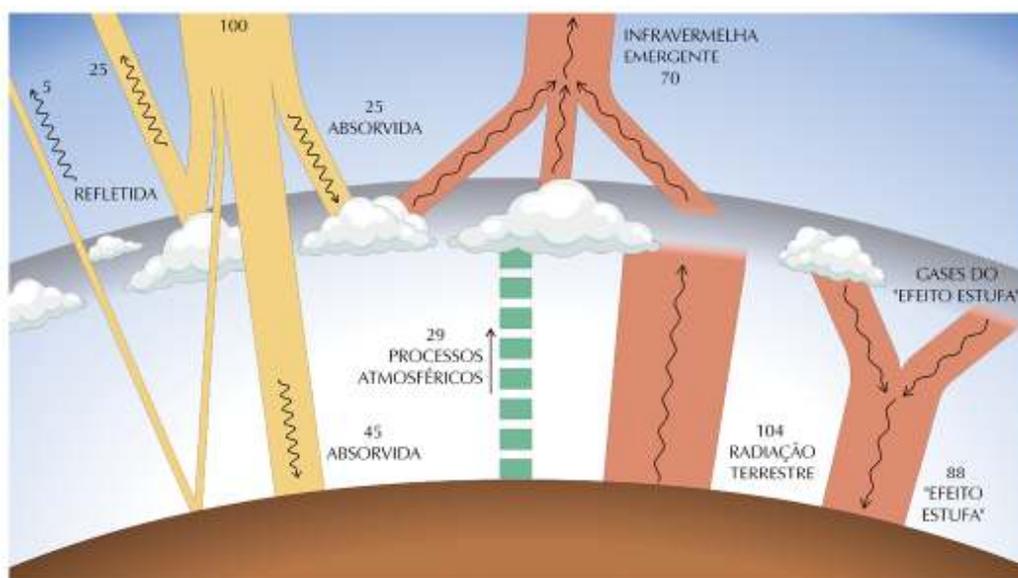


Figura 11 – Diagrama simbólico dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar.

As nuvens, a superfície do planeta, os gases e partículas atmosféricas refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e causando a evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A absorção da radiação solar é seletiva, sendo o vapor d'água, o ozônio

nio (O_3) e o dióxido de carbono (CO_2) os principais absorvedores. A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho do espectro da radiação eletromagnética sendo que 6% são provenientes da superfície e 64% tem origem em nuvens e constituintes atmosféricos.

2.3 CARACTERÍSTICAS DA MICROFÍSICA DE NUVENS

Os raios solares interagem com a atmosfera terrestre. Estas interações (espalhamento e absorção) são mais frequentes na presença de nuvens. Por este motivo, para que seja modelada a interação da radiação solar com a atmosfera, se faz necessário conhecer a estrutura das nuvens estabelecendo a função de distribuição das gotículas, tanto em termos de diâmetro como também em termos da distribuição espacial, pois estes fatores regulam diretamente as características das nuvens e conseqüentemente a quantidade de energia solar que chega à superfície.

Para simplificação, somente as nuvens “quentes” (sem a fase de gelo) foram consideradas.

2.3.1 Distribuição dos tamanhos das partículas

Segundo Kokhanevsky, 2004, as nuvens quentes consistem em pequenas gotículas que geralmente têm a forma esférica, entretanto, partículas com outros formatos podem tam-

bém existir devido à outras influencias, como por exemplo, a deformação das mesmas devido as forças gravitacionais.

O raio médio das partículas não precipitantes em nuvens quentes é da ordem de $10\mu m$ e a aproximação da gotícula esférica é bastante aceitável. Nuvens naturais com gotículas de tamanhos uniformes nunca ocorrem devido à variabilidade das propriedades físicas do ar tanto no tempo quanto no espaço (Twomey, 1977). Então, pode-se considerar o raio de uma gotícula, a , como um valor aleatório, que é caracterizado por uma distribuição $f(a)$. Esta distribuição é normalizada pela seguinte condição:

$$\int_0^{\infty} f(a) da = 1 \quad (2.6)$$

A integral

$$F(a) = \int_{a_1}^{a_2} f(a) da \quad (2.1)$$

nos dá a fração de partículas com raios entre a_1 e a_2 dentro de um volume incremental da nuvem. A distribuição $f(a)$ pode ser representada como um histograma, graficamente ou na forma tabular (Ayvazian, 1991). Entretanto, é mais comum usar uma forma, envolvendo dois ou três parâmetros (Deirmendjian, 1969). É claro, que esta metodologia representa uma grande simplificação da situação que ocorre em nuvens naturais, mas a maioria das características ópticas de uma nuvem praticamente não depende da estrutura fina da distribuição de partículas (Hansen e Travis, 1974). McGraw et al. (1998) descobriram que as propriedades ópticas locais de polidispersos podem ser modeladas com grande precisão usando-se apenas seis momentos da distribuição de partículas, e o uso de certas combinações dos momentos pode reduzir ainda mais o numero de parâmetros.

Na maioria dos casos, a $f(a)$ pode ser representada como uma distribuição “gamma” (Deirmendjian, 1969):

$$f(a) = N \cdot a^\mu \cdot e^{-\frac{\mu a}{a_0}} \quad (2.2)$$

Onde

$$N = \frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1) \cdot a_0^{\mu+1}} \quad (2.3)$$

é a constante de normalização e $\Gamma(\mu+1)$ é a função gama. Temos que a primeira derivada $f'(a_0) = 0$ e a segunda derivada $f''(a_0) < 0$ (veja a Equação (2.2)). Então a $f(a)$ tem um máximo em $a = a_0$. Note que a Equação (2.3) segue da Equação (2.13) e da definição da função gama:

$$\Gamma(\mu) = \int_0^\infty x^{\mu-1} \cdot e^{-x} dx \quad (2.4)$$

O parâmetro μ caracteriza a largura da distribuição das partículas $f(a)$, sendo menor para distribuições mais largas. Momentos da distribuição

$$\langle a^n \rangle = \int_0^\infty a^n \cdot f(a) da \quad (2.5)$$

são calculados para a simples equação analítica seguinte:

$$\langle a^n \rangle = \left(\frac{a_0}{\mu} \right)^n \frac{\Gamma(\mu+n+1)}{\Gamma(\mu+1)} \quad (2.6)$$

A Equação (2.6) pode ser usada para encontrar o volume médio da partícula

$$\langle V \rangle = \frac{4\pi}{3} \langle a^3 \rangle, \quad (2.7)$$

a área superficial média

$$\langle \Sigma \rangle = 4\pi \langle a^2 \rangle, \quad (2.8)$$

e a massa média das gotículas

$$\langle W \rangle = \rho \langle V \rangle \quad (2.9)$$

onde $\rho = 1g/cm^3$ é a densidade da água. Temos então que

$$\langle V \rangle = \frac{\Gamma(\mu+4)}{\mu^3 \cdot \Gamma(\mu+1)} v_0 \quad (2.10)$$

$$\langle \Sigma \rangle = \frac{\Gamma(\mu+3)}{\mu^2 \cdot \Gamma(\mu+1)} s_0 \quad (2.11)$$

$$\langle W \rangle = \frac{\Gamma(\mu+4)}{\mu^3 \cdot \Gamma(\mu+1)} w_0 \quad (2.12)$$

onde

$$v_0 = \frac{4\pi a_0^3}{3}, \quad s_0 = 4\pi a_0^2, \quad w_0 = \rho v_0 \quad (2.13)$$

são os parâmetros correspondentes para partículas monodispersas com raio a_0 . Embora os parâmetros expressos na Equação (2.13) sejam pequenos, um numero muito grande de gotículas dentro da nuvem (tipicamente da ordem de 100 partículas por cm^3) criam uma importante contribuição para processos atmosféricos.

A Equação (2.2) permite caracterizar a distribuição das gotículas somente utilizando dois parâmetros: a_0 e μ . Entretanto, é importante lembrar que nenhum dos dois fatores é constante e podem variar dentro do corpo da nuvem. Dessa forma, seus valores dependem da escala em que é feita a média, com grandes valores desta escala produzindo pequenos valores de μ . Os parâmetros a_0 e μ são definidos em termos de uma específica distribuição unimodal de gotículas (Equação (2.2)). Esta é uma vantagem que caracteriza a distribuição dos tamanhos das partículas por seus momentos. Os momentos podem ser resgatados das medidas ópticas sem nenhuma referência específica à leis de distribuição.

Hansen e Travis (1974) encontraram o raio efetivo

$$a_{ef} = \frac{\langle a^3 \rangle}{\langle a^2 \rangle} \quad (2.14)$$

é um dos mais importantes parâmetros de qualquer distribuição de tamanho de partículas. Ele é proporcional ao volume médio dividido pela área superficial da gotícula. Este parâmetro

pode também ser usado para partículas não esféricas como um cristal de gelo, por exemplo.

A variância de uma distribuição de tamanhos das partículas

$$\Delta = \frac{s}{\langle a \rangle} \quad (2.15)$$

onde

$$s = \sqrt{\int_0^{\infty} (a - \langle a \rangle)^2 \cdot f(a) da}, \quad (2.16)$$

é também um parâmetro importante, especialmente em uma distribuição estreita. Os valores de s são comumente chamados de desvio padrão. A variância, que é igual à razão do desvio padrão do raio médio $\langle a \rangle$, é comumente expresso em porcentagem.

Temos que, para uma distribuição de tamanho de partículas (Equação (2.2)):

$$a_{ef} = a_0 \left(1 + \frac{3}{\mu} \right), \quad \Delta = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \mu}} \right) \quad (2.17)$$

e, portanto:

$$\mu = \frac{1}{\Delta^2} - 1, \quad a_0 = \frac{1 - \Delta^2}{1 + 2 \cdot \Delta^2} a_{ef} \quad (2.18)$$

A Equação (2.18) dá significado ao parâmetro μ da distribuição de tamanho de partícula (Equação (2.2)). Devemos destacar que nuvens com partículas muito pequenas não são estáveis devido aos processos de coagulação e condensação (Twomey, 1977). Partículas com raios grandes não podem residir na atmosfera por muito tempo devido às forças gravitacionais.

A Equação (2.18) e os resultados para a_0 e μ (Kokhanovshy, 2004) nos levam a raios efetivos, a_{ef} , de gotículas existindo dentro dos limites de 5 a 50 μm , dependendo do tipo de nuvem. Uma análise quase global dos valores de a_{ef} , usando imagens de satélite, mostrou que tipicamente $5 \mu m \leq a_{ef} \leq 15 \mu m$. Note que nuvens com $a_{ef} > 15 \mu m$ são precipitantes. Pinsky e

Khain (2002) mostraram que o limiar da ocorrência de “chuvisco” ou “garoa” é próximo a $a_{ef} = 15 \mu m$. A partir deste valor, as colisões fortes começam a atuar, originando a chuva.

2.3.2 A concentração das gotículas

A concentração das partículas, N , juntamente com o tamanho e o formato das partículas, é de extrema importância para a quantificação da interação da radiação solar e térmica com nuvens. A concentração de gotículas depende da concentração C_N dos núcleos de condensação atmosféricos. O valor de C_N é menor acima do oceano do que acima dos continentes; então, a concentração de gotículas em nuvens marítimas é em média menor do que em nuvens continentais. Geralmente, a menor concentração de gotículas acima dos oceanos significa que as gotículas podem crescer mais, produzindo gotas maiores acima dos oceanos, cuja confirmação foi feita pelas análises de imagens de satélite por Han et al., 1994. Este fato influencia a ocorrência e as taxas de precipitação.

A concentração volumétrica (adimensional) de gotículas $C_v = N \langle V \rangle$ e o conteúdo de água líquida $C_w = \rho \cdot C_v$ (ou $C_w = N \langle W \rangle$ - veja a Equação (2.9)) são também comumente usados nos estudos das nuvens.

O conteúdo de água líquida não é constante dentro da nuvem e apresenta os maiores valores próximo ao topo da nuvem. O “caminho” de água líquida, w , é definido como

$$w = \int_{z_1}^{z_2} C_w(z) dz \quad (2.19)$$

onde $l = z_2 - z_1$ é a espessura geométrica da nuvem. Se $C_w = const$,

$$w = C_w \cdot l \quad (2.20)$$

A espessura geométrica das nuvens varia, dependendo do tipo de nuvem (Landolt-Bernstein, 1988). Ela, freqüentemente, está dentro da faixa de 500 à 1000m para nuvens do tipo *stratocumulus*, por exemplo. Dados globais obtidos por medidas de satélite (Han et al., 1994) mostram que o caminho de água líquida é da ordem de 50-150g/m².

Um sistema de nuvens pode, facilmente, cobrir uma área de $S \approx 10^3 \text{ km}^2$ (Konratyev e Binenko, 1984). A quantidade total de água $W = wS$, guardada em uma nuvem idealizada que possui o mesmo caminho de água líquida para toda a área de cobertura, é da ordem de 10^8 kg , se assumirmos $w = 100 \text{ g/m}^2$. Estes valores mostram a importância das nuvens para todos os problemas atmosféricos e para a atividade humana (plantações de grãos, etc).

3 O MODELO RAMS

Conforme mencionado anteriormente, o modelo usado nas simulações foi o CSU RAMS versão 6.0 (cuja tradução é Sistema de Modelagem Atmosférica Regional). Este modelo regional é bastante difundido na comunidade científica (<http://atmet.com>) e é capaz de reproduzir os mais relevantes processos atmosféricos. O modelo, baseado na linguagem Fortran, conta com uma série de parametrizações físicas para calcular as mais diversas variáveis meteorológicas, incluindo a radiação solar, que é a fonte de energia para todo o sistema atmosférico. O RAMS necessita, para ser iniciado, de condições de fronteira descrevendo as condições atmosféricas da região que se quer simular. Por exemplo, podem-se utilizar dados de um modelo global. Neste trabalho foram usados os dados de re-análise NCEP/NCAR (siglas em inglês para Centro Nacional de Previsão Ambiental e Centro Nacional de Pesquisas Atmosféricas, respectivamente, ambos americanos), porém a utilização de outra fonte de dados de grande escala pode ser facilmente realizada. De forma bem simplificada, as principais características do modelo RAMS são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características básicas do modelo RAMS.

Características	Descrição
Equações Básicas	3-D, não-hidrostática, compressível, separação do tempo;
Coordenadas	Horizontal: transformação polar-estereográfica; Vertical: sigma-z, seguindo o terreno;
Aninhamento de grade	Duas vias reversível, grade aninhada com conservação de massa, especificação do usuário;
Diferenciação no tempo	Híbrida (Leapfrog para velocidade, avançada para escalares);
Turbulência	Coefficientes de troca turbulenta para energia cinética turbulenta prognostica (Mellor-Yamada);
Advecção	Leapfrog de segunda ordem para velocidade, avançada de segunda ordem para escalares;
Convecção	Convecção profunda do tipo Kuo;
Microfísica	Nuvem, chuva e 5 espécies de gelo (Walko et al. 1995);

Radiação	Três parametrizações de onda longa e onda curta;
Tratamento da superfície	Temperatura do solo prognostica e modelo de mistura do solo, Vegetação prognostica e parametrização de neve, esquema de manchas de solo e vegetação (LEAF-2, Wal-ko et al. 2000);
Assimilação de dados	Assimilação de dados quadri-dimensional.

Fonte: Tremback, 2001

3.1 PARAMETRIZAÇÕES FÍSICAS

A seguir teremos uma descrição de duas das parametrizações de radiação usadas no modelo RAMS. As três parametrizações possíveis são:

1. Mahrer & Pielke (1977);
2. Chen & Cotton (1983) e
3. Harrington (1997)

A parametrização de Mahrer/Pielke (1977) não encontra-se descrita no presente trabalho, pois não leva em conta o efeito das nuvens, sendo por este motivo descartado também dos testes de sensibilidade do modelo.

A parametrização de Chen & Cotton (1983) é um esquema baseado em emissividade e o efeito das nuvens sobre a radiação é considerado tanto para ondas longas quanto para ondas curtas. A parametrização de Harrington (1999) – mais complexa – foi desenvolvida de modo que o cálculo da radiação leve em conta a quantidade de água líquida na nuvem, a fase de gelo, partículas atmosféricas, etc. Uma descrição mais detalhada destas parametrizações é feita nas seções sub-seguintes.

3.1.1 Chen & Cotton, 1983

Esta parametrização se refere à modelagem de nuvens do tipo *stratocumulus* numa condição mista entre céu claro e encoberto por este tipo de nuvens. Por este motivo, somente este tipo de nuvem é considerada ao longo desta seção.

O modelo de radiação de ondas curtas inclui o espalhamento molecular atmosférico, absorção de ozônio desenvolvida por Lacis e Hansen (1974), e a parametrização de refletância, transmitância e absorptância de camadas de nuvens desenvolvida por Stephens (1978). A estrutura do modelo de radiação de ondas curtas segue o desenvolvido por Stephens e Webster (1979), que usa o modelo de “dois-fluxos” (fluxos ascendentes e descendentes). A “transmitância equivalente” de Stephens (1977) é empregada para derivar a refletância, transmitância e absorptância de uma atmosfera “mista de céu claro e encoberta por nuvens”.

De acordo com Chen & Cotton, 1983, uma vez que a parametrização de ondas curtas de Stephens para de uma camada de nuvens pode ser “ajustada” para os resultados de um modelo teórico detalhado, os valores quantitativos são mais confiáveis. O exato perfil das variáveis radiativas - refletância, transmitância e absorptância de uma camada de nuvens – é muito importante para a evolução diurna de nuvens tipo *stratocumulus*. Isto ocorre, pois a “distância de penetração” da radiação de ondas curtas é determinada pelas variáveis radiativas acima citadas. A simulação de nuvens *stratus* do ártico durante o verão (Herman e Goody, 1976) mostram que a penetração da radiação de ondas curtas é a fonte de aquecimento que conduz à formação de duas camadas de nuvens distintas, entretanto, para um elevado conteúdo de água líquida, esta penetração é superficial (Chen & Cotton, 1983).

3.1.1.1 Equação da transferência radiativa

Uma vez que a refletância, a absorptância e a transmitância são conhecidas para uma dada camada, o modelo de transferência radiativa de “dois-fluxos” (fluxo ascendente e fluxo descendente) pode ser construído.

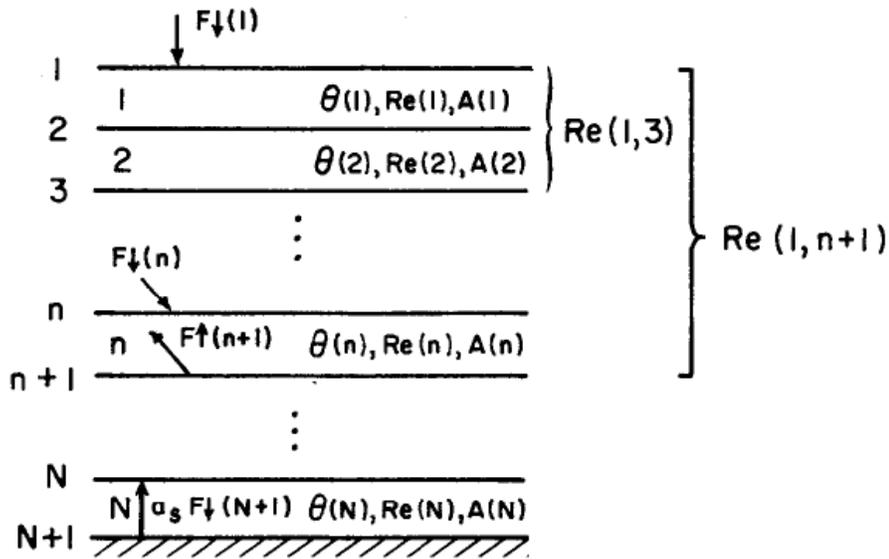


Figura 12 – O modelo de transferência radiativa, F_{\downarrow} e F_{\uparrow} denotam os fluxos descendentes e ascendentes. $Re(n)$ e $A(n)$ representam respectivamente a refletância e a absorvância na n -ésima camada. $Re(1, n+1)$ é a múltipla refletância para todas as camadas acima da camada $(n+1)$.

A Figura 12 (de Stephens e Webster (1979)) representa uma ilustração simples do modelo de transferência radiativa usado, onde os fluxos descendentes e ascendentes são denotados por F_{\downarrow} e F_{\uparrow} respectivamente e podem ser escritos como

$$F_{\downarrow}(n+1) = Re(1, n+1) \cdot F_{\uparrow}(n+1) + V_{\downarrow}(n+1/2) \quad (3.1)$$

$$F_{\uparrow}(n) = \frac{Tr_{\uparrow}(n) \cdot F_{\uparrow}(n+1)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} + V_{\uparrow}(n+1/2) \quad (3.2)$$

o número de camadas é denotado por n ; $Re(n)$, $A(n)$ e $Tr(n)$ representam, respectivamente, a refletância, a absorvância e a transmitância. $Re(1, n+1)$ representa as múltiplas refletâncias para todas as camadas acima da camada $n+1$, definida como

$$Re(1, n+1) = Re(n) + \frac{Tr_{\downarrow}(n) \cdot Tr_{\uparrow}(n) \cdot Re(1, n)}{1 - Re(1, n) \cdot Re(n)} \quad (3.3)$$

O segundo termo do segundo membro da Equação (3.3) representa o efeito interno dobrado entre as camadas (Stephens, 1977).

$V_{\downarrow}(n+1/2)$ representa o fluxo transmitido da camada acima, calculado como

$$V_{\downarrow}(n+1/2) = \frac{Tr_{\downarrow}(n) \cdot V_{\downarrow}(n-1/2)}{1 - Re(1,n) \cdot Re(n)} \quad (3.4)$$

$V_{\uparrow}(n+1/2)$ representa o fluxo transmitido da camada abaixo, calculado como

$$V_{\uparrow}(n+1/2) = \frac{Re(n) \cdot V_{\downarrow}(n-1/2)}{1 - Re(1,n) \cdot Re(n)} \quad (3.5)$$

As condições de fronteira para este modelo de transferência radiativa são:

$$\begin{aligned} Re(1,1) &= 0 \\ V_{\downarrow}\left(\frac{1}{2}\right) &= F_{\downarrow}(1) \\ F_{\uparrow}(n+1) &= a_s \cdot F_{\downarrow}(n+1) \end{aligned}$$

onde a_s é o albedo da superfície.

3.1.1.2 Parametrização da refletância, transmitância e absorptância numa atmosfera sem nuvens.

3.1.1.2.1 Parametrização da Absortância.

Similar ao modelo de Oliver e Lewellen, et al (1978), a parametrização de Lacis e Hansen (1974) e Herman e Goody (1976), adota-se a parametrização de Yamamoto (1962) para a absorptância de uma atmosfera sem nuvens. Assim, a absorptância é definida por

$$A_r(m_z) = 2,9 \cdot m_z / [(1 + 141,5 \cdot M \cdot m_z)^{0,635} + 5,925 \cdot M \cdot m_z] \quad (3.6)$$

Onde m_z é o caminho óptico do vapor de água acima da camada z e pode ser escrito como

$$m_z = \int_z^{\infty} \rho_v dz = \int_z^{\infty} \rho_0 \cdot r_v dz$$

Onde ρ_v , ρ_0 são as densidades do vapor de água e do ar respectivamente e r_v é razão de mistura do vapor de água. O fator M (Rodgers, 1967) considera a inclinação do caminho óptico e a refração. M é definido por

$$M = 35 / (1224 \cdot \mu_0^2 + 1)^{1/2}$$

Onde $\mu_0 = \cos \phi$, ϕ é o ângulo zenital.

Existe uma limitação, entretanto, ao usar a Equação (3.6). Quando a atmosfera contém uma camada de nuvem, é muito difícil calcular a real absorptância para uma atmosfera mista com e sem nuvens.

3.1.1.2.2 Espalhamento Molecular da Atmosfera

A maioria do espalhamento molecular Rayleigh ocorre em níveis mais baixos da atmosfera. Quando integrado para toda a atmosfera, o espalhamento Rayleigh fornece o total de 7% da refletância dentro da troposfera que corresponde à média climatológica da refletância. Stephens parametriza a refletância para cada camada devido ao espalhamento Rayleigh como

$$Re_{clear}(P) = (0,219 \times 0,517) \cdot P / [(1 + 0,816 \cdot \mu_0) \times 3039 \times 10^3] \quad (3.7)$$

Onde P é a pressão.

3.1.1.2.3 Absorção do Ozônio

A parametrização da absorptância devido à absorção do ozônio em uma camada intermediária acima do topo do modelo segue Lacis e Hansen (1974), e é dada por

$$A_{oz}(X_l) = A_{oz}^{uv}(X_l) + A_{oz}^{vis}(X_l) \quad (3.8)$$

Onde A_{oz} representa a total absorptância. O comprimento do caminho óptico acima da l -ésima camada é denotado por X_l . Os sobrescritos uv e vis representam as faixas espectrais do ultravioleta e visível respectivamente. A_{oz}^{uv} e A_{oz}^{vis} podem ser definidos por

$$A_{oz}^{uv}(X_l) = \frac{1,082 \cdot X_l}{(1 + 138,6 \cdot X_l)^{0,805}} + \frac{0,0658 \cdot X_l}{1 + (103,6 \cdot X_l)^3} \quad (3.9)$$

$$A_{oz}^{vis}(X_l) = \frac{0,02118 \cdot X_l}{1 + 0,042 \cdot X_l + 0,000323 \cdot X_l^2} \quad (3.10)$$

3.1.1.3 Parametrização da refletância, transmitância e absorptância numa atmosfera com nuvens.

Com o intuito de representar os efeitos dos principais absorvedores da radiação de ondas curtas (por exemplo, vapor d'água, ozônio e dióxido de carbono), Stephens (1978) parametrizou a refletância, transmitância e absorptância para uma camada considerando duas bandas com comprimento de onda λ é menor ou maior do que $0,75\mu m$. O vapor de água absorve na região próxima ao infravermelho onde $0,7\mu m \leq \lambda \leq 2,1\mu m$, o ozônio absorve na região do ultravioleta e do visível onde $\lambda \leq 0,35\mu m$ e $0,5\mu m \leq \lambda \leq 0,7\mu m$. O dióxido de carbono absorve numa região do espectro que sobrepõe à absorção do vapor de água onde $2,1\mu m \leq \lambda \leq 2,9\mu m$. Então, o comprimento de onda de $0,75\mu m$ é limiar apropriado. A absorção do ozônio é dominante para $\lambda < 0,75\mu m$ enquanto a absorção do vapor de água e o dióxido de carbono é dominante para $\lambda > 0,75\mu m$. Esta abordagem permite particionar a va-

riação da refletância, transmitância e absorvância desde que 51,7% dos comprimentos de onda seja menor que $0,75\lambda m$ e que 48,3% seja maior que $\lambda > 0,75\mu m$.

Segundo Stephens (1978), a parametrização de refletância, transmitância e absorvância para uma camada contendo nuvens são as seguintes:

(1) Na região do ultravioleta e do visível ($\lambda < 0,75\mu m$), a refletância (Re_1), a transmitância (Tr_1) e a absorvância (A_1) são parametrizadas como:

$$Re_1 = \frac{\beta_1(\mu_0) \cdot \tau_N / \mu_0}{1 + \beta_1(\mu_0) \cdot \tau_N / \mu_0} \quad (3.11)$$

$$Tr_1 = 1 - Re_1(\mu_0) \quad (3.12)$$

$$A_1(\mu_0) = 0 \quad (3.13)$$

(2) Na região do infravermelho próximo ($\lambda > 0,75\mu m$), a refletância (Re_2), a transmitância (Tr_2) e a absorvância (A_2) são calculadas como:

$$Re_2(\mu_0) = (u^2 - 1)[\exp(\tau_{eff}) - \exp(-\tau_{eff})] / R \quad (3.14)$$

$$Tr_2(\mu_0) = 4u / R \quad (3.15)$$

$$A_2(\mu_0) = 1 - Re_2(\mu_0) - Tr_2(\mu_0) \quad (3.16)$$

onde

$$u^2 = [1 - \omega_o + 2 \cdot \beta_2 \cdot \omega_o] / (1 - \omega_o) \quad (3.17)$$

$$\tau_{eff} = \{(1 - \omega_o) \cdot [1 - \omega_o + 2 \cdot \beta_2 \cdot \omega_o]\}^{\frac{1}{2}} \cdot \tau_N / \mu_0 \quad (3.18)$$

$$R = (u + 1)^2 \cdot \exp(\tau_{eff}) - (u - 1)^2 \cdot \exp(-\tau_{eff}); \quad (3.19)$$

τ_N é a espessura óptica da camada de nuvem para a qual:

$$\log_{10}(\tau_{N_1}) = 0,2633 + 1,7095 \cdot \log_e[\log_{10}(W)] \quad (3.20)$$

quando $\lambda < 0,75\mu m$. Também temos

$$\log_{10}(\tau_{N_2}) = 0,3492 + 1,6518 \cdot \log_e[\log_{10}(W)] \quad (3.21)$$

quando $\lambda > 0,75\mu m$, onde W é o caminho de água líquida ($g \cdot m^{-2}$) definido por

$$W = \int_0^{\Delta z} \rho_0 \cdot r_1 \cdot dz \quad (3.22)$$

onde Δz é a espessura da camada de nuvem. ω_0 é o albedo de espalhamento simples, β_1 e β_2 são as frações de retro-espalhamento da radiação incidente para o ângulo zenital ϕ .

Os coeficientes ω_0 , β_1 e β_2 são funções de τ_N e μ_0 . Stephens (1978) desenvolveu uma equação de regressão para ω_0 , β_1 e β_2 a partir de observações. Chen & Cotton (1983) adotaram um método de interpolação simples para calcular estes coeficientes.

3.1.1.4 Parametrização de refletância, transmitância e absorptância numa atmosfera mista com céu claro e cobertura de nuvens.

Quando uma coluna de ar contém uma camada de nuvem, a parametrização de Yamamoto (1962) para a absorptância numa atmosfera sem nuvens [Equação (3.6)] não funciona corretamente. Um novo esquema foi desenvolvido por Chen & Cotton, como segue:

A transmitância de uma atmosfera sem nuvens pode ser definida por um somatório de funções exponenciais (Stephens, 1977), como:

$$\begin{aligned} Tr(m) &= \sum_{n=1}^3 W_N \cdot \exp(-K_n \cdot m) \\ &= \sum_{n=1}^3 W_N \cdot Tr_n(m) \end{aligned} \quad (3.23)$$

Onde $Tr_n(m) = \exp(-K_n m)$, m é o comprimento óptico do vapor de água, K_n é o coeficiente de extinção equivalente e W_n é a função peso. Os coeficientes W_n e K_n são derivados a partir de ajustes experimentais usando a função de absorção de Yamamoto e são mostrados na Tabela 2.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros da Equação (3.23)

N	1	2
W_n	0,12096	0,80556
K_n	0,19649	0,00132

Fonte: Chen & Cotton, 1983

Seguindo este procedimento, o espectro solar completo pode ser imaginado sendo dividido em três bandas. Em cada banda, a transmitância (Tr) pode ser representada por uma função exponencial. A vantagem deste esquema é que a transmitância entre uma camada l e uma camada $(l+1)$ pode ser simplesmente representada por

$$Tr_{n/l} = \exp(-K_n(m_{l+1} - m_l)) \quad (3.24)$$

onde m_l ($g \cdot cm^{-2}$) é o caminho óptico total do vapor de água acima da l -ésima camada. A absorptância de Yamamoto [Equação (3.6)] pode ser também representada por

$$A(m) = 1 - Tr(m) \quad (3.25)$$

Por que $Tr(m)$ foi particionado artificialmente em três bandas, a absorptância em cada banda pode ser escrita como

$$A_n(m) = 1 - Tr_n(m) \quad (3.26)$$

Então, a “real” absorptância entre a camada l e a $(l+1)$ dentro de cada banda pode ser escrita como

$$\begin{aligned} A_{n/l} &= A_n(m_{l+1}) - A_n(m_l) \\ &= (1 - \exp(-K_n \cdot m_{l+1})) - (1 - \exp(-K_n \cdot m_l)) \\ &= Tr_n(m_l) \cdot (1 - Tr_{n/l}) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Onde $Tr_n(m_l)$ é a transmitância da atmosfera acima da l -ésima camada. Para uma atmosfera sem nuvens, $Tr_n(m_l)$ pode ser expresso como

$$Tr_n(m_l) = \exp(-K_n m_l) \quad (3.28)$$

Para uma atmosfera mista com céu claro e nuvens, esta expressão é um pouco diferente:

$$Tr_n(m_l) = \prod_{i=1}^{l-1} Tr_{n/i} \quad (3.29)$$

As Equações (3.28) e (3.29) são idênticas se não existirem nuvens na atmosfera. O caminho óptico total do vapor de água (m_l) pode ser também escrito como

$$m_l = \sum_{i=1}^{l-1} \rho_0 \cdot r_v \cdot (Z_{i+1} - Z_i) \quad (3.30)$$

A Equação (3.29) pode simular a presença de uma camada de nuvens. Se a i -ésima camada for coberta por nuvens, a transmitância desta camada de nuvens pode ser calculada pela parametrização de Stephens (1978).

As equações que seguem representam o procedimento para se computar as variáveis radiativas (A_n , Tr_n , e Re_n) em uma atmosfera mista com e sem nuvens.

$$Tr_{n/l} = H(0,517 \cdot Tr_1 + 0,483 \cdot Tr_2) + (1-H) \cdot \exp(-K_n(m_{l+1} - m_l)) \quad (3.31)$$

$$A_{n/l} = 0,483 \cdot H \cdot A_2 + A_{oz-n/l} + (1-H) \cdot Tr_n(m_l) \cdot (1 - Tr_{n/l}) \quad (3.32)$$

$$Re_{n/l} = H \cdot (0,517 \cdot Re_1 + 0,483 \cdot Re_2) + (1-H) \cdot Re_{clear} \quad (3.33)$$

$$Tr_{n/l} = 1 - A_{n/l} - Re_{n/l} \quad (3.34)$$

$$Tr_n(m_{l+1}) = \prod_{i=1}^l Tr_{n/i} \quad (3.35)$$

Neste caso H é a fração de cobertura de nuvem, e a Equação (3.31) representa a primeira estimativa da transmitância. As variáveis radiativas $A_{n/l}$, $Tr_{n/l}$, e $Re_{n/l}$ são as “reais” absorptâncias, transmitâncias e refletâncias entre as camadas l e $l+1$. $Tr_n(m_{l+1})$ representa a transmitância total entre as camadas l e $l+1$.

3.1.2 Harrington, 1997

3.1.2.1 As equações básicas de fluxo para o método δ -dois fluxos.

Em seu trabalho de dissertação e através de comunicação pessoal, Harrington faz referência à formulação usada por Ritter e Geleyn, 1992.

A formulação básica das equações δ -dois fluxos segue os conceitos apresentados por Zdunkowski et al. (1982), onde foi demonstrado que as equações de fluxos podem ser escritas tanto para a transferência radiativa da energia solar monocromática quanto para a radiação infravermelha em uma atmosfera onde ocorrem os processos de espalhamento e absorção.

As equações básicas são:

$$\begin{aligned}\frac{dF_1}{d\delta} &= \alpha_1 F_1 - \alpha_2 F_2 - \alpha_3 J \\ \frac{dF_2}{d\delta} &= \alpha_2 F_1 - \alpha_1 F_2 + \alpha_4 J \\ \frac{dS}{d\delta} &= -(1-wf) \cdot \frac{S}{\mu_0}\end{aligned}\tag{3.36}$$

Com as seguintes definições:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= U \{1 - w \cdot [1 - \beta_0 (1 - f)]\} \\ \alpha_2 &= U \beta_0 w \cdot (1 - f) \\ \alpha_3 &= \beta(\mu_0) \cdot w \cdot (1 - f) \\ \alpha_4 &= [1 - \beta(\mu_0)] \cdot w \cdot (1 - f) \\ J &= S / \mu_0\end{aligned}\tag{3.37}$$

Nas equações acima temos que:

- F_1 e F_2 são os fluxos difusos ascendente e descendente, respectivamente;
- S é fluxo solar direto;
- w é o albedo de espalhamento simples;

- f é a fração de radiação contida num pico de espalhamento direto da função de fase;
- U é o fator de difusividade;
- β_0 é a fração média do coeficiente de retro-espalhamento para a radiação difusa;
- $\beta(\mu_0)$ é a fração média do coeficiente de retro-espalhamento para a radiação direta;
- μ_0 é o cosseno do ângulo zenital.

Em contraste com Zdunkowski et al. (1982) foi incluído o fator $(1-f)$ como normalização também nos coeficientes de radiação difusa α_k , definidos anteriormente. As frações de retro-espalhamento para as radiações direta e difusa são derivadas da função de fase do espalhamento das partículas. O desenvolvimento da função de fase usando os polinômios de Legendre segundo Joseph et al. (1976) e as subseqüentes integrações angulares nos leva a

$$\beta_0 = \frac{4+g}{8(1+g)} \quad (3.38)$$

$$\beta(\mu_0) = \frac{1}{2} - \frac{3}{4} \frac{g}{(1+g)} \mu_0 \quad (3.39)$$

onde g é o fator de assimetria da função de fase. Por razões de eficiência computacional, não são resolvidas as equações diferenciais (Equação (3.36)) que representam a formulação explícita do método δ -dois fluxos. Em vez, é utilizada uma formulação equivalente, definida por:

$$\delta' = (1-wf)\delta \quad (3.40)$$

$$w' = \frac{w(1-f)}{1-wf} \quad (3.41)$$

Pode-se obter da Equação (3.36):

$$\begin{aligned} \frac{dF_1}{d\delta'} &= \alpha'_1 F_1 - \alpha'_2 F_2 - \alpha'_3 J \\ \frac{dF_2}{d\delta'} &= \alpha'_2 F_1 - \alpha'_1 F_2 + \alpha'_4 J \\ \frac{dS}{d\delta'} &= -\frac{S}{\mu_0} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Onde:

$$\begin{aligned}
\alpha'_1 &= U \cdot [1 - w'(1 - \beta_0)] \\
\alpha'_2 &= U \cdot \beta_0 \cdot w' \\
\alpha'_3 &= \beta_0(\mu_0) \cdot w' \\
\alpha'_4 &= [1 - \beta(\mu_0)] \cdot w'
\end{aligned} \tag{3.43}$$

3.1.2.2 Propriedades ópticas das nuvens

As propriedades ópticas utilizadas no modelo de dois fluxos são derivadas da conexão de vários métodos de microfísica usados no modelo RAMS. Essencialmente duas características da microfísica são rotineiramente usadas. Primeiro, o espectro do tamanho das gotículas determinado analiticamente da função gamma com parâmetro de forma (ν) fixo. Segundo, uma representação explícita da função de distribuição de água e gelo, sem nenhuma dependência do parâmetro de forma.

O modelo de dois fluxos requer três parâmetros ópticos de vários hidrometeoros, como o albedo de espalhamento simples da partícula (w), o coeficiente de extinção (β_{ext}) e o parâmetro de assimetria (g). Para uma dada propriedade óptica da nuvem, σ , média de Slinco e Schrecker (1982) ganha a forma

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma} &= \frac{1}{E} \int_{\Delta\lambda} \left[\int_0^\infty A(D) \cdot \sigma \cdot n(D) dD \right] E_\lambda d\lambda \\
\bar{E} &= \int_{\Delta\lambda} E_\lambda d\lambda \\
E_\lambda &= S_\lambda
\end{aligned} \tag{3.44}$$

Onde $A(D)$ é a área projetada do hidrometeoro considerado, σ é a propriedade óptica considerada, S_λ é a densidade de energia solar e $n(D)$ é a função de distribuição da partícula. A obtenção das Expressões (3.44) requer o conhecimento dos coeficientes ópticos de cada tipo de hidrometeoro (σ).

O cálculo preciso das propriedades ópticas para as gotas líquidas pode ser feito através de uma solução analítica da teoria de Lorenz-Mie (van de Hulst, 1957). Esta solução, entretanto, requer um custo computacional elevado por exigir o cálculo da média de todas as propriedades ópticas. Isto é facilmente notado quando examinamos a Equação (3.44) onde a integração em todas as bandas e sobre todos os tamanhos das gotículas deve ser feita numericamente, pois a teoria de Lorenz-Mie não permite uma solução analítica destas integrais.

Então, deve-se usar outros métodos para aproximar a teoria de Lorenz-Mie, mas que permitam que as integrais sejam resolvidas analiticamente. Um método que vem sendo amplamente usado na comunidade científica é a Teoria da Difração Anômala (TDA), de van de Hulst, 1957. Nesta teoria a interferência de um raio que passa através da esfera (gotícula de nuvem) e outro que passa fora da esfera são computados a uma grande distância da esfera. Desta análise pode-se derivar o coeficiente de extinção e de absorção para a esfera. O coeficiente de extinção é:

$$\beta_{ext} = 2K(t \cdot D) \quad (3.45)$$

Onde K é função da distância entre a esfera e o “ponto de observação”, t é função do índice de refração complexo e D é o diâmetro da esfera. O coeficiente de absorção pode ser calculado como:

$$\beta_{abs} = K(w \cdot D) \quad (3.46)$$

Onde w é função do índice de refração imaginário. Estas funções são facilmente integradas em função da distribuição gama, produzindo uma forma próxima à solução analítica da Equação (3.44). Estas funções, entretanto, produzem alguns erros em comparação com a teoria de Lorenz-Mie. Segundo Harrington¹, 1997, é possível reduzir estes erros ainda mais, como mostrados por Mitchell (1997), onde a parametrização de TDA é estendida. Mitchell (1997) parametrizou a “física que faltava” na TDA, como os fenômenos internos de refle-

xão/refração, os “tunelamentos por ressonância” e os efeitos de borda que não foram levados em conta da TDA padrão.

Pelo método de Mitchell, o coeficiente de absorção é modificado por dois termos:

$$\begin{aligned}\beta_{abs,m} &= (1 + C_{ir} + C_{res}) \cdot \beta_{abs} \\ C_{ir} &= a_{ir} \exp\left[\frac{-8\pi n_i D}{3\lambda}\right] \\ C_{res} &= r_a \frac{k^m e^{-\epsilon k}}{k_{\max}^m e^{-m}}\end{aligned}\tag{3.47}$$

Onde β_{abs} é o coeficiente de absorção da TDA padrão dado na Equação (3.46), C_{ir} é o coeficiente que corrige as reflexões/refrações internas, C_{res} é o coeficiente que corrige tunelamento por ressonância; as variáveis da Equação (3.47) são

$$\begin{aligned}a_{ir} &= \frac{1}{4} + \frac{1}{4} e^{-1167n_i} \\ r_a &= 0,7393n_r - 0,6069 \\ m &= \frac{1}{2} \\ k &= \frac{D}{\lambda} \\ k_{\max} &= \frac{m}{\epsilon} \\ \epsilon &= \frac{1}{4} + 0,6 \left\{ 1 - \exp\left[\frac{-8\pi n_i}{3}\right] \right\}^2\end{aligned}$$

O termo C_{ir} leva em conta o fato de que para pequenas absorções, a reflexão interna e a refração podem aumentar a absorção total da partícula. O termo C_{res} leva em conta o fato de que quando $n_r > 1$, a ressonância pode surgir causando o tunelamento dos fótons de fora da gotícula para uma pequena distância dentro da mesma onde os fótons serão absorvidos. O coeficiente de extinção é modificado pela adição dos termos do tunelamento por ressonância e os efeitos de bordas que são dados por Mitchell (1997).

$$\beta_{ext,m} = \left(1 + \frac{C_{res}}{2}\right) \beta_{ext} + \beta_{edge}$$

$$\beta_{edge} = 2 \left[1 - \exp\left(\frac{-0,06\pi D}{\lambda}\right)\right] \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^{-2/3} \quad (3.48)$$

O termo do efeito de borda, β_{edge} , corrige o fato de que a radiação que passa “rasante” reflete na borda da gotícula e pode interferir na radiação incidente que não é refletida. Para uma descrição mais detalhada das características físicas destes termos, veja Mitchell (1997).

Segundo Harrington, a TDAM (Teoria de Difração Anômala de Mitchell) pode ser facilmente integrada em função da distribuição gama e mostra erros menores em comparação com a teoria de Lorenz-Mie, por este motivo a abordagem TDAM foi escolhida para resolver a Equação (3.44).

4 DADOS OBSERVADOS

Para uma análise da radiação solar incidente no estado do Ceará, foi feito um estudo dos dados de radiação coletados pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da FUNCEME. O propósito foi analisar a variação anual da radiação solar incidente no estado e fazer uma filtragem das localidades que apresentam as maiores séries históricas e dados confiáveis para servirem como base para validação dos resultados do modelo regional RAMS. Os dados analisados são referentes ao ano de 2005, devido à maior disponibilidade de dados observados. Por este motivo foi este o ano usado na simulação pelo modelo. A Figura 13 mostra a distribuição espacial das PCDs da FUNCEME.

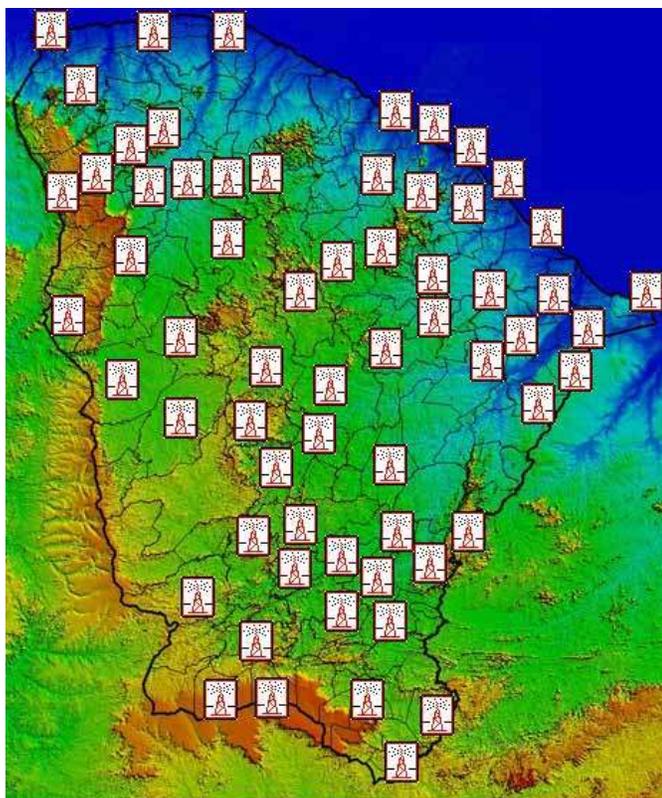


Figura 13 - Distribuição espacial das PCDs. Fonte: www.funceme.br

Verifica-se que há boa distribuição espacial cobrindo quase toda a extensão do estado do Ceará.

4.1 CARACTERÍSTICAS DO EQUIPAMENTO

Todas as Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da FUNCEME estão equipadas com sensores meteorológicos que medem temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar global, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e pluviometria. O piranômetro usado nas PCDs da FUNCEME é do tipo SP-LITE, que mede a radiação global (direta + difusa) através de um detector de fotodiodo. Os valores de saída deste aparelho são expressos em Watts por metro quadrado (W / m^2).

As características espectrais do equipamento podem ser observadas na Figura 14.

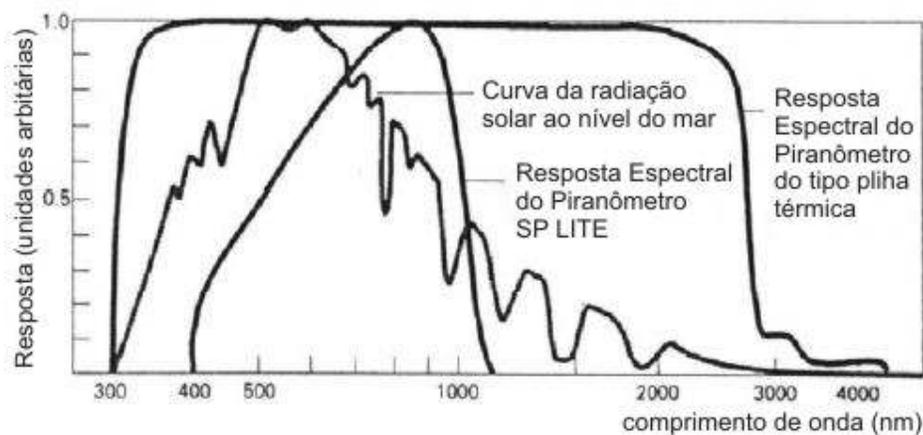


Figura 14 – Sensitividade espectral do piranômetro SP LITE comparado com a radiação solar.

A sensibilidade do sensor é de 400 a 1100 nm e o tipo de detector utilizado é o BPW 34. Os maiores erros estimados em campo são da ordem de $\pm 5\%$ quando comparados

com as situações de calibração. Os interessados em maiores informações podem acessar <http://www.campbellsci.com/documents/manuals/sp-lite.pdf>.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

Devido ao grande número de PCDs, o volume de dados também é significativo. Por este motivo foi necessário realizar uma filtragem para escolher as localidades que possuíam a série de dados mais completa para o ano de 2005.

Conforme apresentado nos Gráficos 1 e 2, foram gerados gráficos usando a média móvel (utilizando um período de 5 dias para realizar a média) da radiação solar incidente para seis PCDs, sendo o Gráfico 1 relativo para as localidades de Quixadá, Ipú e Caucaia e o Gráfico 2 para as localidades de Jati, Ubajara e Icapuí.

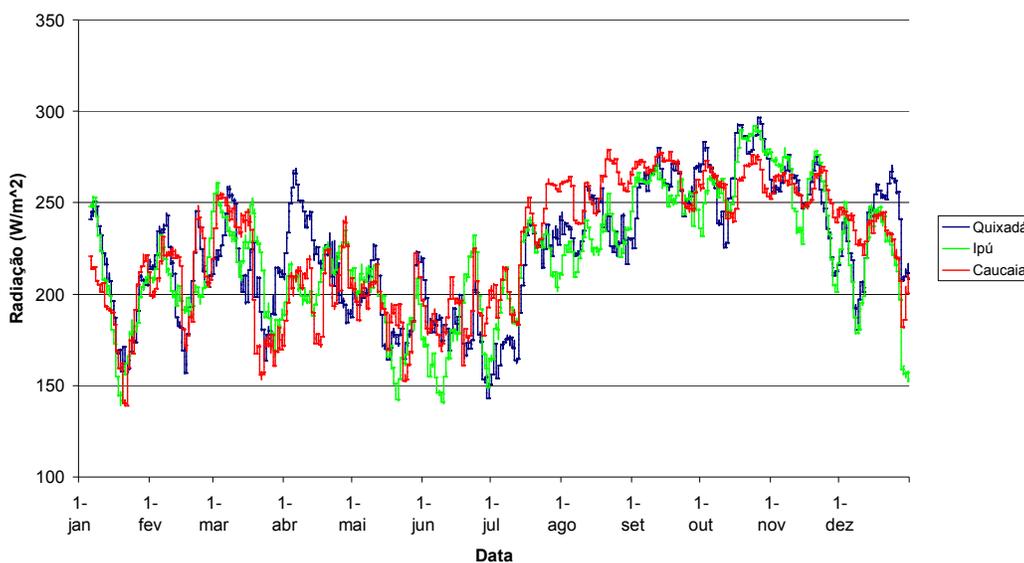


Gráfico 1 - Média móvel da radiação solar incidente medida em W/m^2 em Quixadá, Ipú e Caucaia.

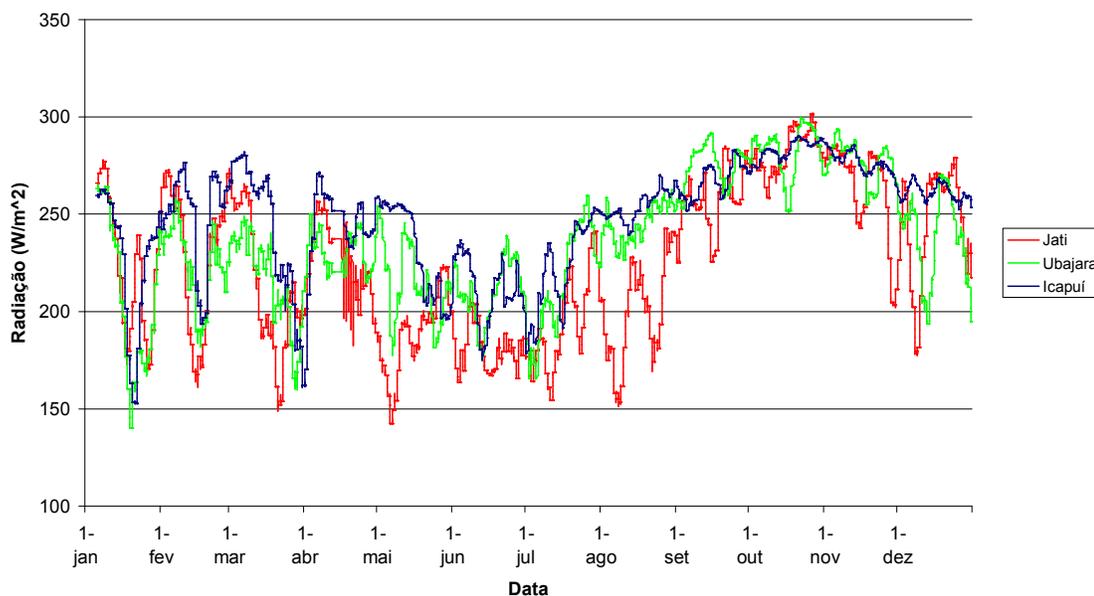
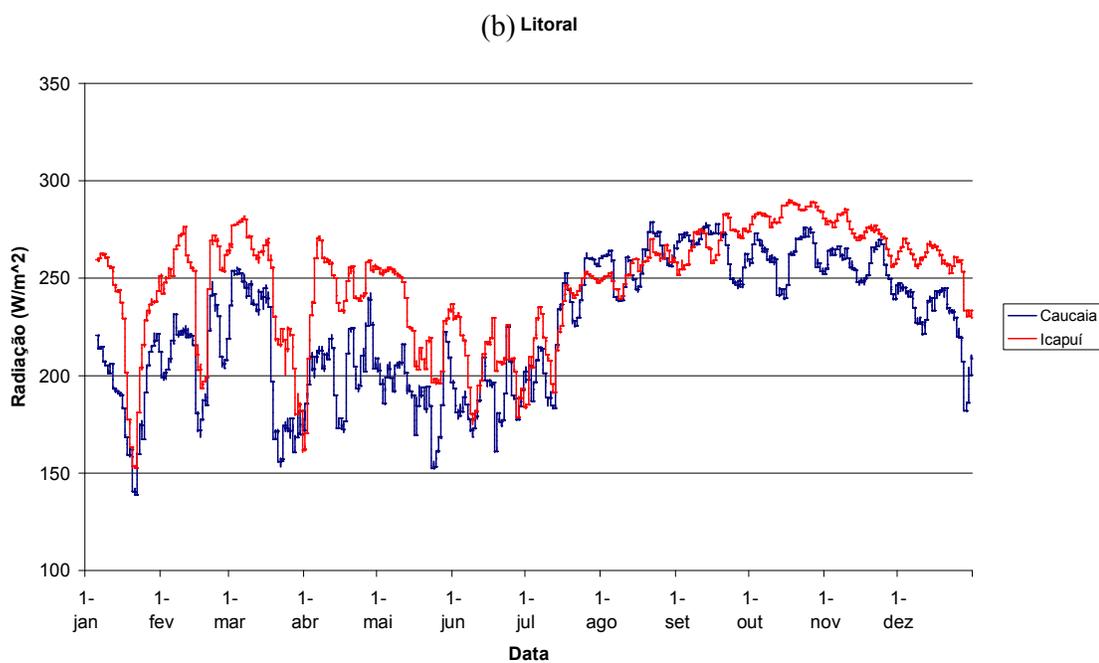
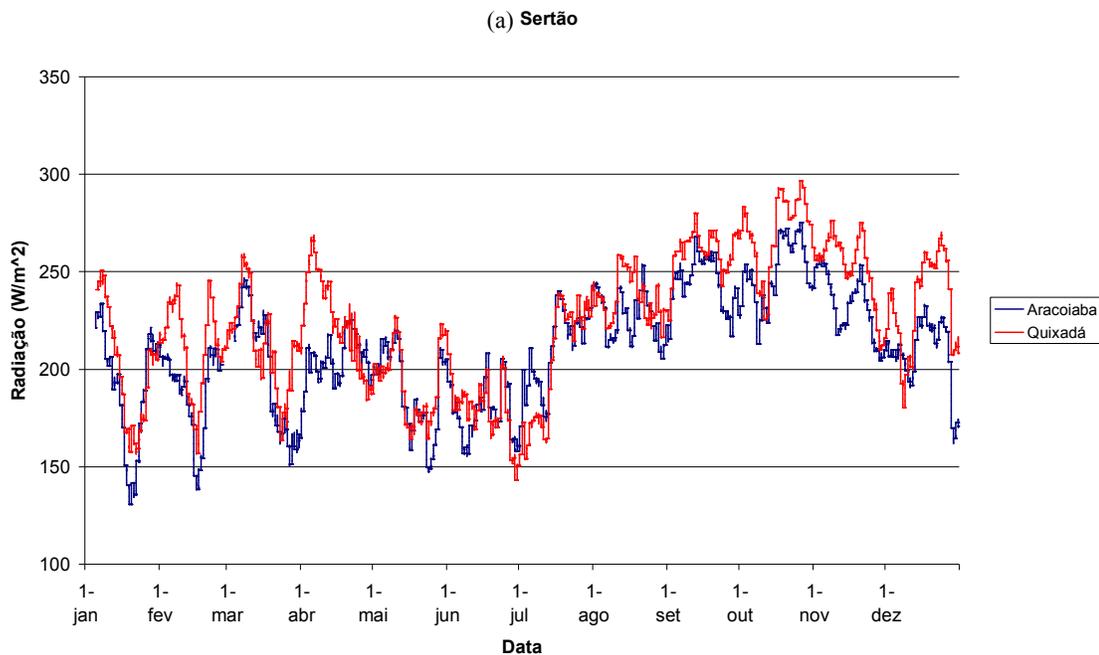


Gráfico 2 - Média móvel da radiação solar incidente medida em W/m^2 em Jati, Ubajara e Icapuí.

Pode-se notar que em ambos os gráficos o primeiro semestre apresenta menores índices de radiação. No Gráfico 1, por exemplo, o primeiro semestre de 2005 apresenta média de $201,16 W/m^2$ enquanto no segundo semestre a média foi de $244,63 W/m^2$. Para uma melhor análise do comportamento da radiação solar para as macrorregiões do estado do Ceará, o

Gráfico 3 mostra as mesmas localidades utilizadas nos Gráficos 1 e 2, porém, separadas pelas macrorregiões do sertão, litoral e região serrana.



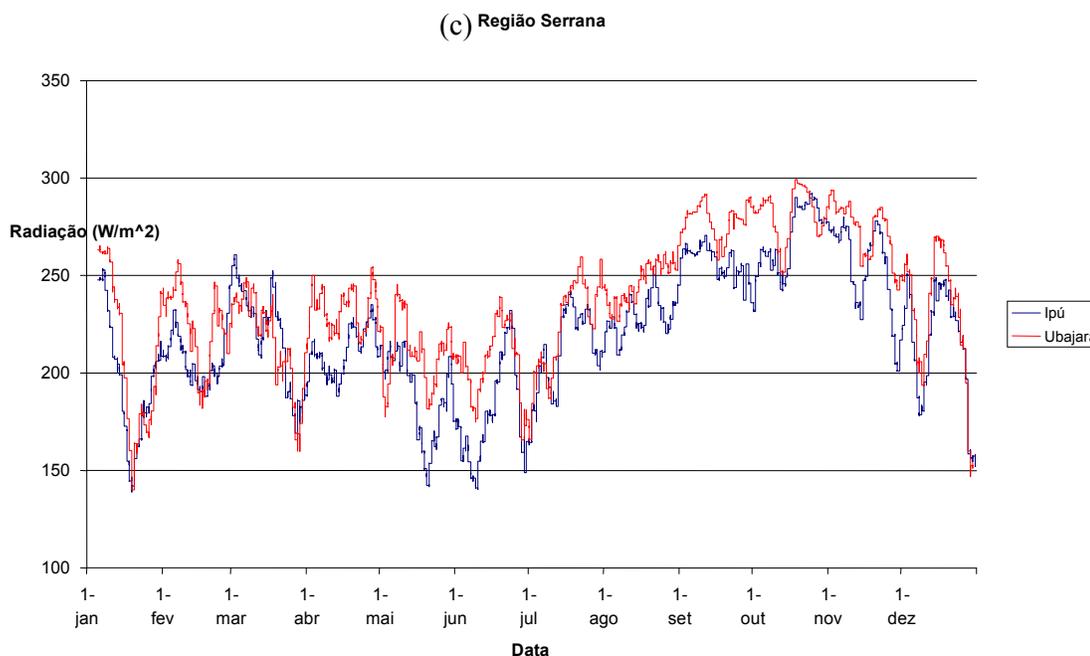


Gráfico 3 - Médias móveis por macro regiões: (a) Sertão, (b) Litoral e (c) Região Serrana.

Nota-se que em todos os gráficos apresentados não fica evidente grandes diferenças entre as macrorregiões do estado; nas três situações do Gráfico 3 temos o primeiro semestre com menor quantidade de radiação solar incidente que o segundo. Este resultado sugere que unicamente as variações na posição aparente do Sol e as variações no regime das chuvas que ocorrem no estado e conseqüentemente a ocorrência de nuvens, influenciam no total de radiação solar que chega à superfície.

O fator primordial que afeta a radiação solar incidente é o regime de chuvas do estado. No Ceará, o período de chuvas mais significativas inicia-se em dezembro de cada ano e podem estender-se até junho ou julho, dependendo das condições oceânicas e atmosféricas atuantes. As chuvas que acontecem em dezembro e janeiro são chamadas chuvas de pré-estação e ocorrem principalmente na região do Cariri, sendo influenciadas pela proximidade de frentes frias, que se posicionam sobre a Bahia, sul do Maranhão e Piauí neste período. Em fevereiro de cada ano inicia-se a chamada quadra chuvosa do Estado do Ceará, que se estende até maio.

Aratuba	-04° 23' 20,9"	-39° 02' 27,5"
Cariré	-03° 50' 22,1"	-40° 39' 45,4"
Groairas	-03° 54' 36,6"	-40° 22' 40,3"
Icapuí	-04° 43' 56,9"	-37° 18' 21,4"
Icó	-06° 25' 38,4"	-38° 55' 21,8"
Jaguaruana	-04° 50' 41,1"	-37° 45' 24,6"
Maranquape	-03° 59' 06,1"	-38° 47' 17,5"
Pacajus	-04° 11' 24,0"	-38° 29' 54,2"
Santa Quitéria	-04° 18' 35,2"	-40° 10' 36,1"
São Benedito	-04° 01' 28,6"	-40° 54' 39,5"
Ubajara	-03° 51' 44,9"	-41° 07' 02,9"

Fonte: www.funceme.br

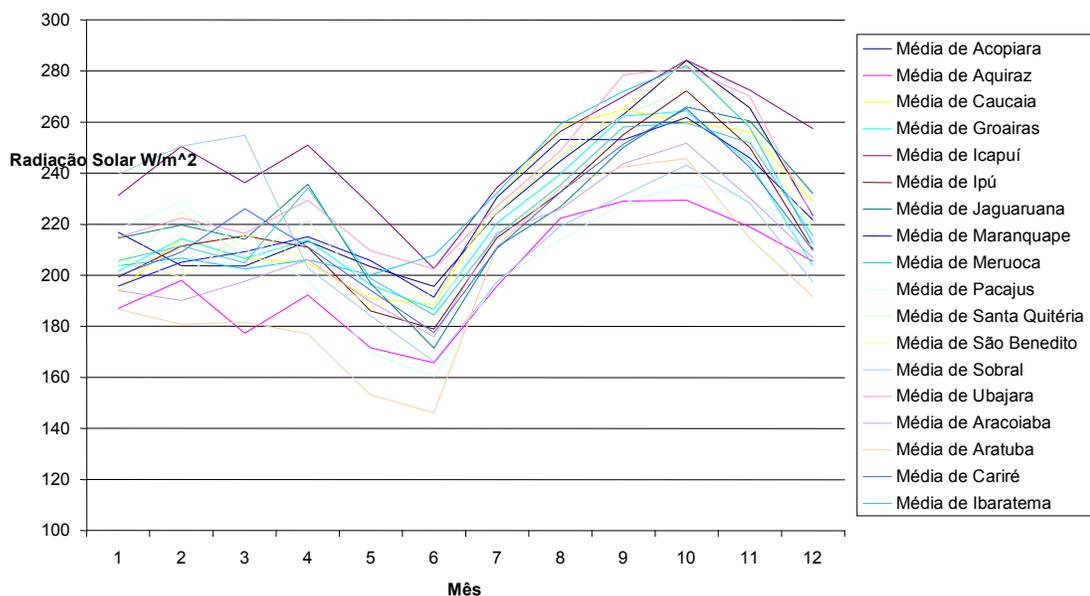


Gráfico 4 - Médias mensais das localidades utilizadas para validar o modelo RAMS.

As médias mensais das 14 PCDs selecionadas são mostradas no Gráfico 4 e a médias destas PCDs são mostradas no Gráfico 5, é mostrada ainda a radiação no topo da atmosfera (TOA, sigla em inglês). Esta média foi feita através do método Thiessen, que utiliza médias ponderadas para as áreas de influência de cada localidade. O mínimo em Junho no Gráfico 4 se deve ao solstício de verão no hemisfério norte, e o máximo, que acontece em Outubro, é devido à proximidade com o equinócio. Note, ainda, a presença de outro mínimo secundário que ocorre em Dezembro e o outro máximo que deveria acontecer em Fevereiro é inibido de-

vido à presença de nuvens por causa da quadra chuvosa do estado. Note que a quantidade de radiação solar incidente atenuada pela atmosfera é a diferença entre as duas curvas do Gráfico 5.

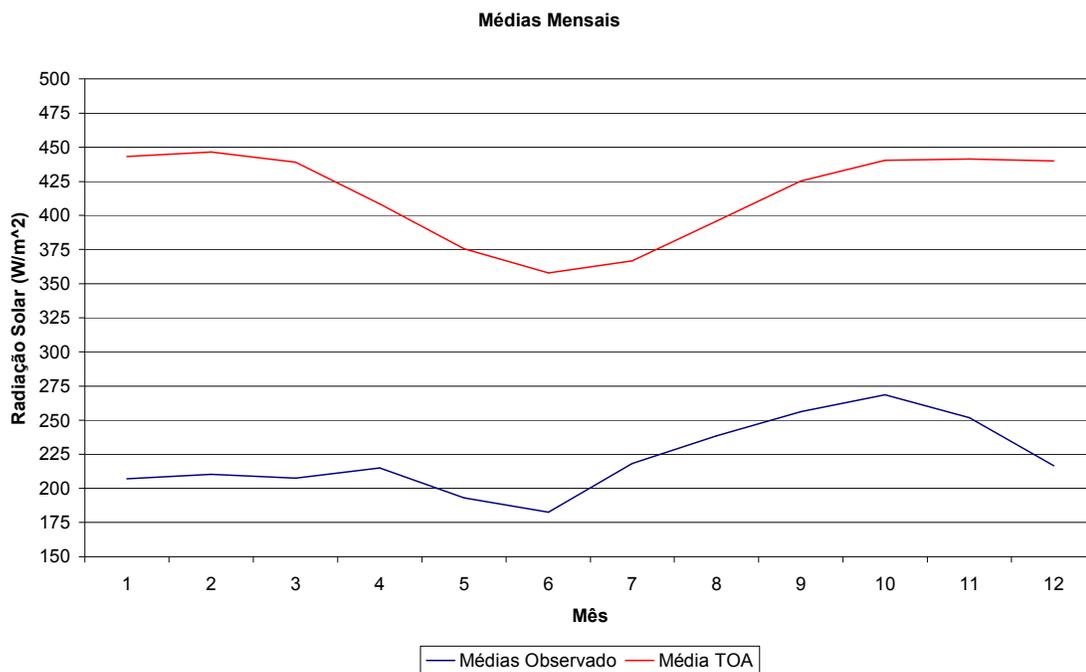


Gráfico 5 - Média entre as localidades utilizadas no Gráfico 4 e média da radiação no topo da atmosfera.

5 SIMULAÇÕES

5.1 TESTES DE SENSIBILIDADE

Foram realizados testes de sensibilidade com o modelo RAMS a fim de escolher a melhor configuração para os cálculos da radiação solar incidente. As simulações continham a mesma configuração, exceto pela parametrização de radiação. As configurações do modelo estão relacionadas no Apêndice A. Foi simulado o ano de 2005 para os dois esquemas de radiação (Harrington e Chen & Cotton) utilizando uma grade horizontal com 40 km de espaçamento cobrindo quase todo o Nordeste do Brasil. A grade horizontal utilizada nas simulações é mostrada na Figura 16, onde é mostrada também a média anual da radiação solar incidente sobre o Nordeste do Brasil (utilizando a parametrização de Chen & Cotton sem correções).

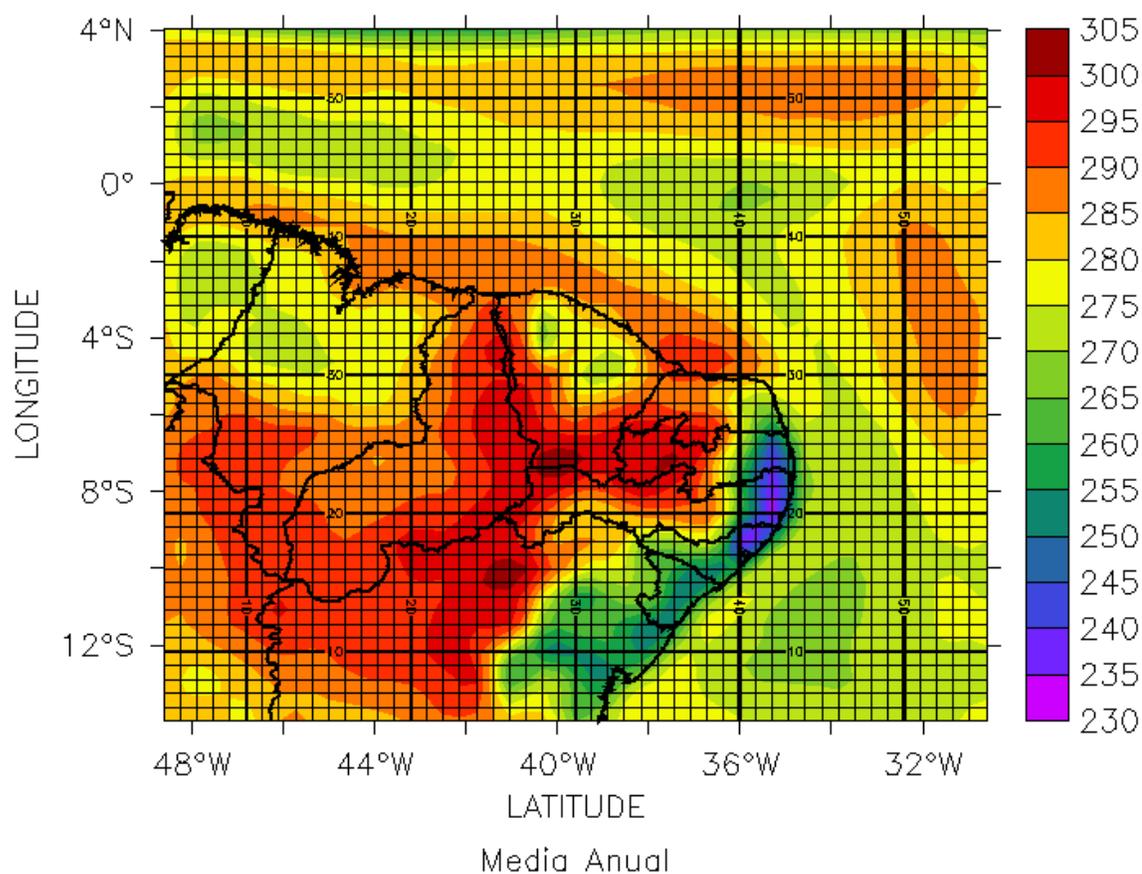


Figura 16 – Média anual da radiação solar incidente usando a parametrização de Chen & Cotton, com destaque para a grade horizontal usada na simulação.

A radiação foi calculada pelo modelo a intervalos de 10 minutos (pois os cálculos da radiação solar são computacionalmente muito dispendiosos) e os resultados foram armazenados a cada hora de simulação. Uma comparação entre os resultados das simulações utilizando os esquemas de Harrington e Chen & Cotton pode ser vista no Gráfico 6.

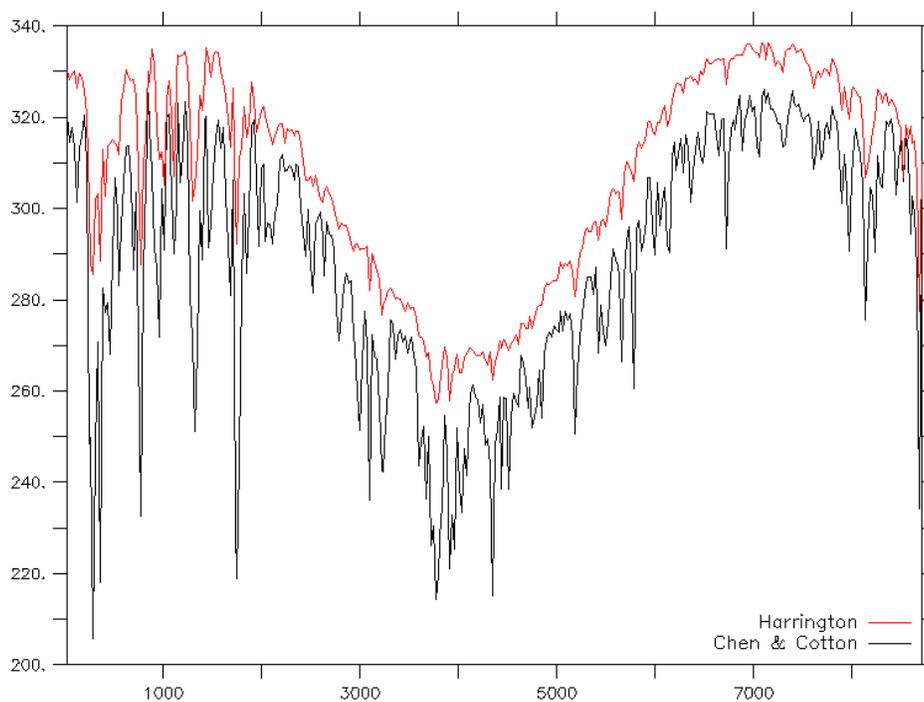


Gráfico 6 – Comparação entre o resultado do modelo (média diária) para os dois esquemas de radiação.

No gráfico 6, o eixo y representa os valores de radiação solar em W/m^2 e o eixo x representa número de horas em um ano desde 0 em 1 de Janeiro de 2005 às 00:00 até 8760 em 31 de dezembro de 2005 às 23:00. O vale no Gráfico 6 é referente ao solstício de verão (Junho), quando o Sol está a norte da linha do Equador. Para melhor visualização dos resultados, foram feitas médias mensais sobre uma área cobrindo o estado do Ceará, que é o foco deste trabalho.

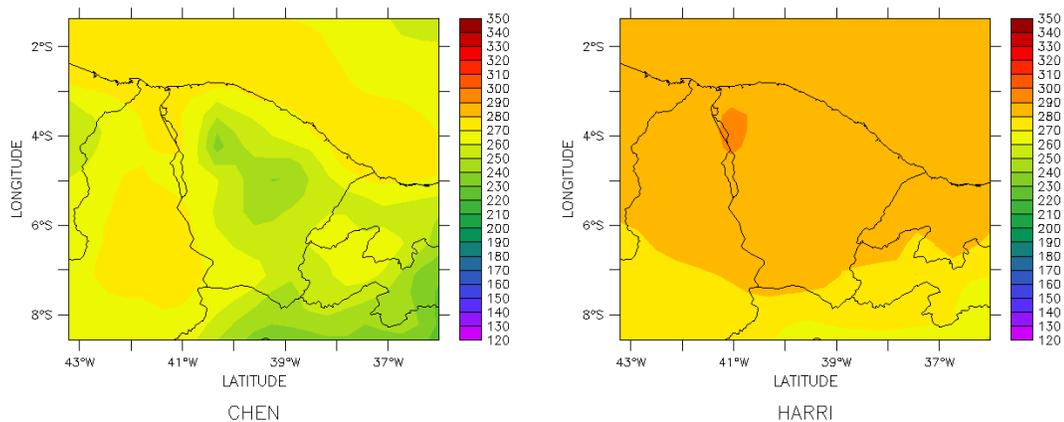


Figura 17 – Comparação entre esquemas de Chen & Cotton (esquerda) e Harrington (direita). Média mensal para o mês de Maio.

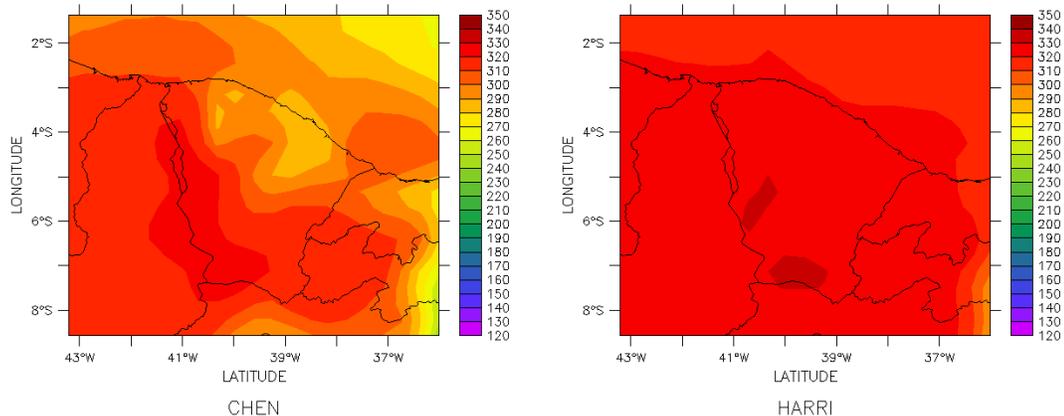


Figura 18 – Comparação entre esquemas de Chen & Cotton (esquerda) e Harrington (direita). Média mensal para o mês de Setembro.

É fácil perceber que a parametrização de Harrington tem variações espaciais bem menores em relação à parametrização de Chen & Cotton, como mostrado nas Figuras 17 e 18. Uma possibilidade de explicação para este fato seria devido à grade horizontal ter espaçamento de 40 km. Como foi visto no Capítulo 3, a parametrização de Harrington tem dependência da microfísica do modelo, e com tal espaçamento talvez não seja possível para o modelo resolver satisfatoriamente a interação entre a radiação e a microfísica. Para resolver esta questão, seria necessário realizar mais simulações de teste, variando a grade horizontal ou ainda variando os parâmetros da microfísica, que foge do escopo deste trabalho.

Para a escolha do melhor esquema para representar a radiação solar incidente ao nível do solo, os resultados das simulações foram comparados com as medidas das PCDs. No Gráfico 7 encontram-se apresentados alguns exemplos desta comparação:

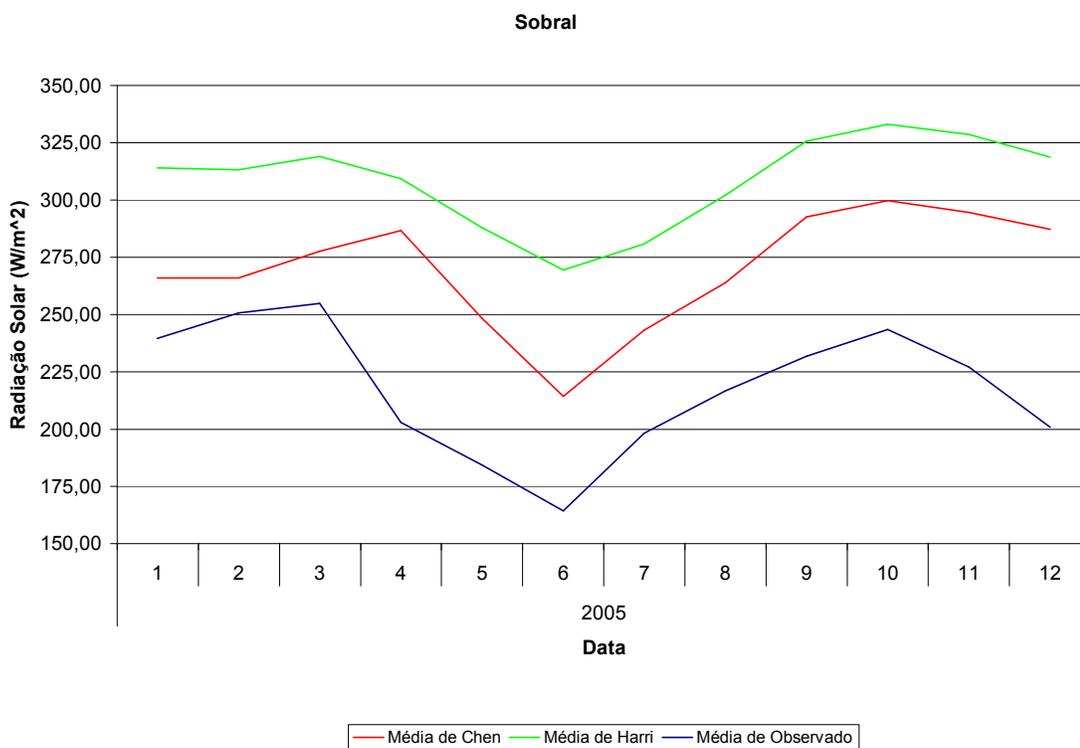
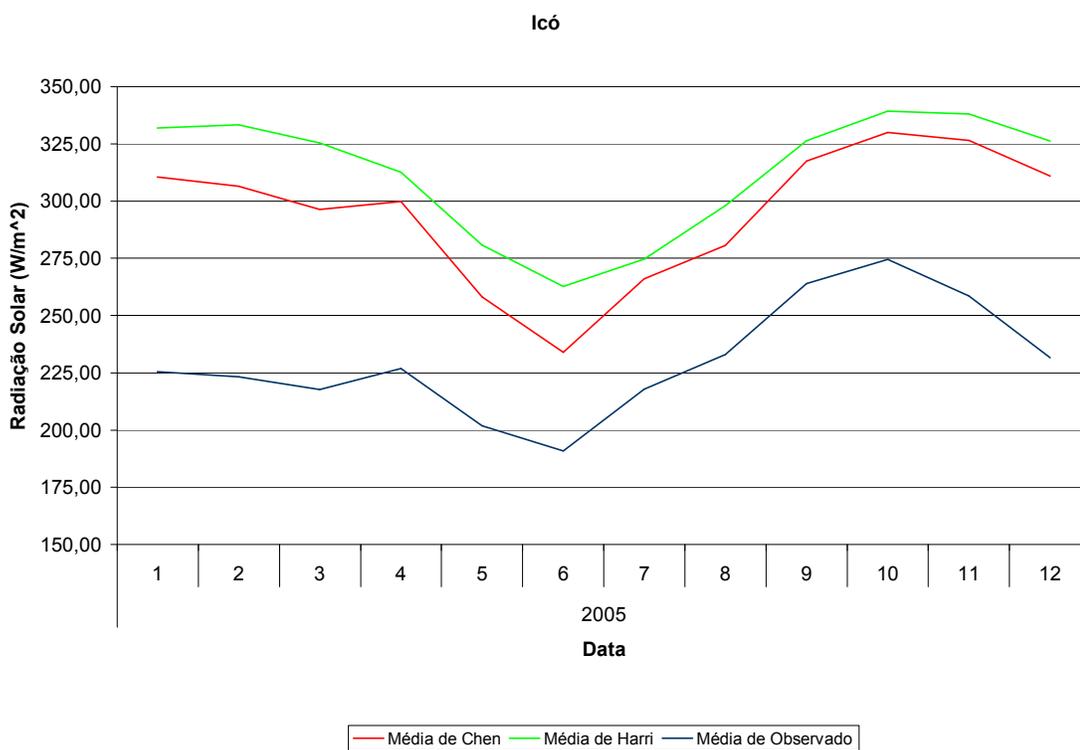


Gráfico 7 – Comparação entre as simulações e as PCDs para as localidades de (a) Icó e (b) Sobral.

Em todos os casos a parametrização de Chen & Cotton apresentou resultados mais próximos em relação às medidas das PCDs, embora com erros ainda consideráveis. Por este motivo esta será a parametrização considerada para sofrer os devidos ajustes a serem determinados baseados nos dados de medida obtidos pelas PCDs.

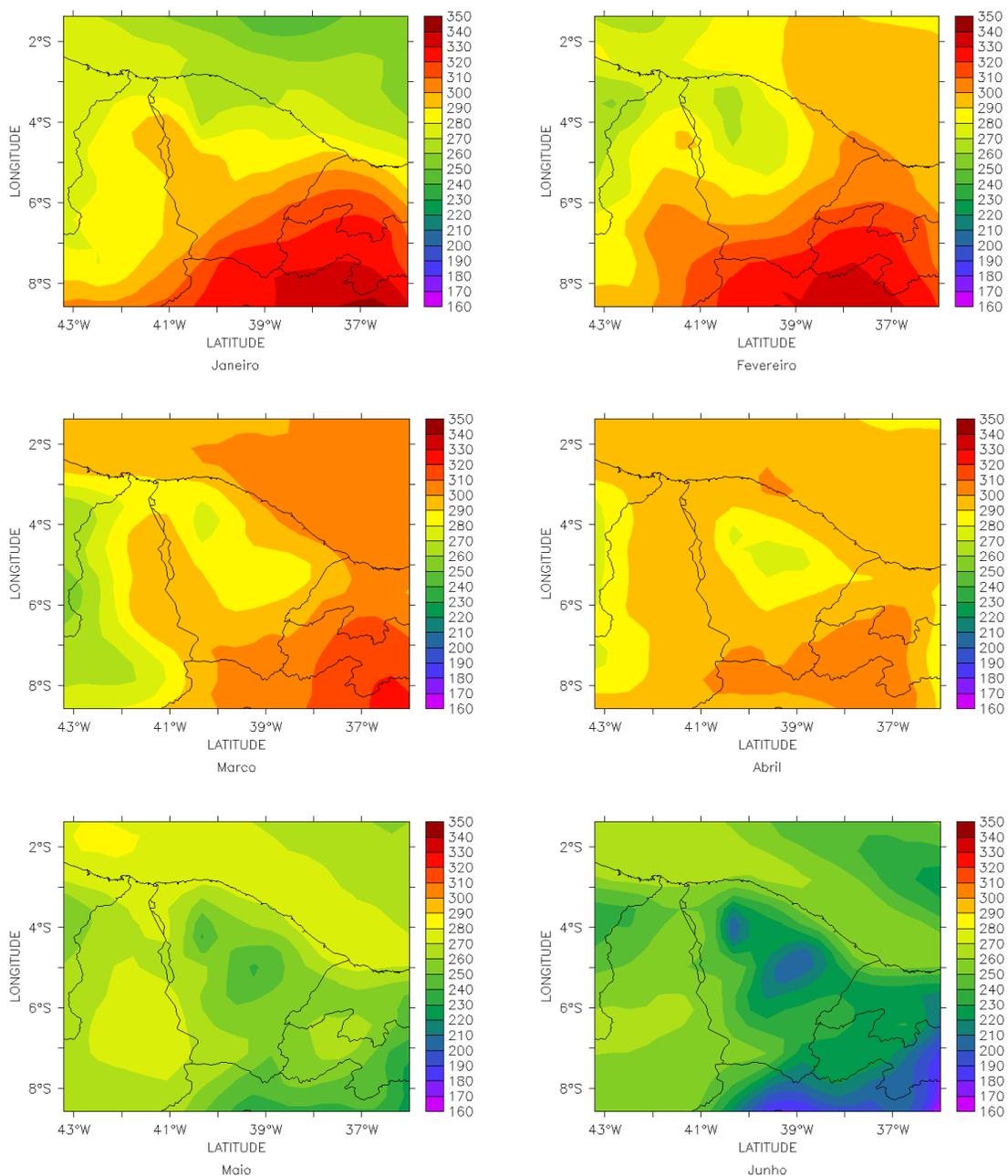
5.2 AJUSTES AO MODELO DE CHEN & COTTON

Para gerar os resultados desta seção, foi feita uma nova simulação, com as respectivas configurações mostrada no Apêndice A, com um breve resumo a seguir:

- Período da Simulação:
 - De Janeiro a Dezembro de 2005;
- Dados do Modelo Global: Reanálise do NCEP/NCAR.
- Parametrizações Utilizadas:
 - Convecção: Kuo;
 - Turbulência: Mellor & Yamada;
 - Radiação: Chen & Cotton;
- Grade horizontal:
 - Grade Maior: 60 pontos com 40 km de espaçamento;
 - Nudging de 1200s nas laterais e de 86400s no centro.
- Grade vertical:
 - 39 pontos;
 - Altitude de aproximadamente 24 km (começo da estratosfera);
 - Nudging vertical a 17 km com tempo de 43200s.

A Figura 19 mostra as médias mensais da radiação solar incidente, em W/m^2 , ao longo do ano de 2005 para uma área sobre o estado do Ceará. Nesta, não foi feita nenhuma

correção, e serve para ilustrar a saída do modelo. Como visto na seção anterior, o resultado da simulação apresenta um erro sistemático que eleva os valores das médias mensais embora consiga representar bem (qualitativamente) as variações anuais da radiação solar incidente.



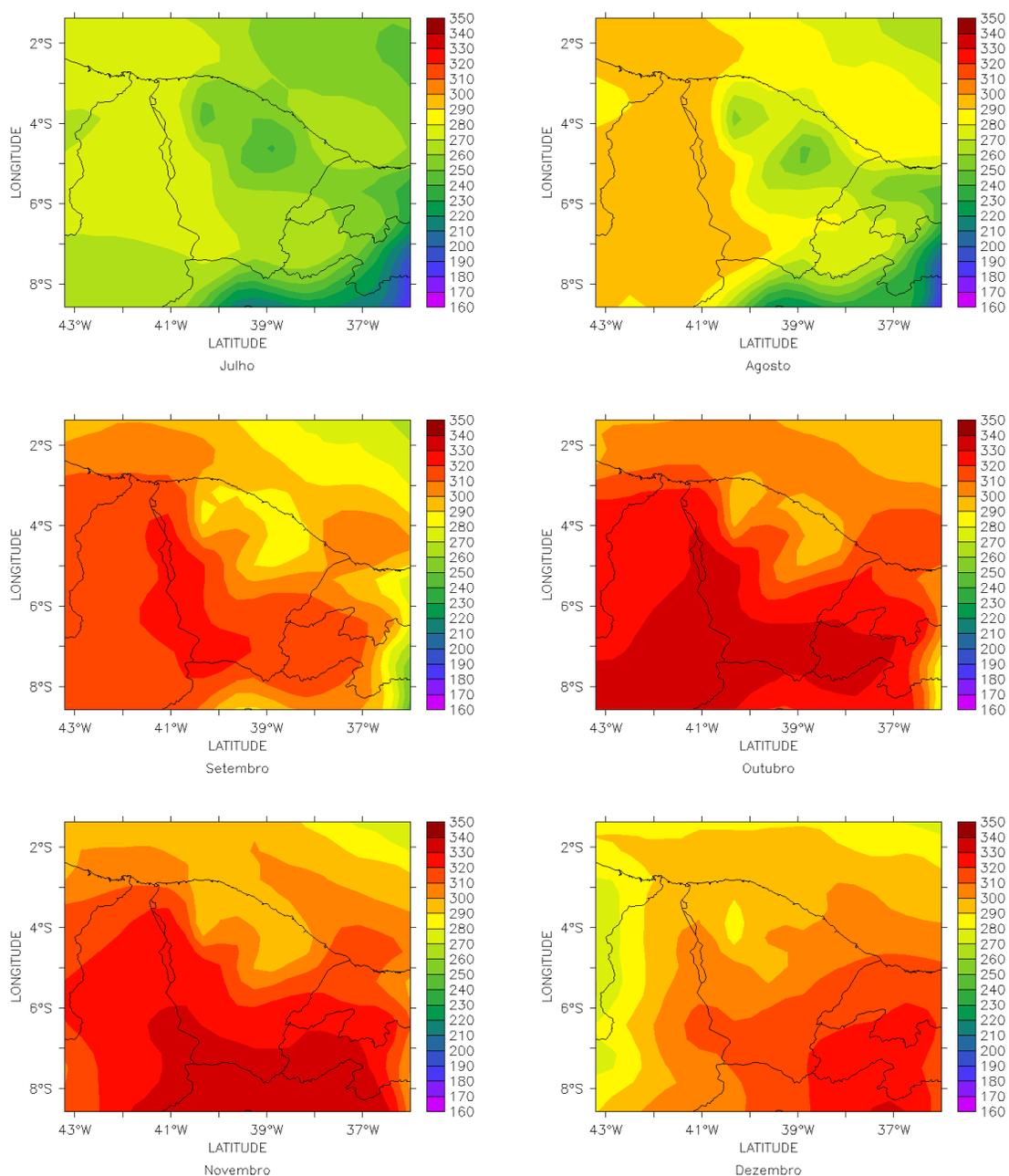


Figura 19 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, resultado do modelo sem correções.

Na Figura 19, o mês de Junho apresenta os menores valores para a média mensal da radiação solar e o mês de Outubro apresenta as maiores médias mensais. Isto está relacionado com o movimento aparente do Sol em relação à linha do Equador. Lembrando que no solstício de inverno (no hemisfério Norte) o Sol está à $23,5^\circ$ ao norte da linha do Equador e no

solstício de verão o Sol está a 23,5° ao sul. Note que o solstício de verão se dá em Dezembro, mas o máximo acontece em Outubro devido à latitude da área selecionada (de 2° S a 8 ° S). Este padrão se repete também nas Figuras 20 e 21, que são as correções realizadas nos dados brutos do modelo.

Para correção do modelo, foram feitas algumas regressões simples para se encontrar o melhor ajuste que se aproximasse dos resultados observados. A regressão mais simples primeiramente testada foi uma regressão linear cuja formula é:

$$Rad = (rshort - 129,33) / 0,7132 \quad (5.1)$$

Onde *Rad* é a radiação solar corrigida e *rshort* é o nome da variável do modelo RAMS que representa a radiação solar de ondas curtas que chega á superfície. O motivo desta correção não ser utilizada se deve ao fato de que esta correção subestima os valores mínimos, por exemplo, a média mensal para o mês de Junho foi de somente 80 W/m² que é muito abaixo da média observada para este mês.

Uma outra relação é apresentada no Gráfico 8. A função que relaciona a correção de potência é:

$$Rad = 0,7109 \cdot rshort^{1,0141} \quad (5.2)$$

Na Figura 20 pode ser visto os mapas de contorno para cada mês usando essa correção de potência. Note que os padrões são em geral semelhantes aos da Figura 19, já que a correção de potência é função da radiação calculada pelo modelo (*rshort*), porém os valores são diferentes.

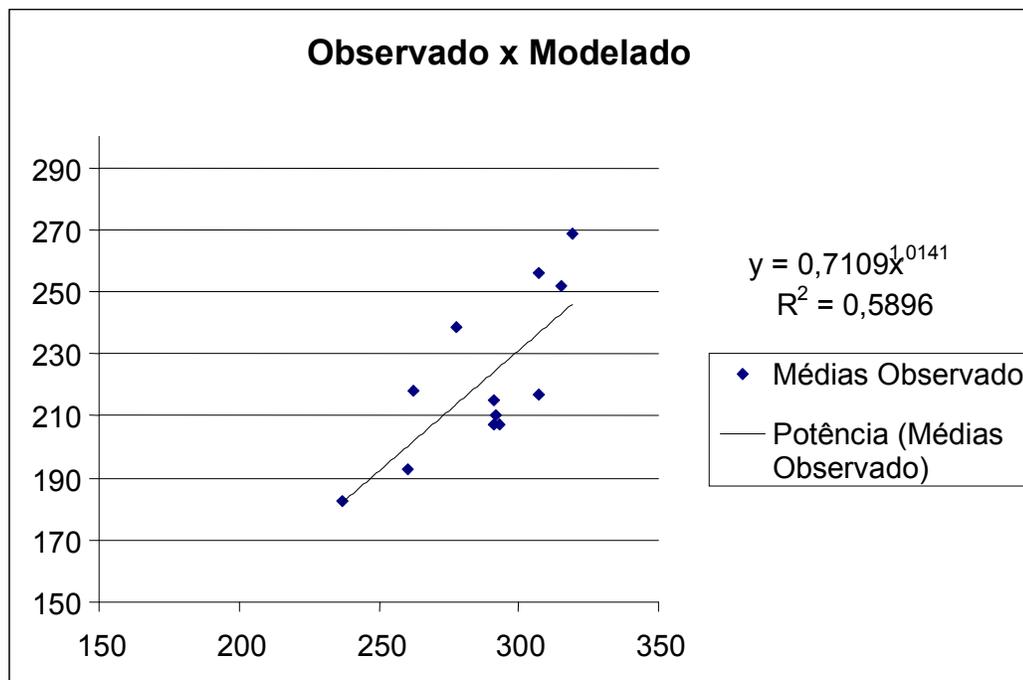
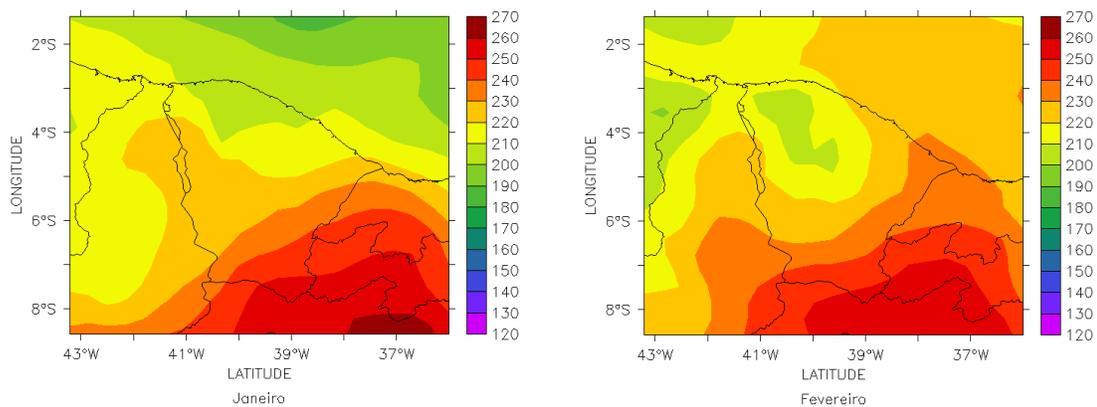
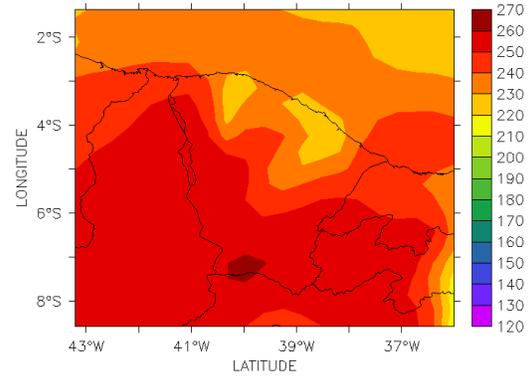
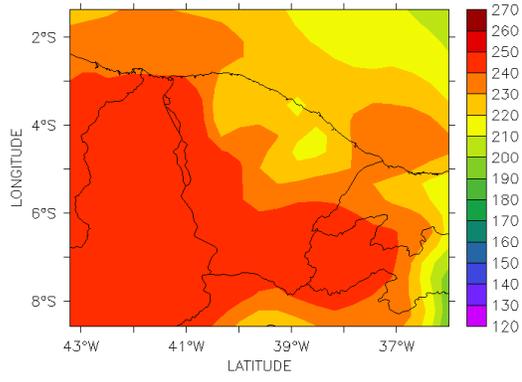
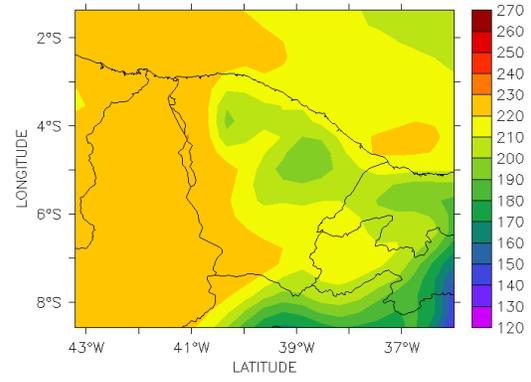
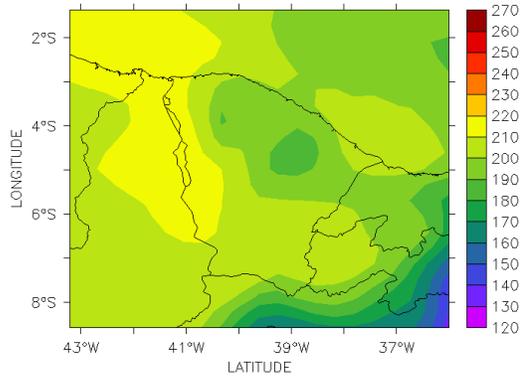
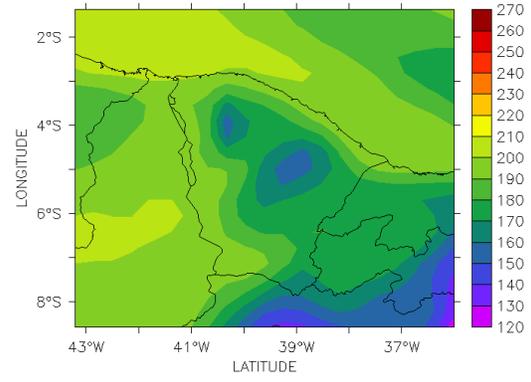
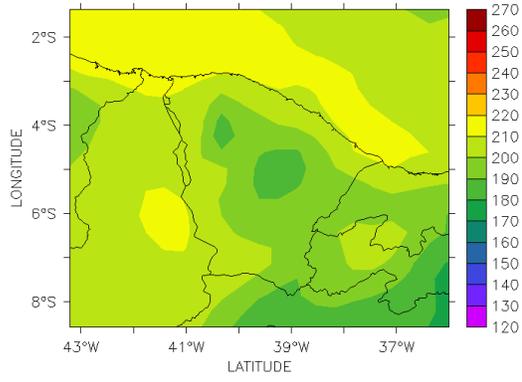
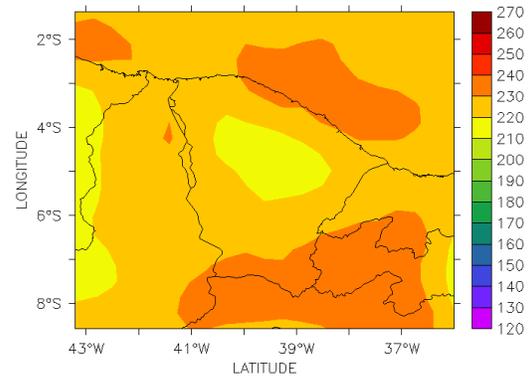
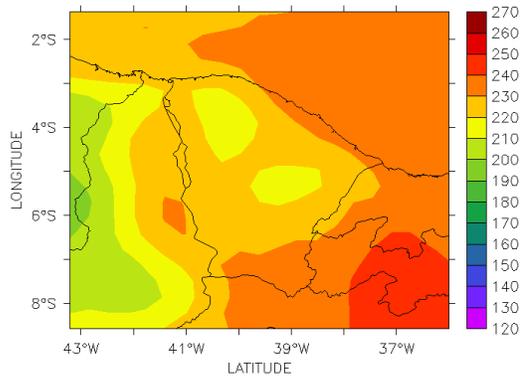


Gráfico 8 – Regressão de potência entre a radiação solar modelada e observada.





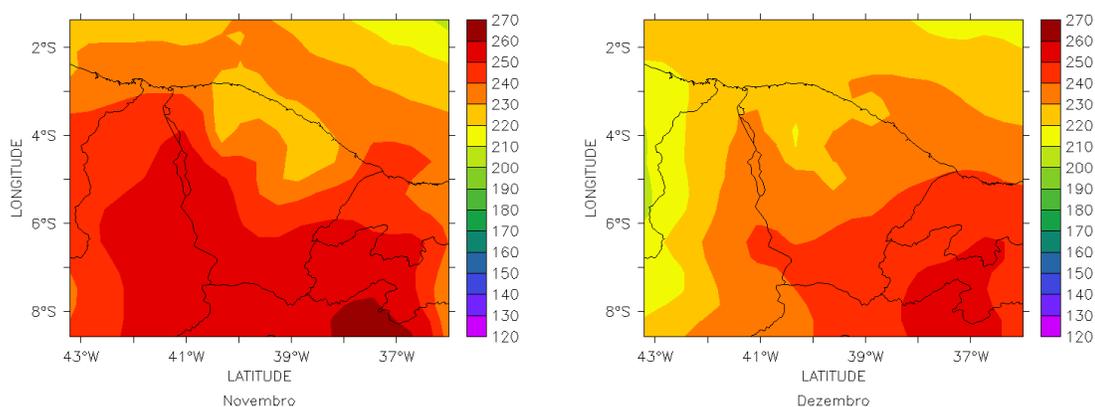


Figura 20 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, corrigida através de regressão de potência entre modelado e observado.

Verificou-se ainda que existe uma forte relação entre a fração de cobertura de nuvens calculada pelo modelo e a razão entre a radiação observada e no topo da atmosfera (*TOA*, sigla em inglês), como mostrado no Gráfico 9. O modelo RAMS calcula a fração de cobertura de nuvem como sendo a porcentagem da área de uma caixa de grade usada na simulação que está coberta por nuvens. A radiação no topo da atmosfera (*TOA*) foi calculada através da fórmula:

$$TOA = S \cdot \left(\frac{AU}{r} \right)^2 \cdot \cos z \quad (5.3)$$

Onde S é a constante solar, AU é a unidade astronômica, r é a distância “instantânea” Terra-Sol e $\cos z$ é o cosseno do ângulo zenital.

A função linear que relaciona estas variáveis é:

$$Rad = (-0,6859 \cdot Nuvem + 0,69) \cdot TOA \quad (5.4)$$

Onde Rad é a radiação solar incidente, $Nuvem$ é a fração de cobertura de nuvem.

Os mapas de contorno para esta correção são apresentados na Figura 21.

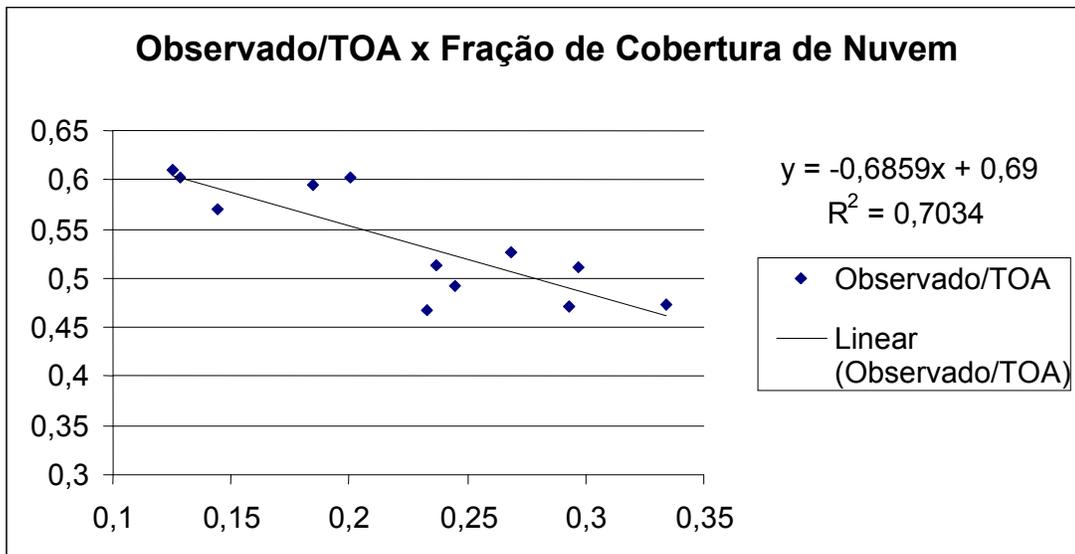
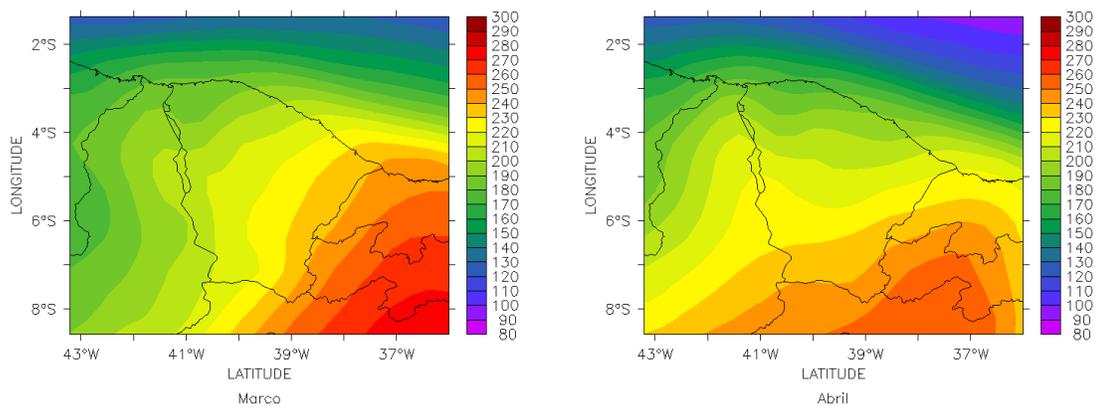
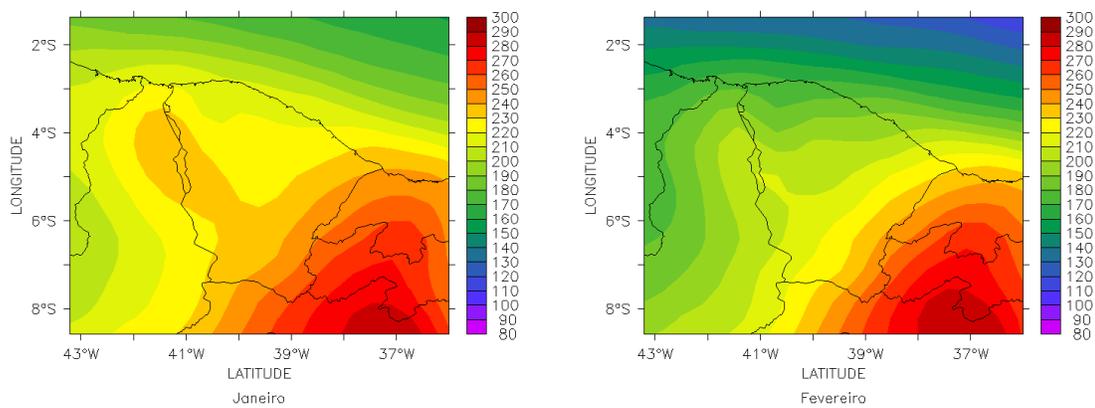
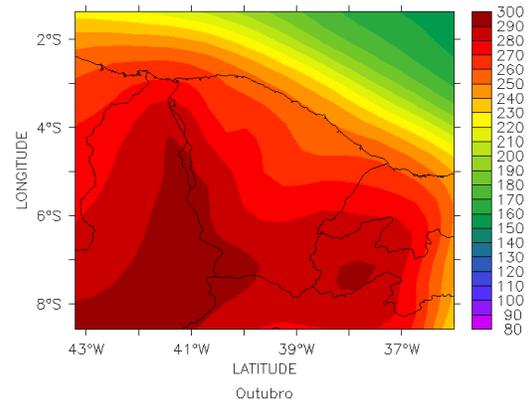
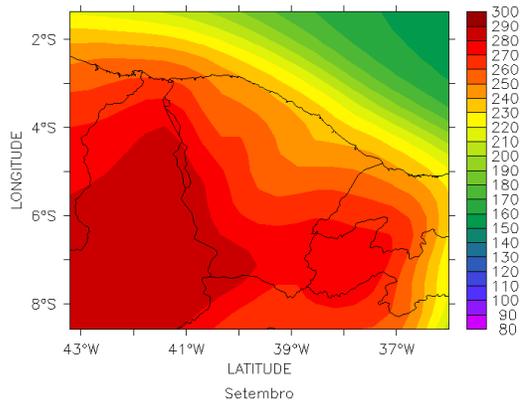
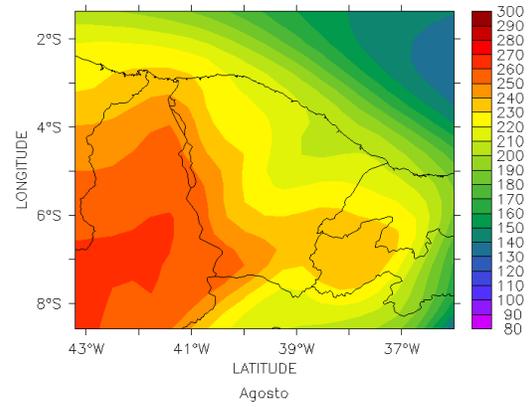
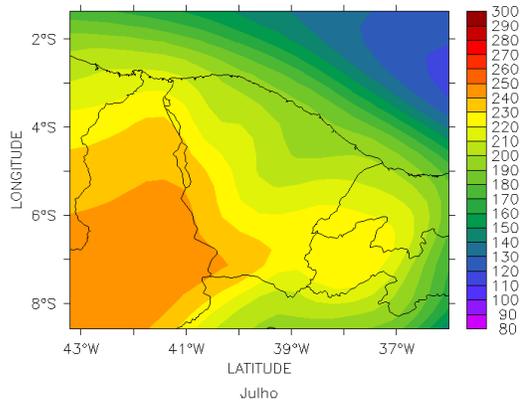
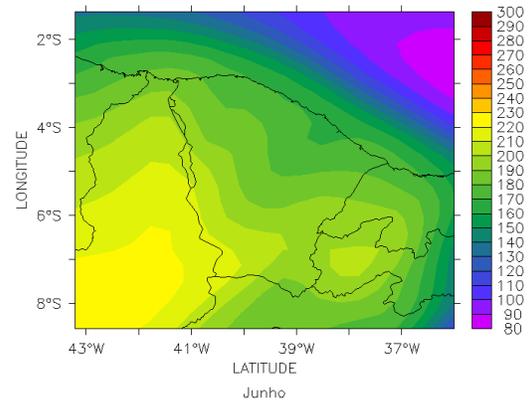
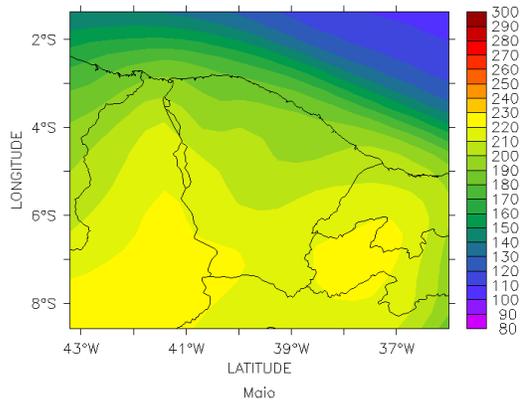


Gráfico 9 – Regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada / radiação no topo da atmosfera.





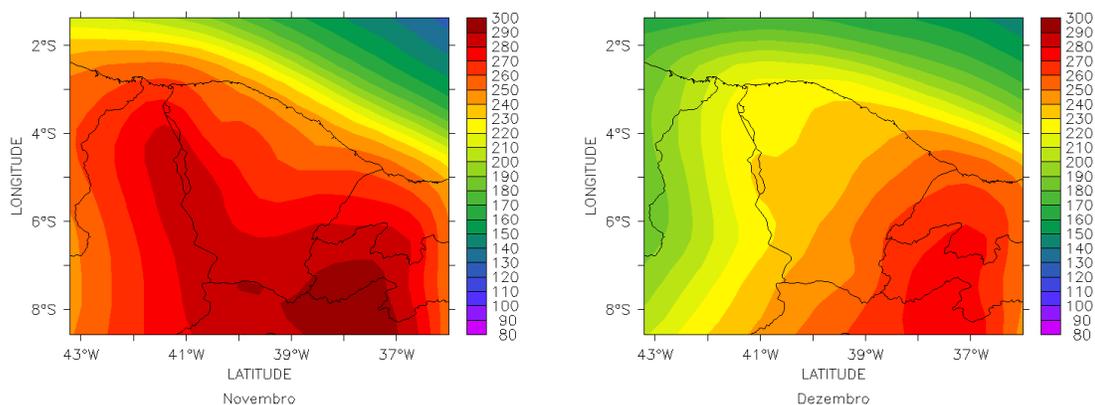


Figura 21 – Média mensal de uma área sobre o Ceará, corrigida através de regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada sobre a radiação no topo da atmosfera.

Esta correção foi a que melhor representa a radiação solar incidente na superfície comparada com dados observados (veja Tabela 5), por este motivo na Figura 22 é mostrado a média anual, usando a correção de cobertura de nuvens, para melhor compreensão da Figura 21.

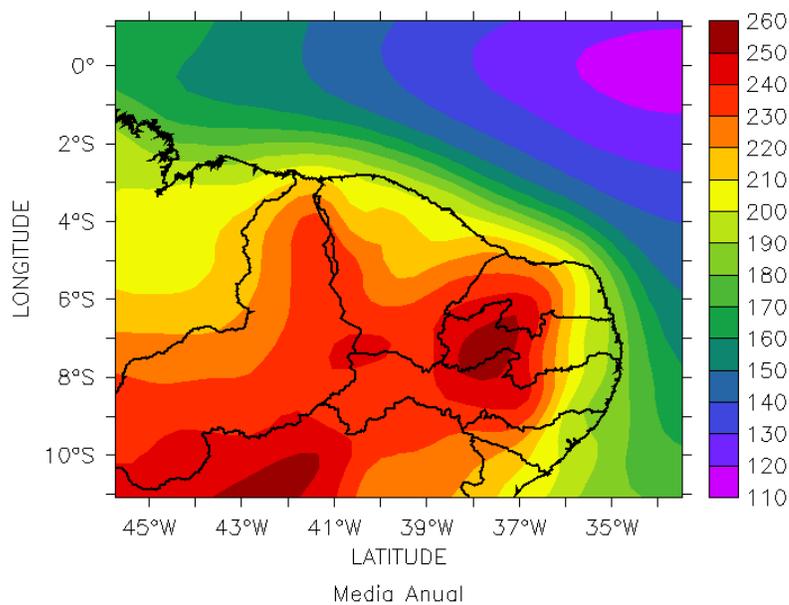


Figura 22 – Média anual corrigida através de regressão linear entre a fração de cobertura de nuvem e a razão entre a radiação observada sobre a radiação no topo da atmosfera.

O Gráfico 10 apresentado a seguir mostra uma comparação entre as médias mensais para a radiação solar observada, modelada e as correções realizadas. Note que ambas as correções utilizadas (de potência e de cobertura de nuvem) apresentam-se bem próximas da curva da radiação observada pelas PCDs, embora a correção utilizada para o caso de cobertura de nuvens apresente uma correlação maior. Os intervalos de confiança para a correção utilizando a cobertura de nuvens é da ordem de $\pm 13,5 W / m^2$.

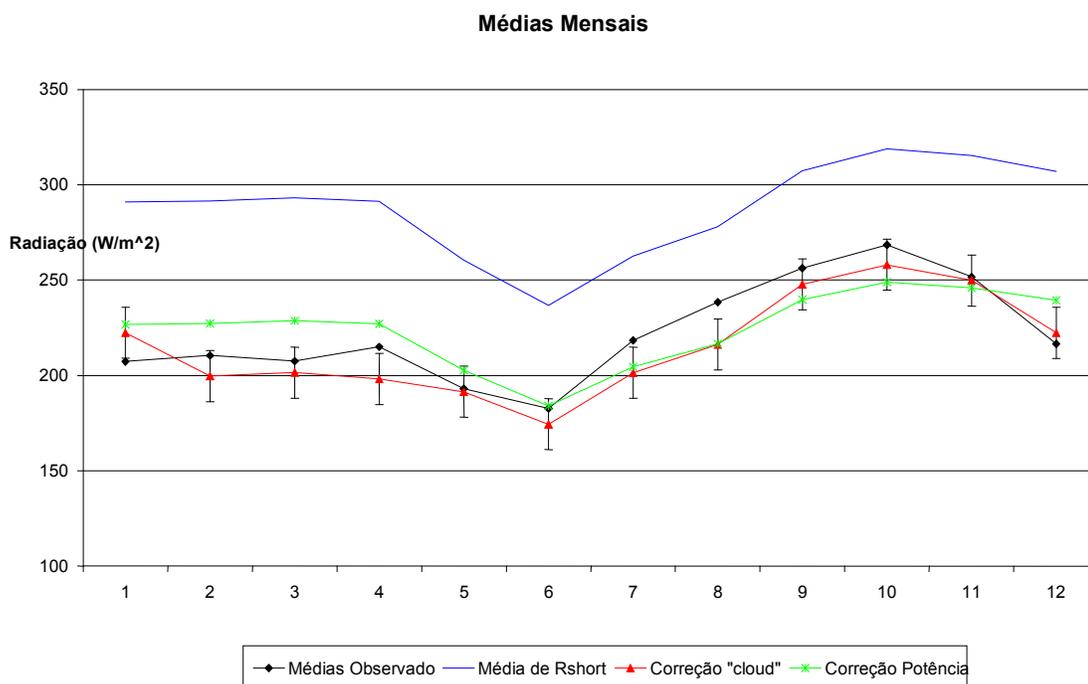


Gráfico 10 – Comparação entre as radiações observadas, modeladas e corrigidas. O intervalo de confiança para a correção “cloud” é de $\pm 13,5 W/m^2$.

A Tabela 5 apresenta uma relação da correlação entre a radiação observada e as correções realizadas. A correlação entre a radiação solar observada e o resultado do modelo (*rshort*) é igual às regressões linear e muito próxima da correção de potência, pois estas são funções de *rshort*. O ajuste utilizando a cobertura de nuvens e a razão entre radiação observada e radiação no topo da atmosfera apresenta a maior correlação e menor erro quadrático médio entre todas as correções, sendo portanto a correção adotada.

Tabela 5 – Correlações entre as correções utilizadas e erro quadrático médio.

Correlações:	R	R²	Erro Quadrático Médio
Observado x “Cloud”	0,9219	0,7034	12
Observado x Potência	0,7615	0,5797	16,39
Observado x Linear	0,7614	0,5797	21,33
Observado x Rshort	0,7614	0,5797	67,74

Foram calculados também os erros absolutos entre as séries modeladas e observadas para todas as PCDs analisadas e feita uma distribuição de frequência destes erros, mostrado no Gráfico 11.

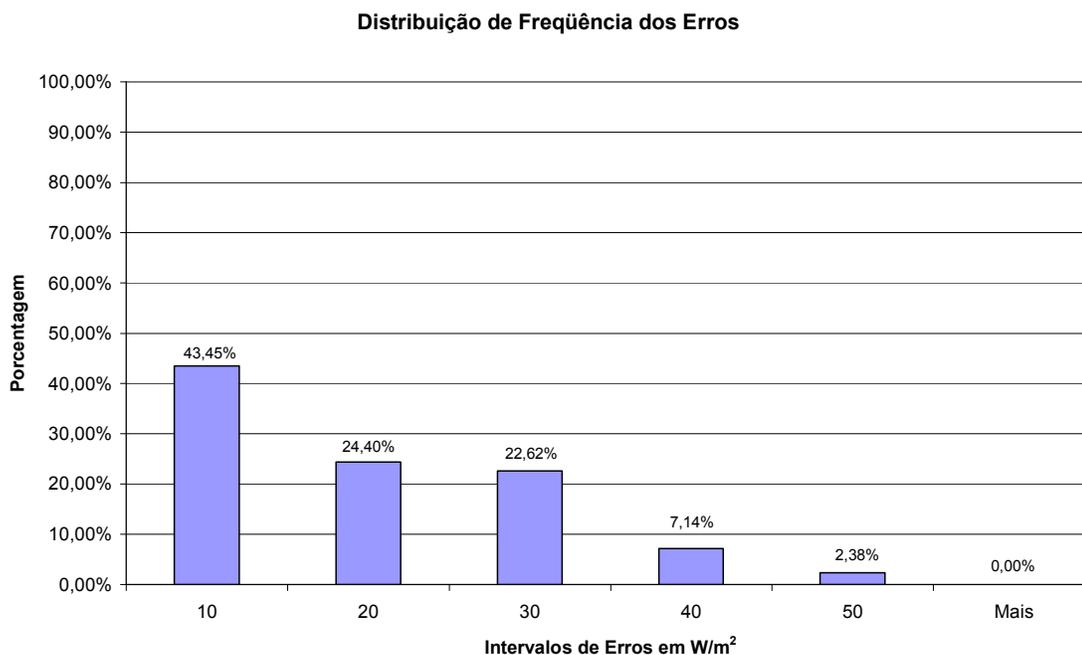
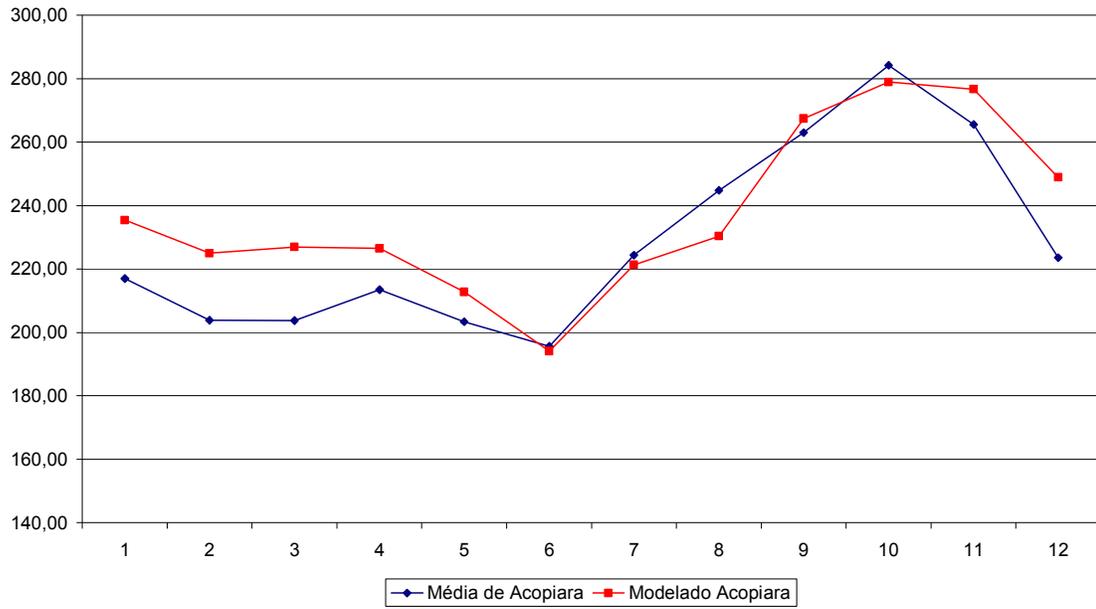


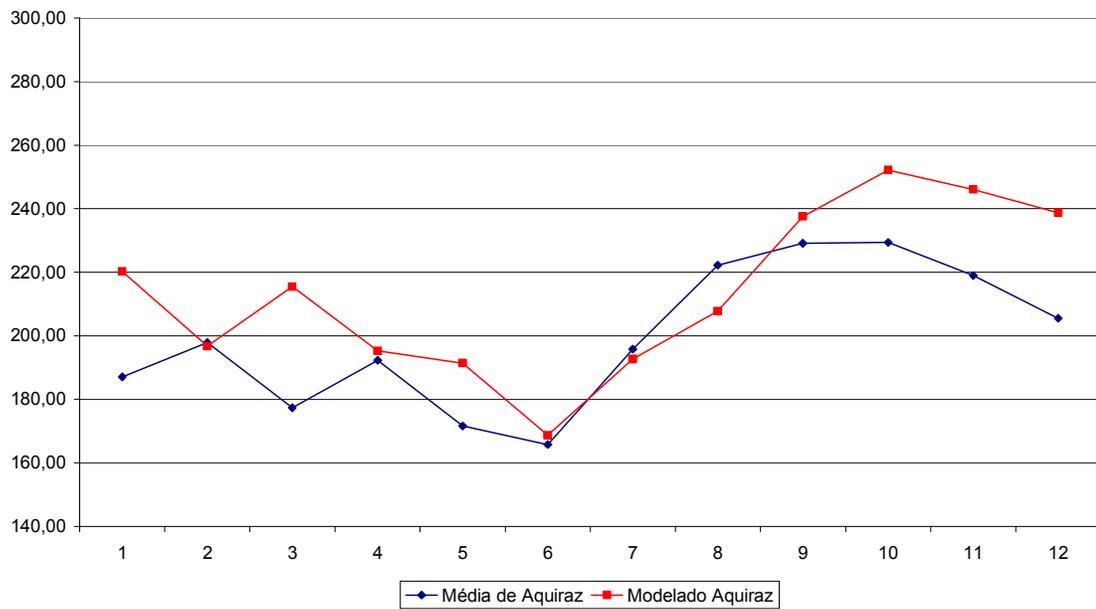
Gráfico 11 – Gráfico de distribuição de frequência dos erros absolutos entre as séries modeladas e observadas.

No Gráfico 12 foi feita uma comparação entre o resultado da correção de cobertura de nuvem com cada uma das 14 PCDs analisadas. Note que em quase todos os gráficos há boa concordância, principalmente durante o segundo semestre do ano.

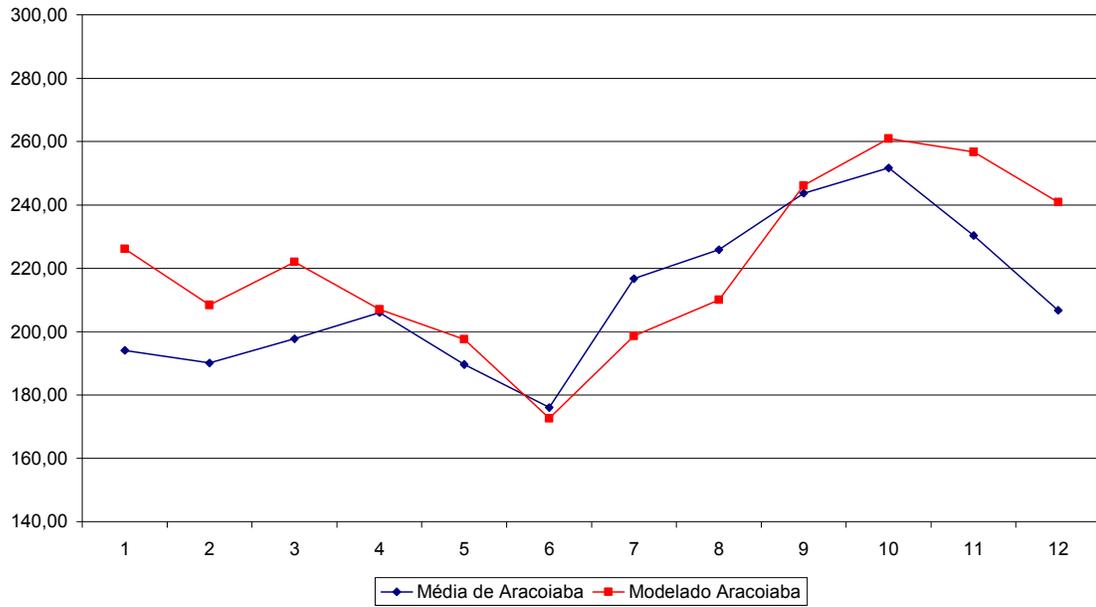
Acopiara



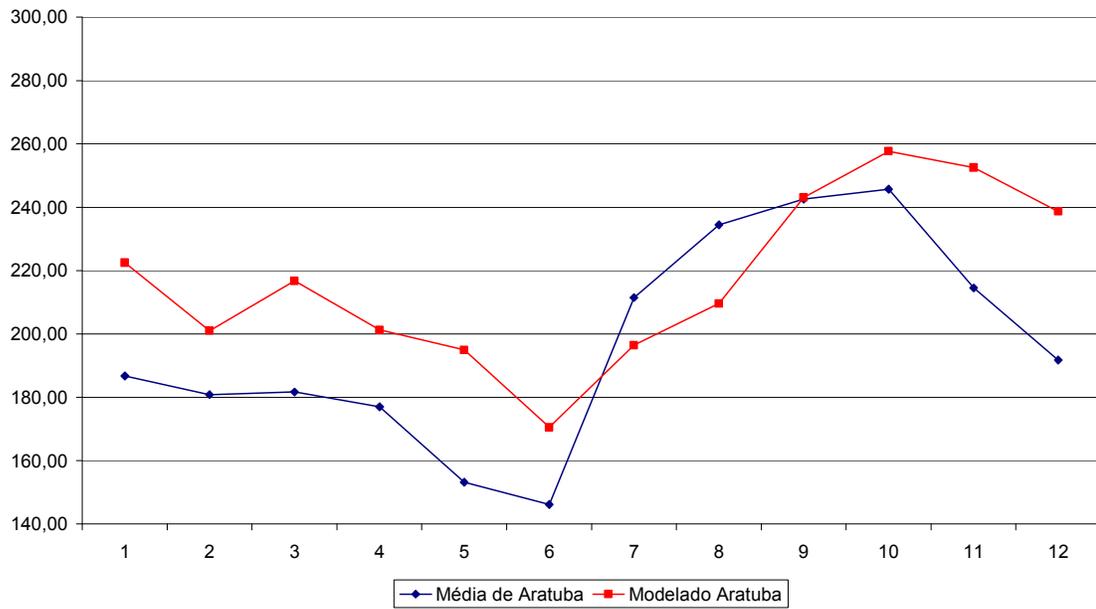
Aquiraz



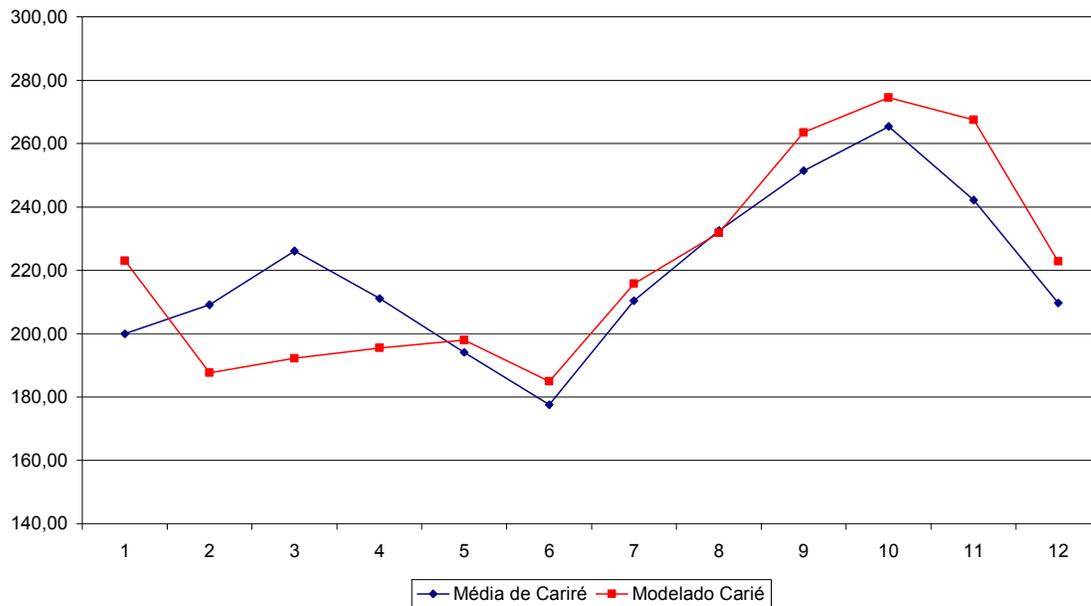
Aracoiaba



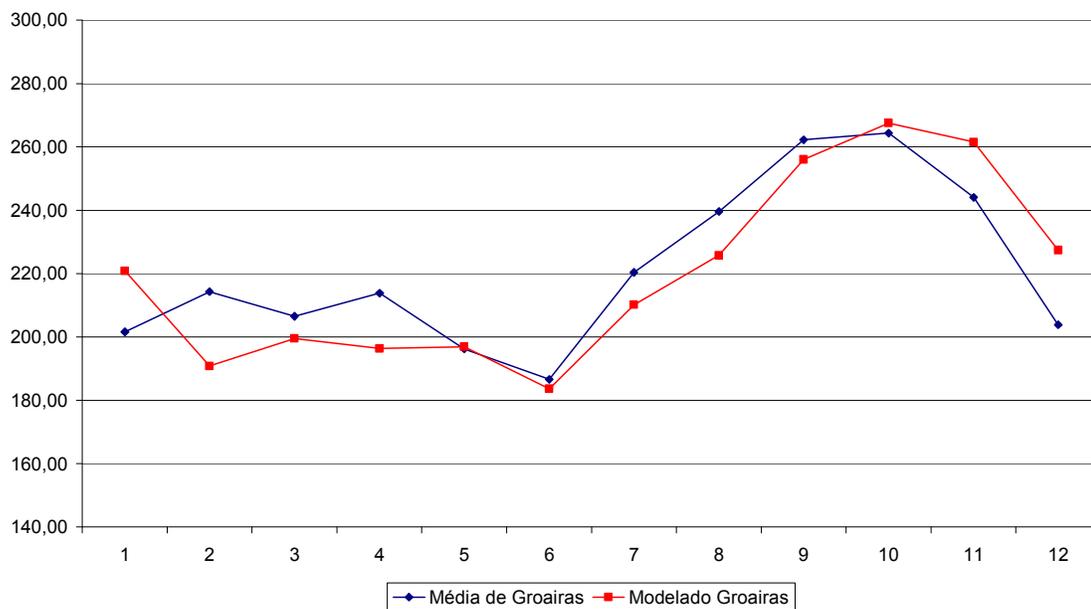
Aratuba



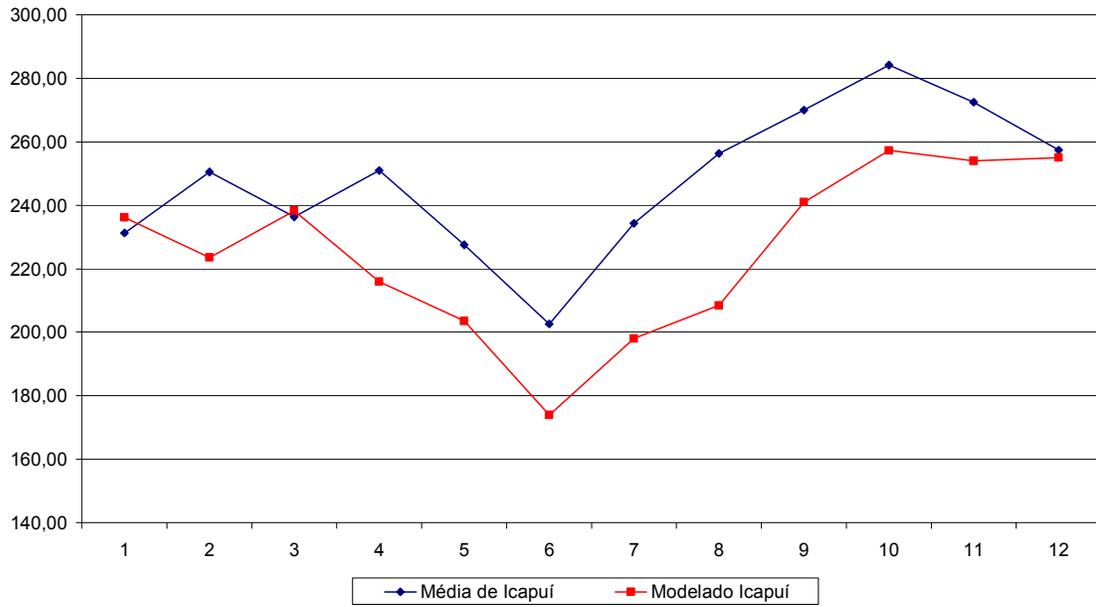
Cariré



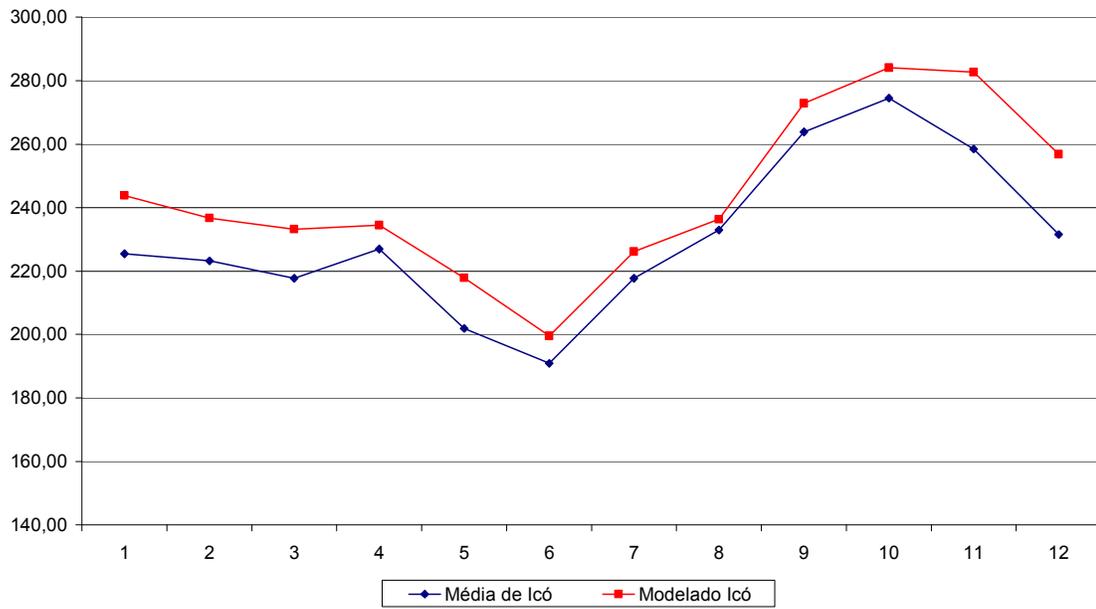
Groairas

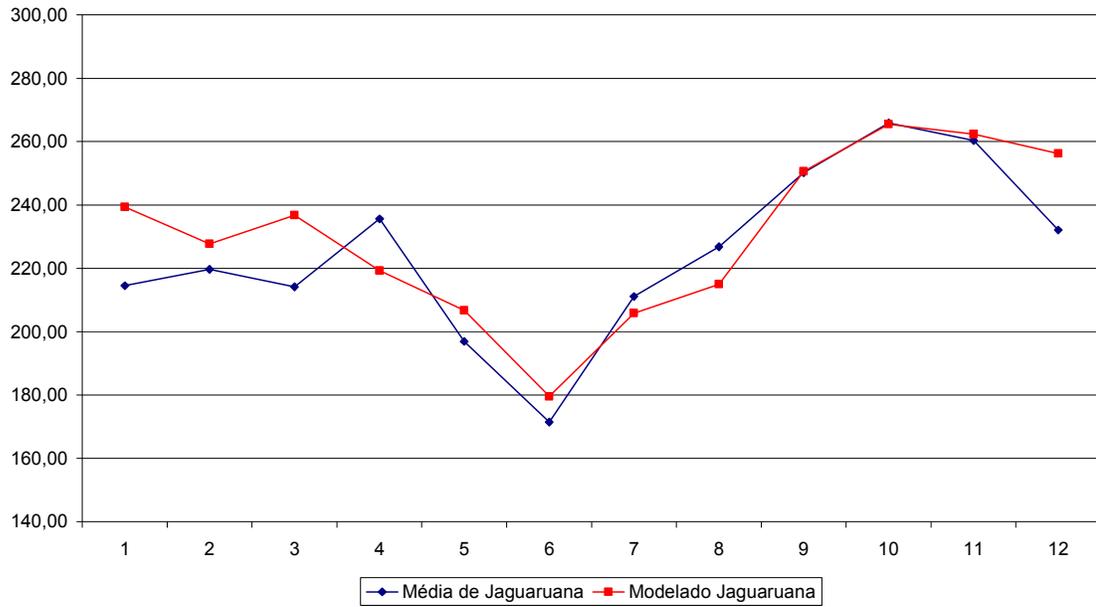
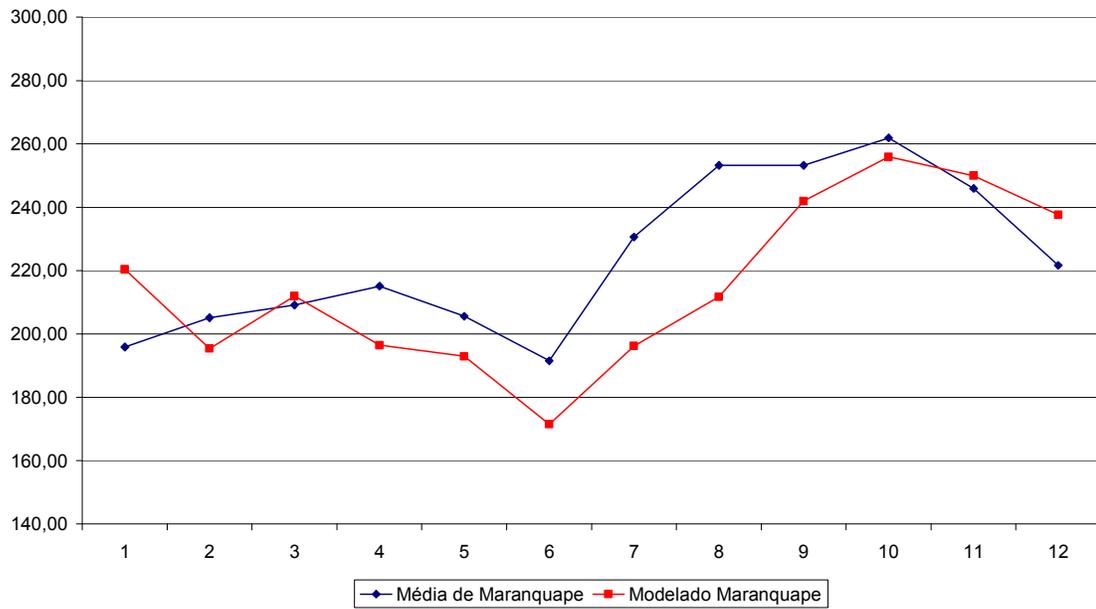


Icapuí

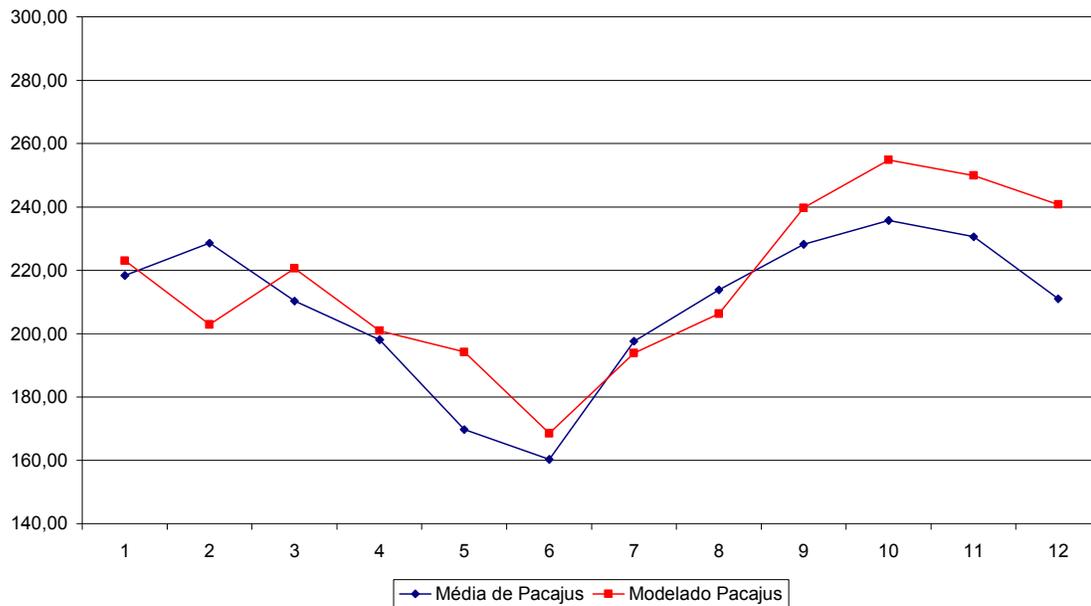


Icó

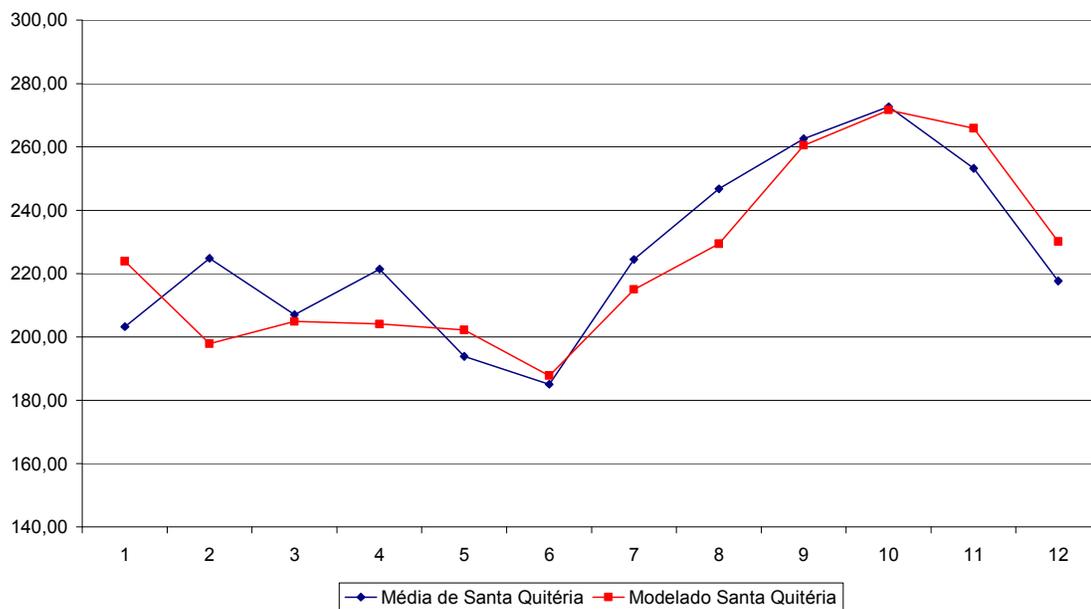


Jaguaruana**Maranquape**

Pacajus



Santa Quitéria



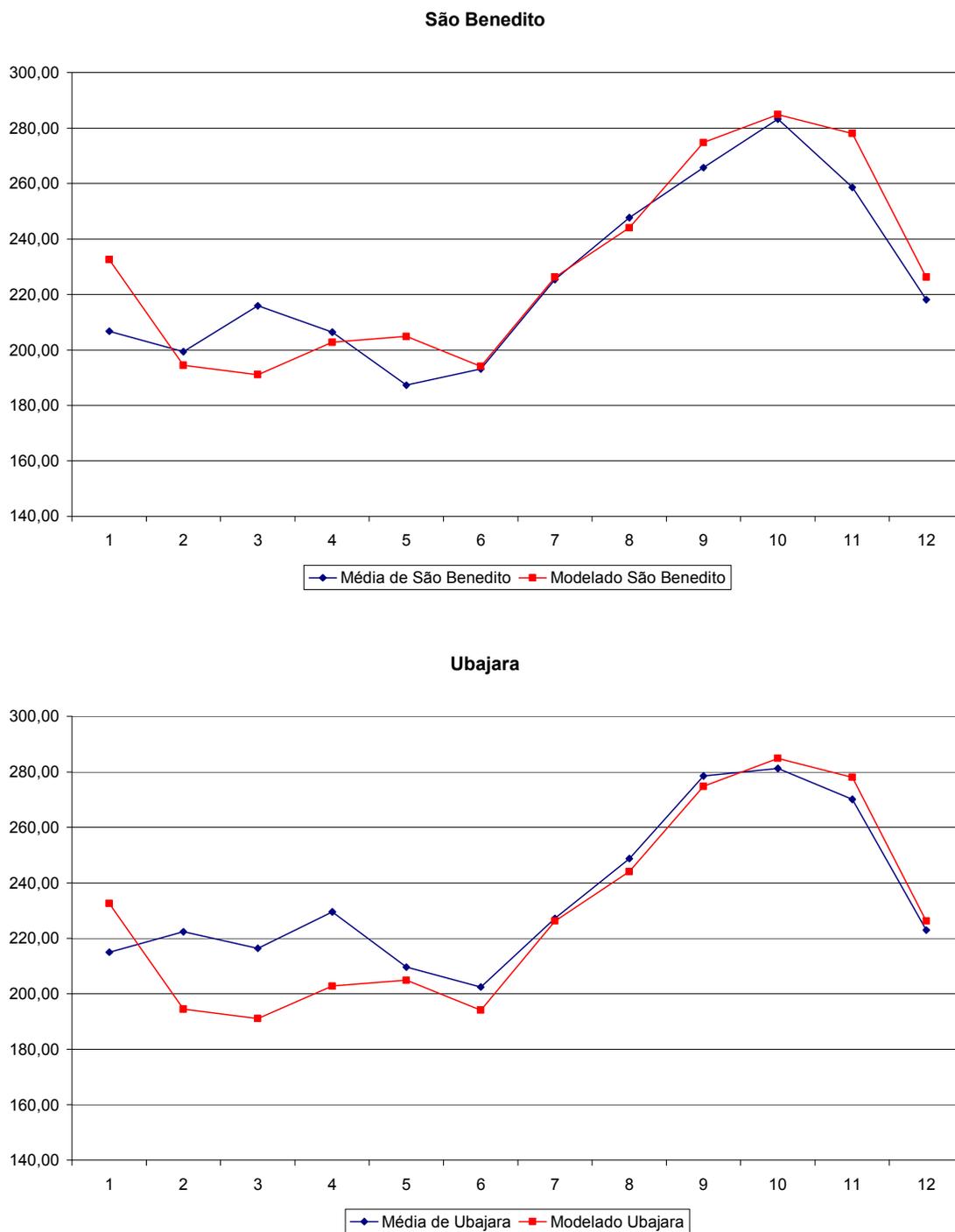


Gráfico 12 – Comparação entre a correção de cobertura de nuvem e a radiação solar incidente observada para cada PCD analisada.

Foi feita ainda uma comparação destes resultados obtidos através do modelo RAMS com os resultados obtidos através do projeto SWERA, que foi responsável pela cria-

ção do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Segundo os resultados do SWERA a média anual da radiação solar incidente sobre o Brasil é da ordem de $5,5KW \cdot m^{-2} / dia$. A Tabela 6 mostra as médias anuais para os resultados das correções já com as devidas transformações de unidades.

Tabela 6 – Médias anuais, em W / m^2 e $KW \cdot m^{-2} / dia$.

Médias anuais:	W / m^2	$KW \cdot m^{-2} / dia$
Observado	222,18	5,33
Modelado	287,71	6,90
Correção "Cloud"	215,35	5,16
Correção Linear	222,53	5,34
Correção Potência	224,29	5,38

Embora os resultados sejam próximos, vale ressaltar que a média anual obtida pelo projeto SWERA é para o todo o território Brasileiro enquanto as médias anuais obtidas na Tabela 6 são apenas para a região centrada sobre o estado do Ceará (a mesma área das Figuras 18, 19 e 20). Esta comparação foi feita para verificarmos que a metodologia apresentada está coerente com os valores de radiação solar incidente produzido por outras metodologias.

5.3 ESTUDO NUMÉRICO DA VARIABILIDADE INTERANUAL DA RADIAÇÃO SOLAR À SUPERFÍCIE ASSOCIADA A EVENTOS DE EL NIÑO E LA NIÑA.

Com o intuito de conhecer melhor a variabilidade da radiação solar incidente na superfície, foram simulados com o modelo RAMS os anos de 1974 e 1982 onde ocorreram eventos de La Niña e El Niño, respectivamente. Foram escolhidos estes dois eventos, pois eles caracterizam situações atmosféricas bem distintas, ora favorecendo chuva, ora favorecendo seca no Nordeste do Brasil. Os fenômenos de El Niño e La Nina acarretam alterações no clima em todo o planeta. Sabe-se que o El Niño é um fenômeno de interação atmosférico-oceânica, que está relacionado ao comportamento anômalo da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios no Pacífico Equatorial e que seus efeitos atingem o clima em

escala global (Oliveira, 2003). Em particular, o Nordeste do Brasil é afetado por esses fenômenos, devido às alterações nos padrões da circulação geral da atmosfera, conforme descrito por Hastenrath, 1984, 1990. No ano de 1982 houve um El Niño forte, que acarretou seca para o Nordeste e para o ano de 1974 houve uma La Niña forte, e este fenômeno acarretou chuvas acima da média para o Nordeste.

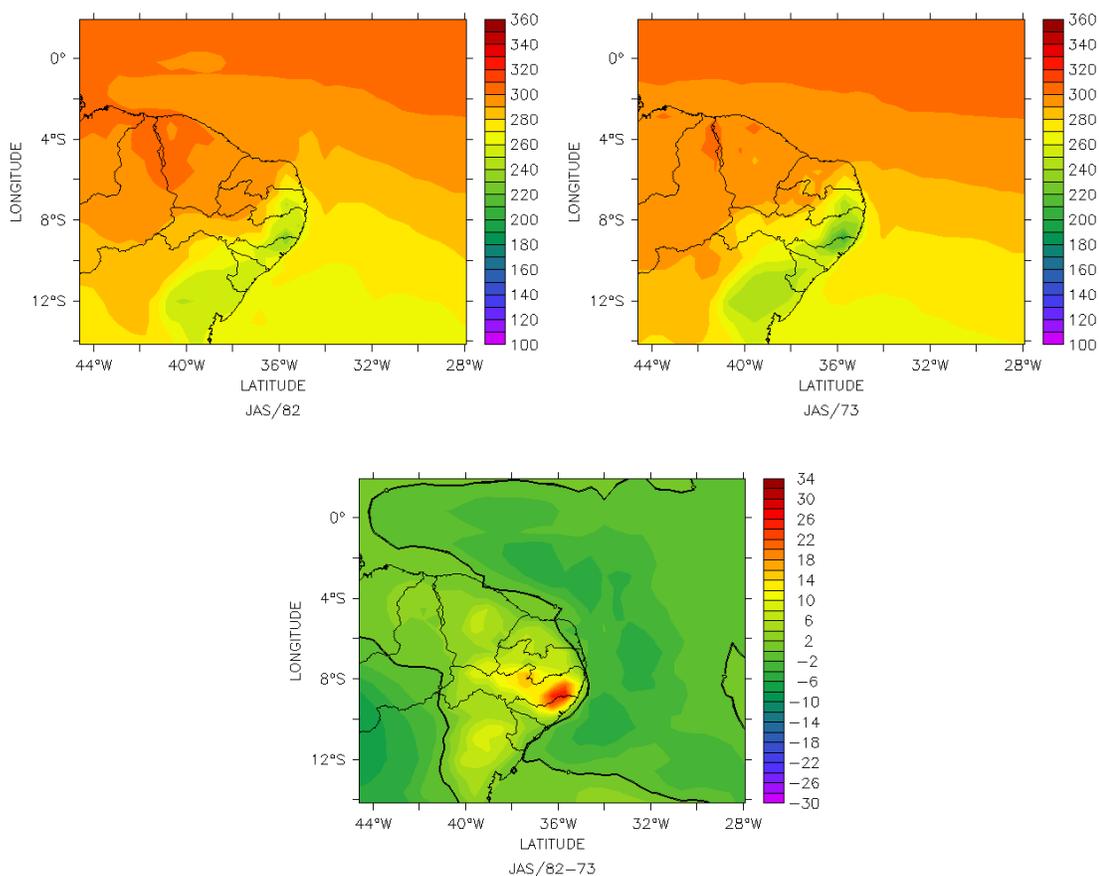
Como os períodos de La Niña são os que apresentam maior precipitação, os valores das médias da radiação solar incidente são inferiores aos períodos de El Niño onde ocorreu precipitação abaixo da média.

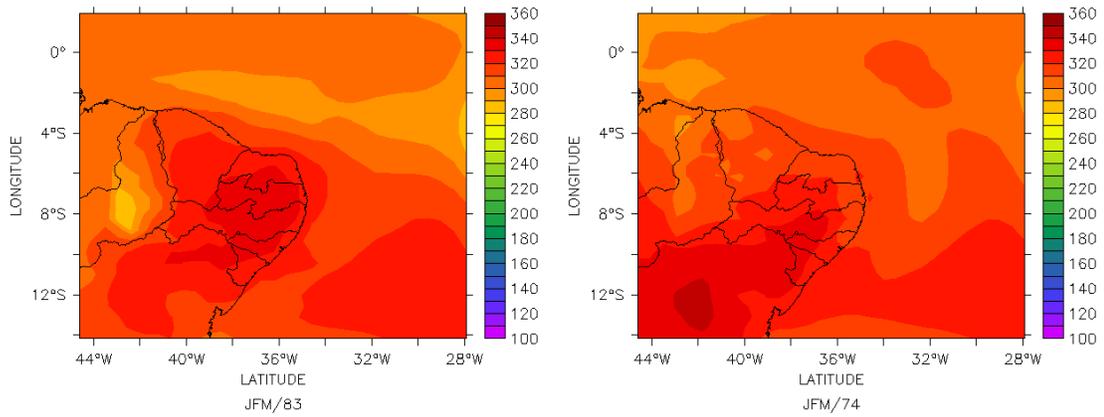
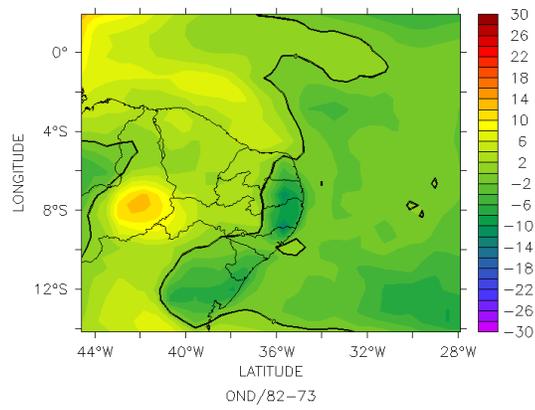
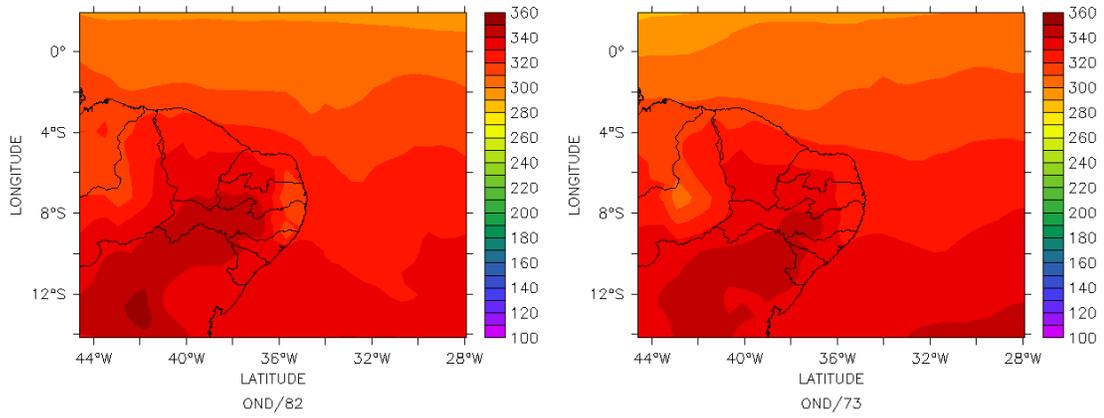
Para estas simulações foram usadas as seguintes configurações (Menezes, 2006):

- Período da Simulação:
 - De Julho de 1973 a Junho de 1974 (La Niña);
 - De Julho de 1982 a Junho de 1983 (El Niño).
- Dados do Modelo Global: Reanálise do NCEP/NCAR.
- Parametrizações Utilizadas:
 - Convecção: Kuo;
 - Turbulência: Mellor & Yamada;
 - Radiação: Harrington;
 - Microfísica Especificada.
- Duas grades horizontais aninhadas:
 - Grade Maior: 40 pontos com 60 km de espaçamento (total de 2400 km de lado);
 - Grade Menor: 50 pontos com 20 km de espaçamento (total de 1000 km de lado);
 - Nudging de 1200s nas laterais e de 86400s no centro.
- Grade vertical:

- 39 pontos;
- Altitude de aproximadamente 24 km (começo da estratosfera);
- Nudging vertical a 17 km com tempo de 43200s.

Para visualizar melhor a diferença entre os dois fenômenos, tomamos a média trimestral e realizamos a diferença entre os dois casos. Na Figura 23 vemos, para a primeira grade do modelo, as médias trimestrais da radiação solar modelada para o período de Julho à Junho para os anos de 1982-83 (esquerda) e 1973-74 (direita). Vemos ainda a diferença entre as médias trimestrais (centro).





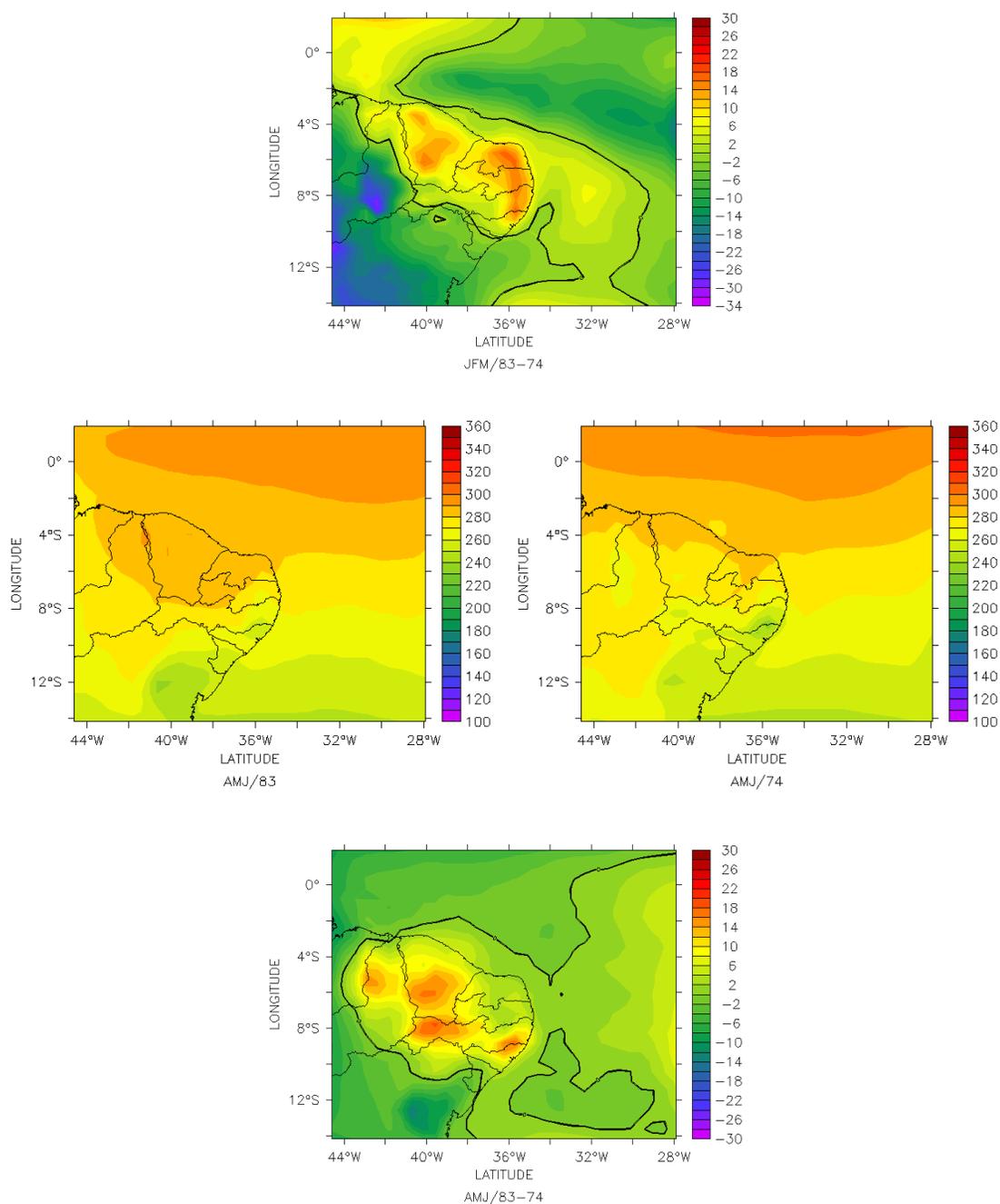
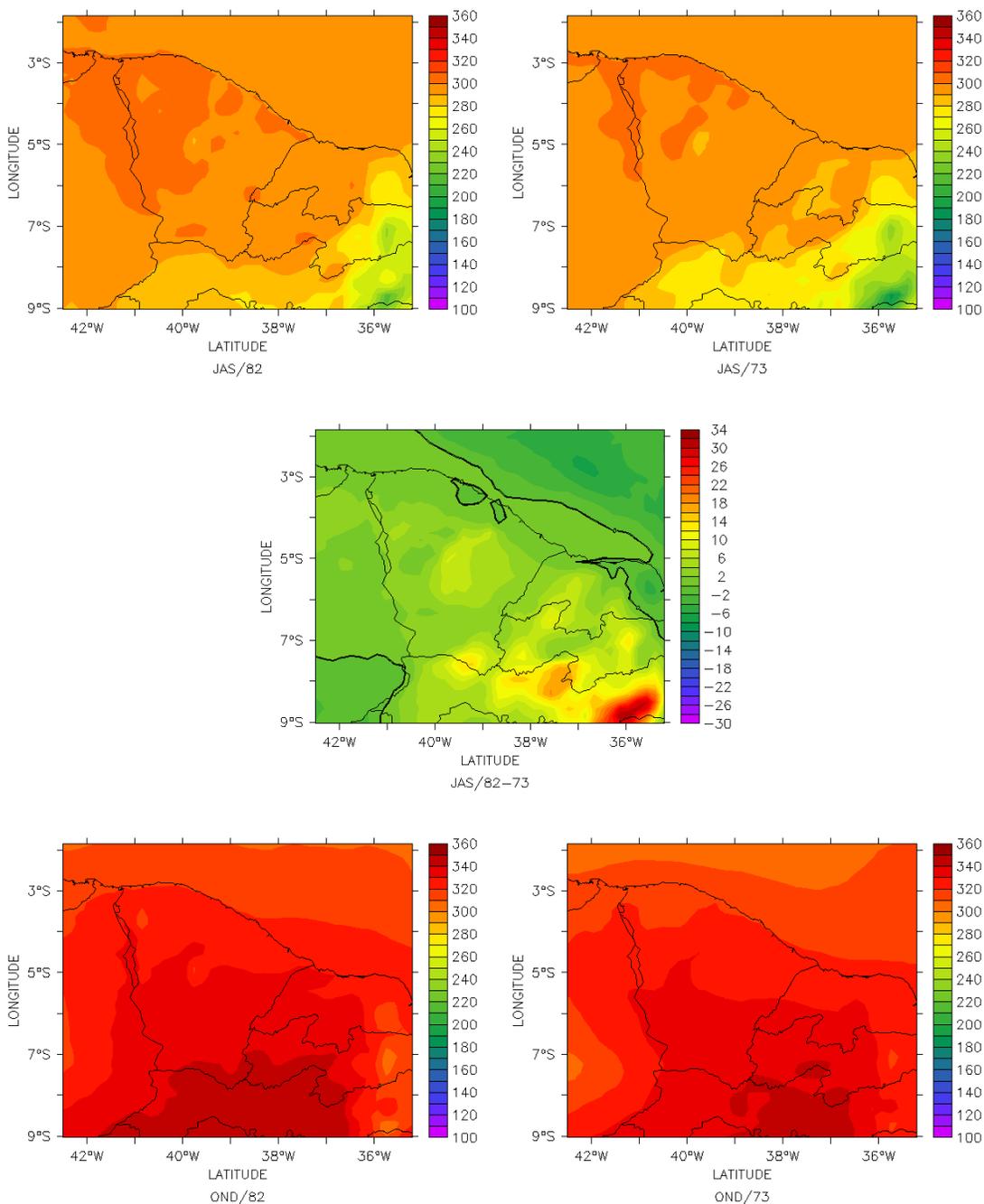
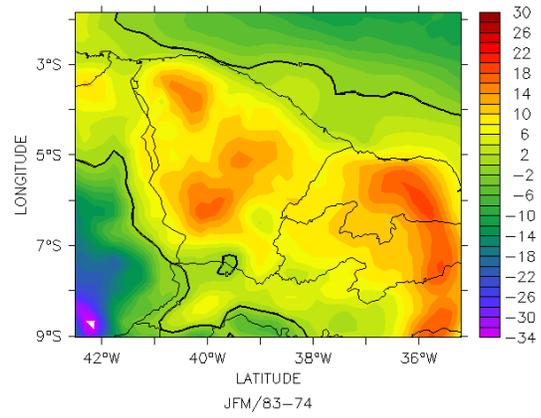
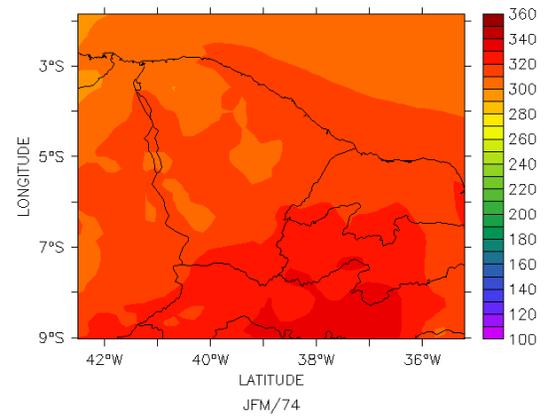
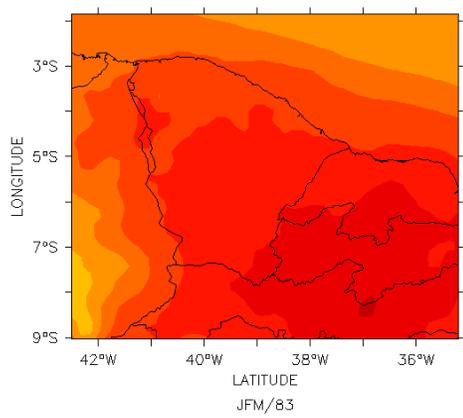
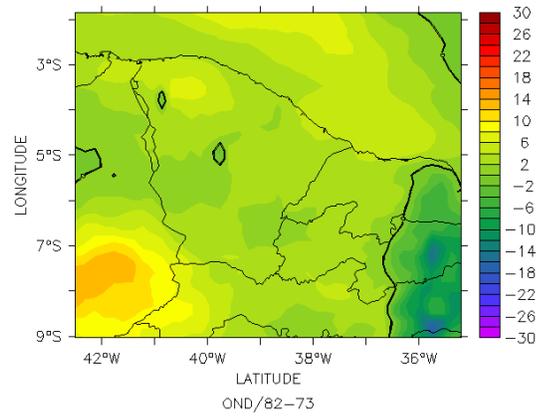


Figura 23 – Médias trimestrais da radiação solar incidente para casos de El Nino (esquerda) e La Nina (direita) e as diferenças entre estes fenômenos (centro), na primeira grade da simulação.

A diferença entre as médias mostrada na Figura 23 é feita de modo que os valores da média da radiação solar em casos de El Niño são subtraídos dos valores da média da radiação solar em casos de La Niña de tal forma que os valores positivos da Figura 23 (centro) re-

presentam os locais onde o El Niño favoreceu a maior incidência de radiação, devido à inibição das chuvas. Na Figura 24 são mostradas as mesmas médias que na Figura 23, porém para a segunda grade da simulação.





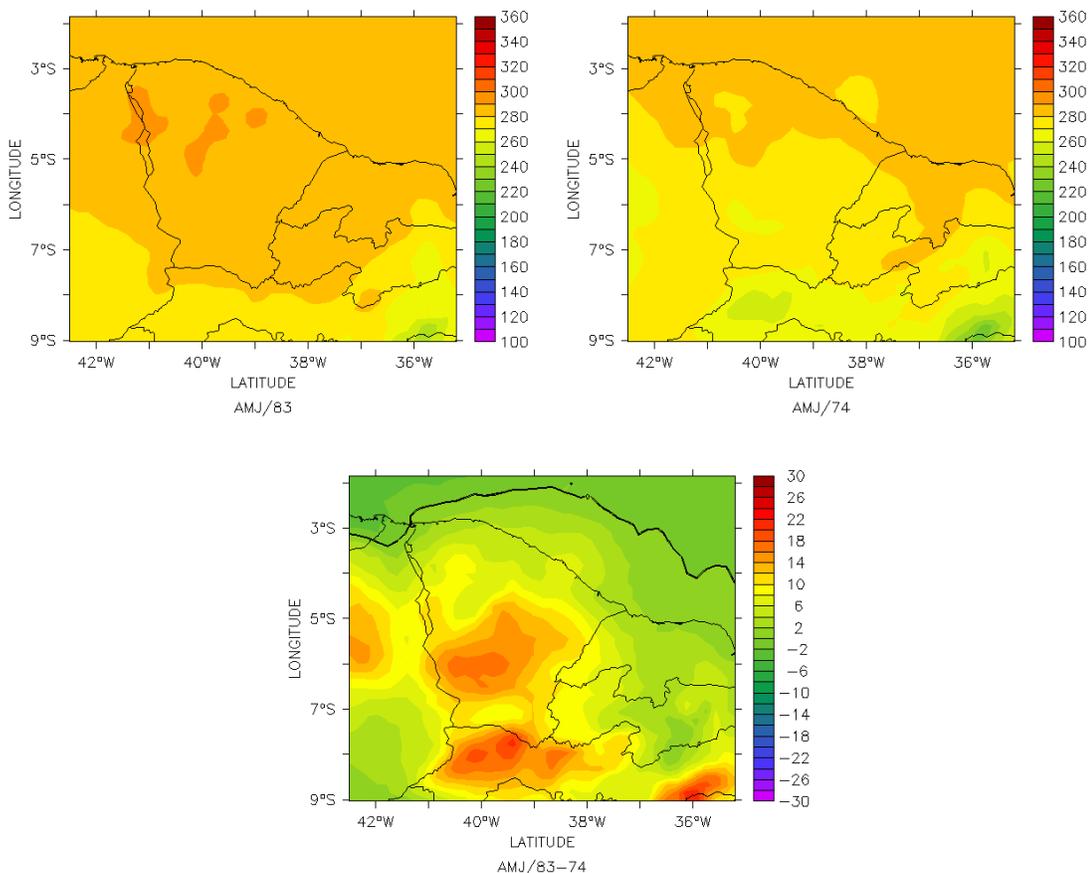


Figura 24 – Mesmo que na Figura 23, porém para segunda grade da simulação.

A área da segunda grade foi refinada para que os valores das médias não sofressem influência das bordas da grade e de modo a representar melhor o estado do Ceará. A área selecionada compreende as regiões 4°S a 6°S e 38°30'W a 40°30'W. Para verificarmos a variação entre um evento e outro, foram feitos gráficos das médias mensais assim como um gráfico contendo a média móvel para os dois períodos selecionados e a diferença entre essas médias móveis. Note que há uma diferença entre os cálculos feitos para se gerar as Figuras 23 e 24 e o Gráfico 13, pois para as figuras temos que a média é temporal no período de um trimestre, já para os gráficos foi feita uma média espacial com variação no tempo.

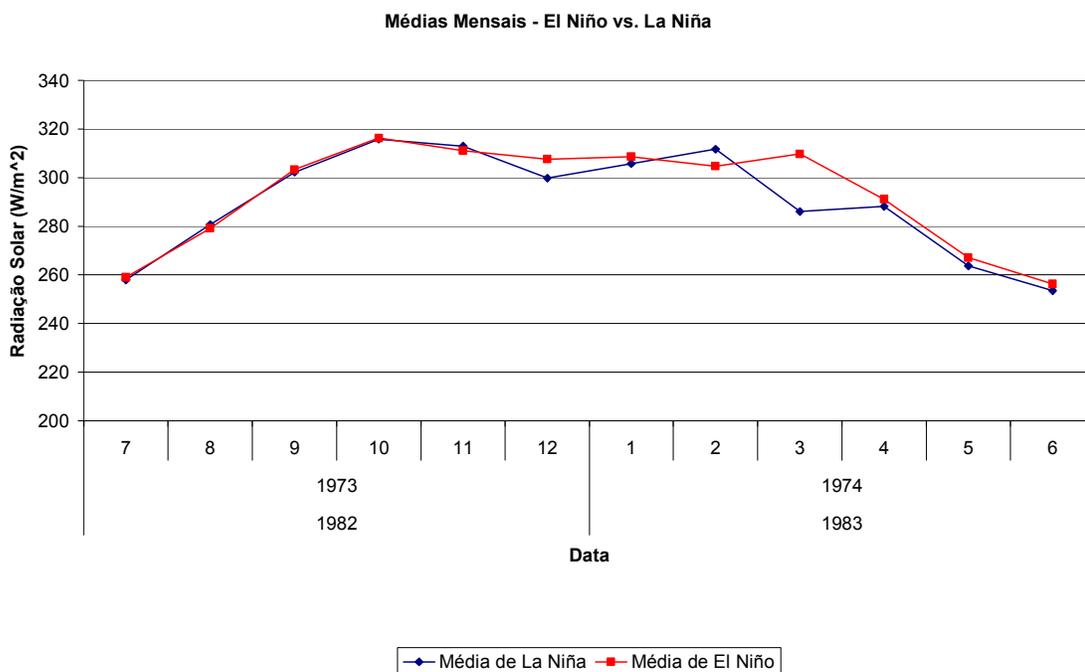


Gráfico 13: Médias mensais pra os anos de 1973-74 (La Niña) e 1982-83 (El Niño), para a segunda grade da simulação.

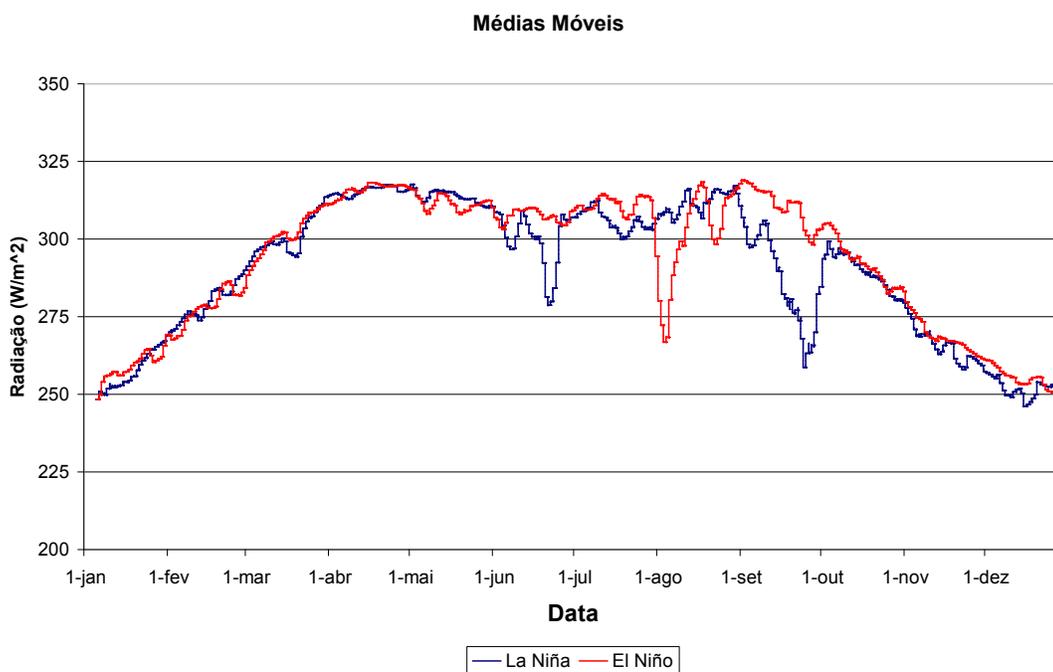


Gráfico 14: Comparação entre as médias móveis para os casos de El Niño e La Niña para a segunda grade da simulação.

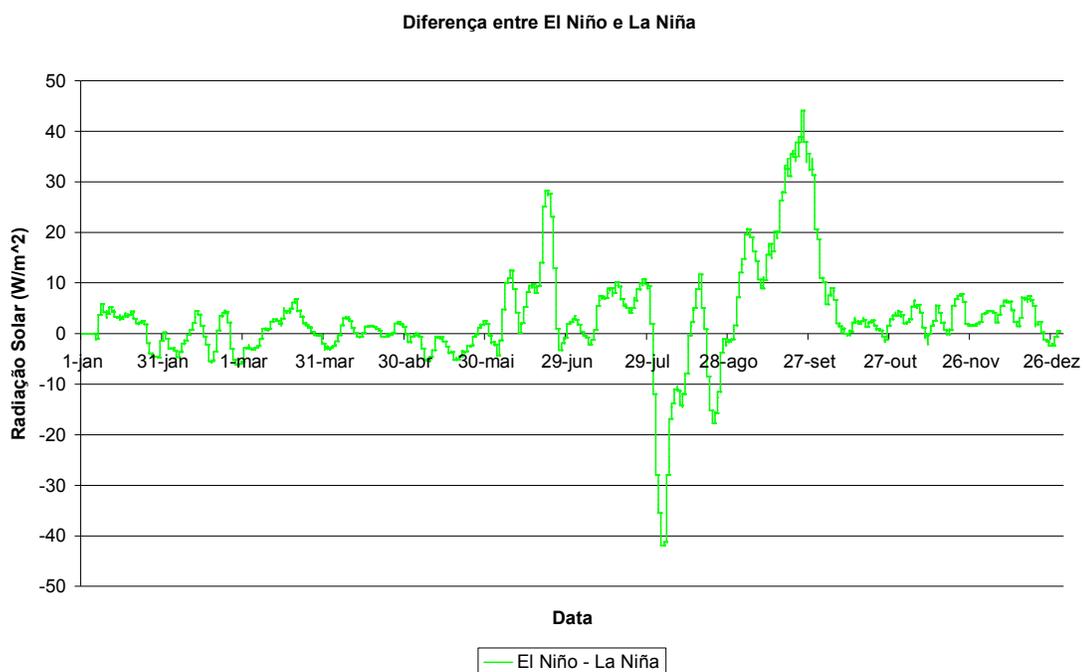


Gráfico 15: Diferença entre as médias móveis do Gráfico 12.

Pelos Gráficos 14 e 15 verifica-se que em períodos de El Niño, devido à inibição das chuvas e conseqüentemente menor ocorrência de nuvens no Nordeste do Brasil, há maior incidência de radiação solar na superfície.

6 CONCLUSÕES

No cenário atual de mudanças climáticas devido ao aquecimento global, as fontes de energias renováveis devem ser urgentemente incentivadas. Para o Nordeste do Brasil e em especial o estado do Ceará, o uso da energia solar pode ser empregado com sucesso, devido ao grande potencial existente nesta região. Entretanto, como pré-requisito para a utilização dessa fonte de energia renovável, é preciso um estudo da disponibilidade desse recurso natural.

O presente trabalho buscou apresentar uma metodologia para se estimar a quantidade de radiação solar ao nível da superfície através do modelo atmosférico de mesoescala RAMS (versão 6.0) desenvolvido pela Colorado State University, EUA. Este modelo regional é bastante utilizado e aceito dentro da comunidade científica para estimar as diversas variáveis atmosféricas, inclusive a radiação solar. Para calcular a quantidade de radiação solar, o modelo usa parametrizações físicas (que podem ser definidas pelo usuário). As parametrizações testadas foram as de Chen & Cotton, 1983 e Harrington, 1997, sendo a de Chen & Cotton escolhida, após teste de validação, para os propósitos deste trabalho.

Para validação do modelo foram usados os dados obtidos pelas Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da FUNCEME, que representa uma vasta rede espalhada por quase todo o território cearense. Baseado na quantidade de dados das PCDs, foi escolhido o ano de 2005 para realizar as simulações usando o RAMS.

Verificou-se através das simulações que o modelo apresenta erros sistemáticos, sempre superestimando a radiação solar, e por este motivo, algumas correções foram testadas a fim de minimizar esses erros. Após estas correções, verificou-se uma boa concordância en-

tre a radiação solar modelada (corrigida) e a radiação observada pelas PCDs, com correlações de 92% para o caso da correção usando a fração de cobertura de nuvens e a razão entre a radiação observada e a radiação no topo da atmosfera.

Para o estado do Ceará temos que a radiação solar incidente tem maiores médias durante o segundo semestre com um pico no mês de Outubro (entre 260 e 300 W/m²) como visto na Figura 21, sendo o valor médio anual encontrado de 260 W/m². A época de maior incidência da radiação solar coincide com a época de maior escassez de água, principalmente no interior do estado, e uma forma de diminuir a pobreza das regiões agrícolas, por exemplo, seria através do uso de sistemas de bombeamento de água que podem ser facilmente implementados através de painéis fotovoltaicos para atender as comunidades de baixa renda.

É importante também analisar a variação interanual da radiação solar, e por este motivo foram simulados eventos atmosféricos bem distintos de El Niño e La Niña, verificando-se que em períodos de El Niño, devido à inibição das chuvas no estado, há maior incidência da radiação solar.

Conclui-se que a metodologia apresentada é bastante viável para a estimativa da quantidade de radiação solar ao nível da superfície, podendo ser utilizada para qualquer resolução espacial a critério do usuário e limitadas pelo custo computacional, inclusive resoluções ainda menores que as utilizadas por modelos de transferência radiativa que se utilizam de imagens de satélites. Outra vantagem é exatamente a não necessidade dessas imagens que não são largamente disponibilizadas, ao contrário dos dados necessários para o modelo aqui proposto que estão livremente disponíveis através da Internet, o que permite a sua utilização por períodos maiores de tempo e em regiões aonde não existe cobertura permanente de satélite. Por fim, a presente metodologia possui ainda a capacidade de gerar previsões, tanto de curto prazo (24 a 48 horas), como também previsões baseadas em cenários futuros, o que não é possível em relação as imagens de satélite.

O tempo computacional é relativamente baixo, sendo possível simular um ano completo (2005) em apenas sete dias, usando 10 máquinas do cluster de previsão de clima da FUNCEME, baseado em processadores Intel Pentium IV de 2.8 GHz e 512 Mb de memória RAM.

Alem da utilização na área de energia, os resultados da metodologia aqui proposta possuem aplicações em várias outras áreas, como por exemplo, estudos relacionados a agricultura, hidrologia, biologia, ecologia, e até estudos de aspectos sócio-econômicos diversos, entre outros.

Como parte do desenvolvimento futuro do presente estudo, inclui-se a utilização de uma melhor resolução espacial, e a utilização de piranômetros de diferentes tipos e de dados obtidos de fontes adicionais, incluindo dados de satélite, para verificar a possibilidade de uma calibração mais precisa da metodologia aqui proposta.

Espera-se que este trabalho possa contribuir futuramente para a preparação de um Atlas Solarimétrico para o Estado do Ceará, e eventualmente sua extensão para toda a Região Nordeste, já que essa área possui uma enorme jazida de energia representada pela radiação solar incidente.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. [online]: <http://www.abrava.com.br/>.

AYVAZIAN, G.M., 1991. *Propagation of Millimeter and Submillimeter Waves in Clouds*. Gidometeoizdat, Leningrad.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. (Org.). *SP-LITE Silicon Pyranometer*. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com/documents/manuals/sp-lite.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2007.

CHEN, Chaing; COTTON, William R. *A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer*. *Boundary-layer Meteorology*, Boston, n. 25, p.289-321, 1983.

DEIRMENDJIAN, A., 1969. *Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*. Elsevier, Amsterdam.

HAN, Q., et al., 1994. *Near global survey of effective droplet radii in liquid water clouds using SCCP data*. *J. Climate* 7, 465–497.

HANSEN, J.E., TRAVIS, L.D., 1974. *Light scattering in planetary atmospheres*. *Space Sci. Rev.* 16, 527– 610.

HARRINGTON, J. *The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus*. PhD. Colorado State University, 1997.

HASTENRATH, S., 1984. *Interannual variability and annual cycle: mechanisms of circulation and climate in the tropical Atlantic*. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1097-1107.

HASTENRATH, S., 1990: *Prediction of Northeast Brazil rainfall anomalies*. J. Climate, 3, 893-904.

HERMAN, G. and GOODY, R.: 1976, *Formation and Persistence of Summertime Arctic Stratus Clouds*, J. Atmos. Sci. 33, 1537-1553.

HERMAN, G. and GOODY, R.: 1976, *Formation and Persistence of Summertime Arctic Stratus Clouds*, J. Atmos. Sci. 33, 1537-1553.

JOSEPH, J., W.J. WISCOMBE, and J.A. WEINMAN, 1976: *The Delta-Eddington approximation for radiative flux transfer*. J. Atmos. Sci., 33, 2452-2459.

KNOB, P.; RÜTHER, R.; JARDIM, C.S.; Beyer, H.G. *Investigating the peak demand reduction capability of PV: A case study in Florianopolis, south Brazil*, Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris – France, 877 – 890, 2004.

KOKHANOVSKY, Alex. *Optical properties of terrestrial clouds*. Earth-science Reviews, Bremen, Germany, n. 64, p.189-241, 2004. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 01 ago. 2006.

KONDRATYEV, K.Ya., BINENKO, V.I., 1984. *Impact of Cloudiness on Radiation and Climate*. Gidrometeoizdat, Leningrad.

LACIS, A. A. and HANSEN, J.: 1974, *A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in Earth's Atmosphere*, J. Atmos. Sci. 31, 118-133.

LANDOLT-BERNSTEIN, L., 1988. *Numerical data and functional relationships in science and technology*. In: Fischer, G. (Ed.), Group V: Geophysics and Space Research. V.5: Meteorology. Subvolume b. Physical and Chemical Properties of the Air. Springer-Verlag, Berlin. 570 pp.

LIU, Kuo-nan. *Solar radiation at the top of the atmosphere*. In: LIU, Kuo-nan. An Introduction to Atmospheric Radiation. Slat Lake City: Academic Press, 1980. Cap. 2, p. 35-48.

LOSTER, Matthias. *Total primary energy supply*. Disponível em: <http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/>. Acesso em: 10 mar. 2007.

MARTINS, Fernando Ramos et al. Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA. Anais Xii Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, p.3137-3145, 16-21 maio 2005.

MARTINS, Fernando Ramos; ABREU, Samuel Luna de; RÜTHER, Ricardo. *Atlas brasileiro de energia solar*. São José Dos Campos: Inpe, 2006. 60 p.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ECHER, Mariza Pereira de Souza. *Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário - o Projeto SWERA*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 26, n. 2, p.145-159, 12 mar. 2004. Mensal.

MCGRAW, R., NEMESURE, S., SCHWARTZ, S.E., 1998. *Properties and evolution of aerosols with size distributions having identical moments*. J. Aerosol Sci. 29, 761–772.

MENDES, Francisca Juscivânia; ACCIOLY FILHO, João Bosco P.; SAKAMOTO, Meiry Sayuri. *A rede de plataformas automáticas de coleta de dados da funceme*. Disponível em: <www.funceme.br>. Acesso em: 29 jun. 2007.

MENEZES NETO, Otacílio Leandro et al. *Impactos da circulação geral em casos de el niño e la niña no potencial eólico no nordeste brasileiro*. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis: Sbmec, 2006.

MITCHELL, L. David, 1997: *Parametrization of the Mie extinction and absorption coefficients: A process oriented approach*. Submitted to Applied Optics.

NEUMANN, G. and PIERSON, Jr., W. J.: 1966, *Principles of Physical Oceanography*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

OLIVEIRA G.S., 2003 *O El Niño e você – O fenômeno climático*. Primeira Edição. Editora Transtec.

OLIVER, D. A., LEWELLEN, W. S., and WILLIAMSON, G. G.: 1978, *The Interaction Between Turbulent and Radiative Transport in the Development of Fog and Low-level Stratus*, J. Atmos. Sci. 35. 301-316.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; Couto, P.; Stuhlmann, R.; Colle, S. *Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil*. Solar Energy, 68(1): 91-107, 2000.

PEREIRA, Enio Bueno; COLLE, Sérgio. *A energia que vem do Sol*. Ciência Hoje, Rio de Janeiro, v. 22, n. 130, p.24-35, ago. 1997. Mensal.

PEREZ, R.; LETENDRE, S.; HERIG, C. *PV and Grid Reliability: Availability of PV Power during Capacity Shortfalls*, Proceedings of the American Solar Energy Society - ASES Annual Conference, Washington, DC, , 1-4, 2001.

PEREZ, R.; SEALS, R.; HERIG, C. *PV can add capacity fo the grid*, NREL Publication DOC/GO-10096-262, NREL, Golden – USA, 1996.

PINSKY, M.B., KHAIN, A.P., 2002. *Effects of in-cloud nucleation and turbulence on droplet spectrum formation in cumulus clouds*. Q. J. R. Meteorol. Soc. 128, 501–534.

RITTER, Bodo and Jean-Francois GELEYN, 1992: *A comprehensive radiation scheme for numerical weather prediction models with potential applications in climate simulation*. Mon. Wea. Rev., 120, 303-325.

RÜTHER, R. *Edifícios Solares Fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil*, 113 p., 2004.

SEED (Brasil) (Org.). *Sol e mudança na temperatura da terra*. Disponível em: <http://www.seed.slb.com/pt/scictr/watch/climate_change/causes_other.htm>. Acesso em: 11 mar. 2007.

SLINGO, J.M., and H. M. SCHRECKER, 1982: *On the shortwave radiative properties of water clouds*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 108, 407-426.

STEPHENS, G. L. and WEBSTER, P. J.: 1979, *Sensitivity of Radiative Forcing to Variable Cloud and Moisture*, J. Atmos. Sci. 36, 1542-1556.

STEPHENS, G. L. *Radiation profiles in extended water clouds. II: parameterization schemes*. *Journal of Atmospheric Science*, 35: 2123-2132, 1978.

STEPHENS, G. L.: 1977, *The Transfer of Radiation in Cloudy Atmosphere*, Ph.D. Thesis, Meteorology Dept., University of Melbourne.

STEPHENS, G. L.: 1978, *Radiation Profiles in Extended Water Clouds, Part II*, J. Atmos. Sci. 35,2123-2132.

STUHLMANN, R.; RIELAND, M.; RASCHKE, E. *An improvement of the IGMK model to derive total and diffuse solar radiation at the surface from satellite data*. J. Applied Meteorology, 29(7): 586-603, 1990.

TIBA, C. *Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

TREMBACK, Craig J. *Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) in 2001: Development History, Description, Current Applications and Planned Developments*. Disponível em: <<http://www.lamma.rete.toscana.it/rams/docrams/rams.pdf>>. Acesso em: 02 jul. 2007.

TWOMEY, S., 1977. *Atmospheric Aerosols*. Elsevier, London.

van de HULST, H.C., 1957: *Light Scattering by Small Particles*. Dover Publications, New York, 470pp.

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. *RAMS: The Regional Atmospheric Modeling System, Technical Description*. [S.l.], 2001.

MAHER, Y.; PIELKE, R., 1977: *A Numerical Study of the Airflow Over Irregular Terrain*. Virginia, US.

YAMAMOTO, G.: 1962, *Direct Absorption of Solar Radiation by Atmospheric Water Vapor, Carbon Dioxide and Molecular Oxygen*, J. Atmos. Sci. 19, 182-188.

ZDUNKOWSKI, *et al.*, 1982: *A radiation scheme for circulation and climate models*. Contrib. Atmos. Phys., 55, 215-238.

APÊNDICE A

```

$MODEL_GRIDS

! Simulation title (64 chars)
EXPNAME = 'teste de sensibilidade das parametrizações de radiação',

RUNTYPE = 'INITIAL',      ! Type of run: MAKESFC, INITIAL, HISTORY,
                          !                               MAKEVFILE, MEMORY, or ERROR

TIMEUNIT = 'h',          ! 'h','m','s' - Time units of TIMMAX, TIMSTR

TIMMAX = 8760.0,        ! 8760.0, ! Final time of simulation

LOAD_BAL = 0,          ! Dynamic load balance flag: 1=yes, 0=no

! Start of simulation or ISAN processing

IMONTH1 = 01,          ! Month
IDATE1 = 01,           ! Day
IYEAR1 = 2005,         ! Year
ITIME1 = 0000,        ! GMT of model TIME = 0.

! Grid specifications

NGRIDS = 1,            ! Number of grids to run

NNXP = 60,62,          ! Number of x gridpoints
NNYP = 60,62,          ! Number of y gridpoints
NNZP = 39,39,          ! Number of z gridpoints
NZG = 11,              ! Number of soil layers
NZS = 1,               ! Maximum number of snow layers

NXTNEST = 0,1,1,1,    ! Grid number which is the next coarser
grid

! Coarse grid specifications

IF_ADAP = 0,

IHTRAN = 1,            ! 0-Cartesian, 1-Polar stereo, 2-Lambert-
conformal
DELTAX = 40000.,
DELTAY = 40000.,      ! X and Y grid spacing

DELTAZ = 80.,          ! Z grid spacing (set to 0. to use ZZ)
DZRAT = 1.1,           ! Vertical grid stretch ratio
DZMAX = 1000.,        ! Maximum delta Z for vertical stretch

ZZ = 0.0,              ! Vertical levels if DELTAZ = 0
  20.0,    46.0,    80.0,    120.0,    165.0,
  220.0,    290.0,    380.0,    480.0,    590.0,
  720.0,    870.0,   1030.0,   1200.0,   1380.0,
 1595.0,   1850.0,   2120.0,   2410.0,   2715.0,
 3030.0,   3400.0,   3840.0,   4380.0,   5020.0,
 5800.0,   6730.0,   7700.0,   8700.0,   9700.0,

```

```

10700., 11700., 12700., 13700., 14700., 15700., 16700.,
17700., 18700., 19700.,

DTLONG   = 150.,           ! Coarse grid long timestep
NACOUST  = 5,             ! Small timestep ratio
IDELTAT  = -2,           ! =0 - constant timesteps
                          ! >0 - initial computation <0 - variable

! Nest ratios between this grid and the next coarser grid.
NSTRATX  = 1,4,3,4,       ! x-direction
NSTRATY  = 1,4,3,4,       ! y-direction
NNDTRAT  = 1,3,2,2,       ! Time

NESTZ1   = 0,             ! Contort coarser grids if negative
NSTRATZ1 = 3,3,3,2,2,1,
NESTZ2   = 0,             ! Contort coarser grids if negative
NSTRATZ2 = 3,3,3,2,2,1,

POLELAT  = -5.0,          ! If polar, latitude/longitude of pole point
POLELON  = -39.5,         ! If lambert, lat/lon of grid origin (x=y=0.)

STDLAT1  = 30.,           ! If polar, unused
STDLAT2  = 60.,           ! If lambert, standard latitudes of projection
                          ! stdlat1 must be <= stdlat2 (not working yet)

! Grid point on the next coarser nest where the lower southwest
! corner of this nest will start.
! If NINEST or NJNEST = 0, use CENTLAT/CENTLON

NINEST   = 1,0,0,0,       ! i-point
NJNEST   = 1,0,0,0,       ! j-point
NKNEST   = 1,1,1,1,       ! k-point

CENTLAT  = -5.0,-5,
CENTLON  = -39.5,-39.5,

NNSTTOP  = 1,1,1,1,       ! Flag (0-no or 1=yes) if this
NNSTBOT  = 1,1,1,1,       ! Nest goes the top or bottom of the
                          ! coarsest nest.

GRIDU    = 0.,0.,0.,0.,   ! u-component for moving grids
GRIDV    = 0.,0.,0.,0.,   ! v-component for moving grids
                          ! (not working again!)

$END

$MODEL_FILE_INFO

! Variable initialization input

INITIAL  = 2,             ! Initial fields - 1=horiz.homogeneous,
                          !                               2=init from varfile
                          !                               3=init from HFILIN

! ----- Analysis nudging parameters -----
NUD_TYPE = 2,           ! =1 - nudge from history files(1-way nest)
                          ! =2 - nudge from varfiles
                          ! =0 - no analysis nudging

```

```

VARFFPX = './isan/isan',      ! Varfile initialization file prefix
VWAIT1  = 0.,                ! wait between each VFILE check (s)
VWAITTOT = 0.,              ! total wait before giving up on a VFILE (s)

NUD_HFILE = '1',
          ! Header file name for history nudging files (only prefix is
used)

NUDLAT  = 5,                ! Number of points in lateral bnd region
TNUDLAT = 1200.,           ! Nudging time scale(s) at lateral boundary
TNUDCENT = 86400.,         ! Nudging time scale(s) in center of do-
main
TNUDTOP  = 43200.,         ! Nudging time scale (s) at top of domain
ZNUDTOP  = 17000.,        ! Nudging at top of domain above height(m)

WT_NUDGE_GRID = 1.,1.,0.5, ! Relative nudging weights for active grids
                    ! =0., turns off nudging for that
grid

                    ! These weights will multiply the base time-
scales

                    ! to determine full nudging weight.
                    ! (Timescales)/(WT_NUDGE_*)
                    ! must be larger than DTLONG
WT_NUDGE_UV = 1.,         ! Anal nudging weight for u and v
WT_NUDGE_TH = 1.,         ! Anal nudging weight for theta
WT_NUDGE_PI = 1.,         ! Anal nudging weight for pi
WT_NUDGE_RT = 1.,         ! Anal nudging weight for r_tot

!-----
!----- Condensate nudging -----
NUD_COND = 0,             ! Only nudge total water where condensate
                    ! exists (from previous history files)
COND_HFILE = '1',
          ! Header file name for cond nudging history files (only prefix
is used)
TCOND_BEG=0., TCOND_END=21600., ! Model time start and end of cond nudg-
ing (sec)
T_NUDGE_RC = 0.,         ! Cond nudging timescale for r_total
WT_NUDGE_GRID = 0.,     ! Relative nudging weights for active grids
                    ! =0., turns off nudging for that
grid

!-----
!----- Observation Data Assimilation (ODA) -----
IF_ODA = 0,              ! Flag to turn on oda
ODA_UPAPREFIX = './obs/dp-r', ! File prefix for upper air obs
ODA_SFPCPREFIX = './obs/dt-s', ! File prefix for surface obs

FRQODA=300.,            ! Frequency of obs analysis
TODABEG=0., TODAEND=99999999., ! Model time start and end of oda
(sec)

TNUDODA= 0.,           ! Nudging timescale for each grid
WT_ODA_GRID = 1., 0.8, 0.7, 0.5, ! Relative nudging weights for
active grids

                    ! =0., turns off nudging for that
grid

```

```

WT_ODA_UV = 1.,          ! ODA nudging weight for u and v
WT_ODA_TH = 1.,          ! ODA nudging weight for theta
WT_ODA_PI = 1.,          ! ODA nudging weight for pi
WT_ODA_RT = 1.,          ! ODA nudging weight for r_tot

! Following are radii that affect the "smoothness" of the analyzed fields
!   The SFCE and UPAE are the radii where the affect falls off to e**(-
2)
!   The SFC0 and UPA0 are the radii where the affect falls off to 0
!   Values are grid dependent.

RODA_SFCE = 50000.,100.,100.,100.,
RODA_SFC0 = 100000.,100000.,100000.,100000.,
RODA_UPAE = 100000.,200.,200.,200.,
RODA_UPA0 = 200000.,2000.,2000.,2000.,

RODA_HGT = 3000.,3000.,3000.,3000., ! Height at which transition from
SFC radii
                                     !   to UPA radii occurs

RODA_ZFACT = 100.,100.,100.,100., ! Vertical factor related to dx/dz

! - Time interpolate limit (TIL)- if the future-past obs time
!   is > this limit, do not use to interpolate
!
! - Time extrapolate limit (TEL)- if past/future obs is greater than
TIL,
!   but less than TEL, use the obs

ODA_SFC_TIL=21600.,
ODA_SFC_TEL=900.,
ODA_UPA_TIL=43200.,
ODA_UPA_TEL=21600.,
!-----

!----- Cumulus inversion tendency input -----
IF_CUINV = 0,
CU_PREFIX = './t5-C-',

TNUDCU=900.,
WT_CU_GRID=1., 1., .5,

TCU_BEG=0., TCU_END=7200.,
CU_TEL=3600.,
CU_TIL=21600.,
!-----

! History start (if RUNTYPE='HISTORY')

HFILIN   = 'an-A-2005-08-02-170000-head.txt',
          ! Input state file name

! Analysis file input for assimilation (currently LEAF variables)

IPASTIN   = 0,          ! Initialize various fields from analysis
file?
          ! 1=yes, 0=no

PASTFN    = '1',
          ! Input analysis file name

```

```

!-----
ICLOBBER = 1,          ! 0=stop if files exist, 1=overwrite files
!-----

! Analysis file output

IOUTPUT = 1,          ! 0=no files, 1-write files
AFILEPREF = './simul_chen/an', ! File prefix for all analysis files
! state,mean,lite,both

!-----
FRQSTATE = 3600.0,    ! "state" file write frequency
! can be different for each grid
! works best if grids are multiples of each
other
FRQSTATE_KEEP = 0.,  ! If > 0., frequency at which "state" files will
be
! kept. Others will be written, but deleted
on
! the subsequent write.
! Intended to be a mutiple of and >=
FRQSTATE
!-----
FRQLITE = 0.,        ! Frequency for "lite" files
! = 0 : no lite files
XLITE = '/0:0/',    ! nums>0 are absolute grid indexes (not yet)
YLITE = '/0:0/',    ! nums<0 count in from the domain edges (not
yet)
ZLITE = '/0:0/',    ! nums=0 are domain edges (not yet)

NLITE_VARS=1,
LITE_VARS='RSHORT',
!-----

AVGTIM = 0.,        ! Averaging time for analysis variables
! must be abs(AVGTIM) <= FRQANL
! > 0 : averaging is centered at FRQANL
! < 0 : averaging ends at FRQANL
! = 0 : no averaged files
FRQMEAN = 0.,      ! Frequency for "averaged" files
!-----

FRQBOTH = 0.,      ! Frequency for Both ("averaged"/"lite") files

! Printed output controls

FRQPRT = 86400000., ! Printout frequency
INITFLD = 0,       ! Initial field print flag 0=no prnt,1=prnt

! Input topography variables

TOPFILES = './surf/top', ! File path and prefix for topo files.
SFCFILES = './surf/sfc', ! File path and prefix for surface files.
SSTFPFX = './surf/sst', ! Path and prefix for sst files
NDVIFPFX = './surf/ndvi', ! Path and prefix for sst files

ITOPTFLG = 1,1,     ! 2 - Fill data in "leaf3_init"
ISSTFLG = 1,1,     ! 0 - Interpolate from coarser grid
IVEGTFLG = 1,1,     ! 1 - Read from standard Lat/Lon data file
ISOILFLG = 1,1,     !
NDVIFLG = 1,2,     !

```

```

NOFILFLG = 2,2,2,2,          ! 2 - Fill data in "leaf3_init"
                                ! 0 - Interpolate from coarser grid

IUPDNDVI = 1,                ! 0 - No update of NDVI values during run
IUPDSST  = 1,                ! 0 - No update of SST values during run
                                ! 1 - Update values during run

                                ! The following only apply for IxxxxFLG=1
ITOPTFN  = './sfc_data/DEM30s-h5/EL',
ISSTFN   = './sfc_data/sst-h5/S',
IVEGTFN  = './sfc_data/ogedata-h5/GE',
ISOILFN  = './sfc_data/FAOdata-h5/FAO',
NDVIFN   = './sfc_data/ndvi/N',

! Topography scheme

ITOPSFLG = 3,3,              ! 0 = Average Orography
                                ! 1 = Silhouette Orography
                                ! 2 = Envelope Orography
                                ! 3 = Reflected Envelope Orography

TOPTENH  = 1.,1.,           ! For ITOPSFLG=1, Weighting of topo
                                ! silhouette averaging
                                ! For ITOPSFLG=2 or 3, Reflected Envelope
                                ! and Envelope Orography enhancement

factor

TOPTWVL  = 4.,4.,4.,4.,     ! Topo wavelength cutoff in filter

! Surface Roughness scheme

IZOFLG   = 1,                ! 0 = Use veg, bare soil and water surface
                                ! 1 = Also use subgrid scale topography
ZOMAX    = 2.,2.,           ! Max zo for IZOFLG=1
ZOFACT   = 0.005,           ! Subgrid scale orographic roughness factor

! Microphysics collection tables

MKCOLTAB = 1,                ! Make table: 0 = no, 1 = yes
COLTABFN = 'ct2.0',         ! Filename to read or write

$END

$MODEL_OPTIONS

NADDSC   = 0,                ! Number of additional scalar species

! Numerical schemes

ICORFLG  = 1,                ! Coriolis flag/2D v-component - 0=off, 1=on

IBND     = 1,                ! Lateral boundary condition flags
JBND     = 1,                ! 1-Klemp/Wilhelmson, 2-Klemp/Lilly, 3-
Orlanski
                                ! 4-cyclic
CPHAS    = 20.,              ! Phase speed if IBND or JBND = 1

```

```

    LSFLG    = 0,          ! Large-scale gradient flag for variables oth-
er than                                     !
                                           ! normal velocity:
                                           ! 0 = zero gradient inflow and outflow
                                           ! 1 = zero gradient inflow, radiative b.c.
outflow                                     !
                                           ! 2 = constant inflow, radiative b.c. outflow
                                           ! 3 = constant inflow and outflow
    NFPT     = 0,          ! Rayleigh friction - number of points from
the top                                     !
    DISTIM   = 60.,       !
                                           ! - dissipation time scale

! Radiation parameters

    ISWRTYP  = 1,          ! Shortwave radiation type
    ILWRTYP  = 1,          ! Longwave radiation type
                                           ! 0-none, 2-Mahrer/Pielke, 1-Chen, 3-
Harrington
    RADFRQ   = 600.,      ! Freq. of radiation tendency update (s)
    LONRAD   = 1,          ! Longitudinal variation of shortwave
                                           ! (0-no, 1=yes)

! Cumulus parameterization parameters

    NNQPARM  = 1,1,0,0,   ! Convective param flag (0-off, 1-Kuo, 2-Kain-
Fritsch)
    CONFRQ   = 1200.,     ! Frequency of conv param. updates (s)
    WCLDBS   = .001,      ! Vertical motion needed at cloud base for
                                           ! to trigger convection (Kuo)

! Surface layer and soil parameterization

    NPATCH   = 3,          ! Number of patches per grid cell (min=2)

    NVEGPAT  = 2,          ! Number of patches per grid cell to be
                                           ! filled from
                                           ! vegetation files
                                           ! (min of 1, max of NPATCH-1)

    ISFCL    = 1,          ! Surface layer/soil/veg model
                                           ! 0-specified surface layer gradients
                                           ! 1-soil/vegetation model

    NVGCON   = 15,        ! Vegetation type (see below)

! 0 Ocean                                ! 11 Tundra
! 1 Lakes, rivers, streams                ! 12 Evergreen shrub
! 2 Ice cap/glacier                       ! 13 Deciduous shrub
! 3 Desert, bare soil                     ! 14 Mixed woodland
! 4 Evergreen needleleaf tree             ! 15 Crop/mixed farming, C3 grassland
! 5 Deciduous needleleaf tree             ! 16 Irrigated crop
! 6 Deciduous broadleaf tree              ! 17 Bog or marsh
! 7 Evergreen broadleaf tree              ! 18 Wooded grassland
! 8 Short grass                           ! 19 Urban and built up
! 9 Tall grass                             ! 20 Wetland evergreen broadleaf tree
! 10 Semi-desert                          ! 21 Very urban

    PCTLCON  = 1.,        ! Constant land % if for all domain
    NSLCON   = 6,         ! Constant soil type if for all domain

! 1 -- sand                               2 -- loamy sand           3 -- sandy loam

```

```

!   4 -- silt loam           5 -- loam           6 -- sandy clay loam
!   7 -- silty clay loam    8 -- clay loam       9 -- sandy clay
!  10 -- silty clay         11 -- clay           12 -- peat

ZROUGH = .05,                ! Constant roughness if for all domain
ALBEDO = .2,                 ! Constant albedo if not running soil model
SEATMP = 298.,               ! Constant water surface temperature

DTHCON = 0.,                 ! Constant sfc layer temp grad for no soil
DRTCON = 0.,                 ! Constant sfc layer moist grad for no soil

SLZ    = -.50,-.40,-.30,-.25,-.20,-.16,-.12,-.09,-.06,-.03,-.01, ! soil
grid levels                    ! Soil grid levels

SLMSTR = 0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1,0.1, ! initial soil
moisture                       ! Initial soil moisture

STGOFF= 0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,
! Initial soil temperature offset
! from lowest atmospheric level
!-----
!----- Urban canopy parameterization -----
      IF_URBAN_CANOPY =0,
!-----
!----- Eddy diffusion coefficient parameters -----
      IDIFFK = 1,1,1,1,      ! K flag:
!   1 - Horiz deform/Vert Mellor-Yamada
!   2 - Anisotropic deformation
!       (horiz & vert differ)
!   3 - Isotropic deformation
!       (horiz and vert same)
!   4 - Deardorff TKE (horiz and vert same)
!   5 - Silvia's TKE-1 scheme(horiz and vert
same)
!   6 - Silvia's TKE-eps scheme(horiz and vert
same)
      IHORGRAD = 1,          ! 1 - horiz grad frm decomposed sigma grad
!   2 - true horizontal gradient.
!       Non-conserving, but allows small DZ
      CSX    = .25,.25,.2,.2, ! Deformation horiz. K's coefficient
      CSZ    = .25,.25,.2,.2, ! Deformation vert. K's coefficient
      XKHKM  = 3.,3.,3.,3.,  ! Ratio of horiz K_h to K_m for deforma-
tion
      ZKHKM  = 3.,3.,3.,3.,  ! Ratio of vert K_h to K_m for deforma-
tion
      AKMIN  = 1.,1.,1.,1.,  ! Ratio of minimum horizontal eddy
! viscosity coefficient to typical value
! from deformation K
!-----
!----- Microphysics -----
      LEVEL  = 3,            ! Moisture complexity level

```

```

ICLOUD = 5,          ! Microphysics flags
IRAIN  = 2,          !-----
IPRIS  = 5,          ! 1 - diagnostic concen.
ISNOW  = 2,          ! 2 - specified mean diameter
IAGGR  = 2,          ! 3 - specified y-intercept
IGRAUP = 2,          ! 4 - specified concentration
IHAIL  = 2,          ! 5 - prognostic concentration

CPARM  = .3e9,       ! Microphysics parameters
RPARM  = 1e-3,       !-----
PPARM  = 0.,         ! Characteristic diameter, # concentration
SPARM  = 1e-3,       ! or y-intercept
APARM  = 1e-3,
GPARM  = 1e-3,
HPARM  = 3e-3,

GNU    = 2.,2.,2.,2.,2.,2.,2., ! Gamma shape parms for
                                ! cld rain pris snow aggr graup hail
!-----
---

$END

$MODEL_SOUND

!-----
! Sounding specification
!-----

! Flags for how sounding is specified

IPSFLG = 1,          ! Specifies what is in PS array
                                ! 0-pressure(mb) 1-heights(m)
                                ! PS(1)=sfc press(mb)

ITSFLG = 0,          ! Specifies what is in TS array
                                ! 0-temp(C) 1-temp(K) 2-pot. temp(K)

IRTSFLG = 3,         ! Specifies what is in RTS array
                                ! 0-dew pnt.(C) 1-dew pnt.(K)
                                ! 2-mix rat(g/kg)
                                ! 3-relative humidity in %,
                                ! 4-dew pnt depression(K)

IUSFLG = 0,          ! Specifies what is in US and VS arrays
                                ! 0-u,v component(m/s)
                                ! 1-umoms-direction, vmoms-speed

HS      = 0.,

PS =
1010.,1000.,2000.,3000.,4000.,6000.,8000.,11000.,15000.,20000.,25000.,

TS = 25., 18.5, 12., 4.5, -11., -24., -37., -56.5, -56.5, -56.5, -
56.5,

RTS = 70.,70.,70.,70.,20.,20.,20.,20.,10.,10.,10.,

US = 2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,
US = 10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,10.,

```

```

US = 0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,
US = 3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,

VS = 3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,3.,
VS = 2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,2.5,
VS = 0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,0.,

$END

$MODEL_PRINT

!-----
! Specifies the fields to be printed during the simulation
!-----

NPLT      = 1,                ! Number of fields printed at each time
                                !   for various cross-sections (limit of 50)

IPLFLD    = 'UP','THP','THETA','RT','TOTPRE',
                                ! Field names - see table below

! PLEFMT(1) = '0PF7.3',      ! Format spec. if default is unacceptable

IXSCTN     = 3,3,3,3,3,3,      ! Cross-section type (1=XZ, 2=YZ, 3=XY)

ISBVAL     = 2,2,2,2,2,2,      ! Grid-point slab value for third direction

! The following variables can also be set in the namelist:  IAA,
! IAB, JOA, JOB, NAAVG, NOAVG, PLTIT, PLCONLO, PLCONHI, and PLCONIN.

!   'UP'    - UP (M/S)        'RC'    - RC (G/KG)        'PCPT' - TOTPRE
!   'VP'    - VP (M/S)        'RR'    - RR (G/KG)        'TKE'  - TKE
!   'WP'    - WP (CM/S)       'RP'    - RP (G/KG)        'HSCL' - HL (M)
!   'PP'    - PRS (MB)        'RA'    - RA (G/KG)        'VSCL' - VL (M)
!   'THP'   - THP (K)
!   'THETA' - THETA (K)       'RL'    - RL (G/KG)        'TG'   - TG (K)
!   'THVP'  - THV (K)        'RI'    - RI (G/KG)        'SLM'  - SLM (PCT)
!   'TV'    - TV (K)         'RCOND' - RD (G/KG)       'CONPR' - CON RATE
!   'RT'    - RT (G/KG)      'CP'    - NPRIS          'CONP' - CON PCP
!   'RV'    - RV (G/KG)      'RTP'   - RT (G/KG)      'CONH' - CON HEAT
!                                           'CONM' - CON MOIS
!   'THIL'  - Theta-il (K)   'TEMP'  - temperature (K)
!   'TVP'   - Tv (K)         'THV'   - Theta-v (K)
!   'RELHUM' - relative humidity (%)   'SPEED' - wind speed (m/s)
!   'FTHRD' - radiative flux convergence (??)
!   'MICRO' - GASPRC
!   'ZO'    - ZO (M)         'ZI'    - ZI (M)         'ZMAT' - ZMAT (M)
!   'USTARL' - USTARL (M/S)  'USTARW' - USTARW (M/S)  'TSTARL' - TSTARL (K)
!   'TSTARW' - TSTARW (K)   'RSTARL' - RSTARL (G/G)  'RSTARW' - RSTARW (G/G)
!   'UW'    - UW (M*M/S*S)  'VW'    - VW (M*M/S*S)
!   'WFZ'   - WFZ (M*M/S*S)  'TFZ'   - TFZ (K*M/S)
!   'QFZ'   - QFZ (G*M/G*S)  'RLONG' - RLONG
!   'RSHORT' - RSHORT

$END

$ISAN_CONTROL

```

```

!-----
! Isentropic control
!-----

ISZSTAGE = 1,      ! Main switches for isentropic-sigz
IVRSTAGE = 1,      !   "varfile" processing

ISAN_INC = 0600,   ! ISAN processing increment (hhmm)
                !   range controlled by TIMMAX,
                !   IYEAR1,...,ITIME1

GUESS1ST = 'PRESS', ! Type of first guess input- 'PRESS', 'RAMS'

I1ST_FLG = 1,      ! What to do if first guess file should be
                ! used but does not exist.
                ! 1=I know it may not be there,
                !   skip this data time
                ! 2=I screwed up, stop the run
                ! 3=interpolate first guess file from
                !   nearest surrounding times, stop if unable
                !   (not yet available)

IUPA_FLG = 3,      ! UPA-upper air, SFC-surface
ISFC_FLG = 3,      ! What to do if other data files should be
                ! used, but does not exist.
                ! 1 = I know it may not be there,
                !   skip this data time
                ! 2 = I screwed up, stop the run
                ! 3 = Try to continue processing anyway

! Input data file prefixes

IAPR   = './dps/dp-p', ! Input press level dataset
IARAWI = '', ! Archived rawinsonde file name
IASRFCE = '', ! Archived surface obs file name

! File names and dispose flags

VARPFX = './isan/isan', ! isan file names prefix
IOFLGISZ = 0,           ! Isen-sigz file flag: 0 = no write, 1 = write
IOFLGVAR = 1,           ! Var file flag: 0 = no write, 1 = write

$END

$ISAN_ISENTROPIC

!-----
! Isentropic and sigma-z processing
!-----

!-----
! Specify isentropic levels
!-----

NISN   = 43,           ! Number of isentropic levels
LEVTH  = 280,282,284,286,288,290,292,294,296,298,300,303,306,309,312,
        315,318,321,324,327,330,335,340,345,350,355,360,380,400,420,
        440,460,480,500,520,540,570,600,630,670,700,750,800,

!-----
! Analyzed grid information:

```

```

!-----
NIGRIDS = 1,          ! Number of RAMS grids to analyze
TOPSIGZ = 20000.,    ! Sigma-z coordinates to about this height
HYBBOT  = 4000.,     ! Bottom (m) of blended sigma-z/isentropic
                   ! layer in varfiles
HYBTOP  = 6000.,     ! Top (m) of blended sigma-z/isentropic layr
SFCINF  = 1000.,     ! Vert influence of sfc observation analysis
SIGZWT  = 1.,        ! Weight for sigma-z data in varfile:
                   ! 0.= no sigz data,
                   ! 1.=full weight from surface to HYBBOT

NFEEDVAR = 1,        ! 1=feed back nested grid varfile, 0=don't

!-----
! Observation number limits:
!-----

MAXSTA  = 150,       ! maximum number of rawinsondes
                   ! (archived + special)
MAXSFC  = 1000,      ! maximum number of surface observations

NOTSTA  = 0,         ! Number of stations to be excluded
NOTID   = 'r76458',  ! Station ID's to be excluded
                   ! Prefix with 'r' for rawinsonde,
                   !           's' for surface

USED_FILE = 'none',  ! Filename prefix to output stations actually
                   ! used in the analysis

IOBSWIN = 1800,      ! Window (seconds) around analysis time. Obs
                   ! outside this window will not be used.

STASEP  = .1,        ! Minimum sfc station separation in degrees.
                   ! Any surface obs within this distance
                   ! of another obs will be thrown out
                   ! unless it has less missing data,
                   ! in which case the other obs will be
                   ! thrown out.

IGRIDFL = 4,         ! Grid flag=0 if no grid point, only obs
                   !           1 if all grid point data and obs
                   !           2 if partial grid point and obs
                   !           3 if only grid data
                   !           4 all data... fast

GRIDWT  = .01,.01,   ! Relative weight for the gridded press data
                   ! compared to the observational data in
                   ! the objective analysis

GOBSEP  = 5.,        ! Grid-observation separation (degrees)
GOBRAD  = 5.,        ! Grid-obs proximity radius (degrees)

WVLNTH  = 1200.,900., ! Used in S. Barnes objective analysis.

```

```
! Wavelength in km to be retained to the
! RESPON % from the data to the upper air
! grids.
SWVLNTH = 750.,300., ! Wavelength for surface objective analysis
RESPON = .90,.9, ! Percentage of amplitude to be retained.
$END
```

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)