

## ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA IRRADIÂNCIA SOLAR PARA DISTINTAS REGIÕES DA AMÉRICA DO SUL.

R. Haag, A. Krenzinger.

Labsol - Laboratorio de Energia Solar – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica  
 Escola de Engenharia

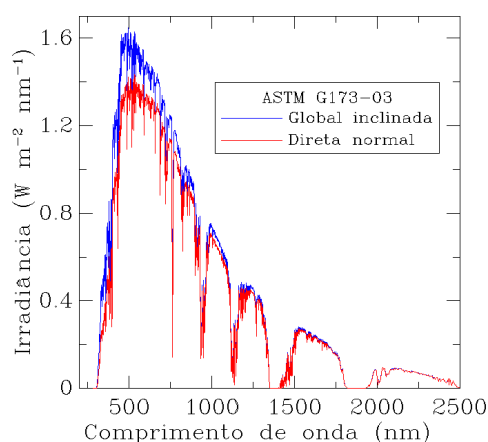
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS – Porto Alegre  
 Tel. +55 51 33086841 – Fax. +55 51 33086841 e-mail: rafael.haag@ufrgs.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta uma estimativa da distribuição espectral da irradiância solar sobre a superfície terrestre em diferentes regiões da América do Sul. Utilizam-se dados obtidos por estações pertencentes às redes AERONET (*AERosol ROBotic NETwork*) e SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) e através de sensores a bordo de satélites para a obtenção dos principais parâmetros atmosféricos que alteram a distribuição espectral da radiação solar. Foi empregado o modelo computacional de transferência radiativa na atmosfera SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) para estimar o comportamento da irradiância solar espectral e total entre 280 – 4000 nm. Algumas distribuições espectrais típicas para as regiões analisadas são comparadas com o adotado pela norma americana ASTM G173-03.

**Palabras clave:** espectro de referência, irradiância espectral, atenuação atmosférica, sensoriamento remoto.

### INTRODUÇÃO

Sistemas fotovoltaicos de diferentes tecnologias são normalmente desenvolvidos e avaliados a partir de um espectro solar padrão. Quase sempre, esta distribuição espectral da radiação solar, não pode ser considerada representativa para regiões com parâmetros atmosféricos diferentes do adotados no modelo padrão. O conhecimento sobre as características da distribuição espectral da irradiância solar é extremamente importante para o correto dimensionamento de sistemas que utilizam a energia oriunda do Sol. Superfícies seletivas, como módulos fotovoltaicos possuem respostas espectrais distintas que variam em função da tecnologia utilizada na sua fabricação. No ano de 2003, a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) passou a adotar o novo modelo de referência denominado de G173-03 para servir como padrão para avaliação de sistemas fotovoltaicos. A Figura 1 apresenta o espectro padrão americano G173-03 e também adotado como referência pela comunidade europeia. O espectro padrão G173-03 foi desenvolvido empregando-se o modelo de transferência radiativa SMARTS2 e dados sobre parâmetros atmosféricos obtidos em cidades norte-americanas com média anual diária de irradiância solar direta maior que 6 kWh/m<sup>2</sup> e baixa concentração de aerossóis, como é visto na Tab. 1. Sendo assim, os valores de irradiância preconizados pelo espectro G173-03 favorecem sistemas que empregam a componente direta da radiação solar. Neste trabalho analisamos as diferenças entre os espectros típicos para distintas regiões da América do Sul e o recomendado pela ASTM. Utilizam-se dados obtidos por fotômetros solares da rede AERONET e SONDA para a obtenção da espessura óptica de aerossóis (AOD) e quantidade de água precipitável nas localidades analisadas. Informações sobre estes constituintes atmosféricos e coluna total de ozônio também são obtidos através de sensores a bordo dos satélites TERRA e AQUA.



*Figura 1: Irradiâncias global inclinada e direta normal adotadas no modelo ASTM G173-03 para uma superfície inclinada 37° em relação ao zênite.*

Localidade	Radiação direta ( $kWh/m^2$ )	AOD 500 nm
Dagget, CA	7,5	0,087
Las Vegas, NV	7,1	0,105
Tucson, AZ	7	0,099
Phoenix, AZ	6,8	0,142
Prescott, AZ	6,8	0,074
Alamosa, CO	6,8	0,029
Albuquerque, NM	6,7	0,074
Tonopah, NV	6,7	0,082
El Paso, TX	6,7	0,118
Flagstaff, AZ	6,4	0,074
Reno, NV	6,2	0,091
Cedar City, UT	6,2	0,074
Pueblo, CO	6,1	0,074
Tucumcari, NM	6,1	0,099
Ely, NM	6	0,050
Média regional	6,61	0,085

Tabela 1 : Média anual da radiação direta e AOD em cidades norte-americanas escolhidas para a elaboração do espectro padrão G173-03.

A Tabela 2 mostra os valores das concentrações dos principais constituintes atmosféricos considerados na elaboração do espectro de referência G173-03.

AOD 500 nm	Água precipitável (cm)	Ozônio (atm-cm)	CO <sub>2</sub> (ppm)
0,084	1,4164	0,3438	370

Tabela 2 : Concentração dos principais constituintes atmosféricos empregados no espectro G173-03.

Pelo fato de serem avaliados geralmente sob um único espectro padrão de referência, o desempenho destes dispositivos em condições reais de uso pode variar devido às características espectrais diferentes da condição padrão.

Quase sempre as características espectrais de uma determinada região não são conhecidas *a priori*. Além disto, um espectro específico adotado como padrão para avaliação de dispositivos que utilizam a energia do Sol, pode não ser o mais indicado para representar as características de uma região ou até mesmo país (Haag e Krenzinger, 2008 e Case, et al., 2008). Um módulo fotovoltaico de determinada tecnologia pode apresentar um melhor desempenho em relação a outro de diferente tecnologia em um local com pouca umidade e baixa concentração de aerossóis por exemplo, mas em um clima tropical e com valores altos de AOD este mesmo módulo pode ser inferior ao outro (Gueymard, 2007). Araki e Yamaguchi (2003), através de medidas realizadas na cidade de Nagoya, Japão, relatam diferenças que podem chegar até 12% na produção anual de energia em módulos fotovoltaicos de tripla junção devido à diferença espectral observada e a calculada pelo espectro de referência. Gottschalg et al. (2003) mostram que a variação espectral da irradiância solar pode alterar entre +6% até -9% a eficiência de módulos fotovoltaicos de filmes finos (a-Si).

Para obter os espectros de distribuição da irradiância solar de céu limpo típico para as regiões analisadas, foi realizada uma análise estatística para a concentração de água precipitável, espessura de aerossóis e ozônio. Os perfis de distribuição vertical destes constituintes também foram analisados. O trabalho de Haag e Krenzinger (2010) descreve com maiores detalhes a metodologia empregada para a obtenção destes dados climatológicos. Uma vez obtidos os parâmetros atmosféricos, emprega-se o modelo de transferência radiativa SMARTS2 para obtenção das distribuições espectrais.

## REGIÕES ANALISADAS

Foram escolhidas 12 regiões da América do Sul com distintos padrões climatológicos para análise da distribuição espectral da irradiância solar. Estes locais foram selecionados por apresentar instalações das redes AERONET ou SONDA com dados disponíveis no nível 2 (dados tratados e qualificados) abrangendo um período maior que 24 meses. A localidade denominada de “Atacama”, apesar de não possuir estações das redes AERONET ou SONDA, foi escolhida para estimativa da distribuição espectral solar em uma região que apresenta um dos mais altos potenciais para aproveitamento da energia solar no mundo. Os

dados sobre os parâmetros atmosféricos (AOD, água precipitável e ozônio) desta região foram obtidos através do sensor MODIS a bordo dos satélites TERRA e AQUA. A Fig. 2 apresenta a localização das regiões analisadas.



Figura 2: Localização das regiões analisadas: a) Atacama, b) Arica, c) Santiago, d) La Paz, e) Córdoba, f) CEILAP-BA, g) Cuiabá-Miranda, h) Brasília, i) Alta Floresta, j) ABRACOS Hill, k) Petrolina e l) Belterra.

## PARÂMETROS ATMOSFÉRICOS

Os valores médios mensais para a espessura óptica de aerossóis (abreviada neste trabalho por AOD, do inglês *Aerosol Optical Depth*) e quantidade de água precipitável foram obtidos através do tratamento dos dados fornecidos pelas estações da rede SONDA e AERONET.

A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia) é um projeto desenvolvido e coordenado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Foi criada para implementação de uma rede de coleta de dados destinada a levantar e melhorar a base de dados sobre os recursos de energia solar e eólica no Brasil. A rede SONDA possui um total de 25 estações, sendo que algumas possuem disponibilidade de dados para um restrito período e outras se encontram em fase de implantação (Martins et al., 2007).

A rede AERONET foi criada pela agência espacial americana, NASA, na década de 90 e hoje é operada em conjunto com a agência espacial francesa e conta com a colaboração de várias universidades e centros de pesquisas em vários países. Atualmente ela é composta por aproximadamente 800 fotômetros ópticos de superfície. Estes fotômetros ópticos automáticos fornecem dados obtidos em tempo quase real da profundidade óptica dos aerossóis (AOT) em distintos comprimentos de onda, distribuição de tamanho das partículas de aerossóis, e quantidade de água precipitável. A intensidade da componente direta da irradiância solar pode ser obtida a partir dos arquivos de dados utilizados para a obtenção da espessura óptica de aerossóis. As estações da rede AERONET instaladas em locais remotos e sem acesso a internet, realizam a transmissão dos dados coletados através de um sistema de transmissão de dados por meio de *transponders* a bordo de satélites geostacionários. A rede AERONET emprega radiômetros produzidos pela empresa CIMEL com 8 canais seletivos e mostrado na Fig. 4. Este radiômetro possui um campo de visão de  $1,2^\circ$  e dois detectores para medidas de radiância direta do sol e de radiância difusa da região da auréola e do céu (Holben et al., 1998).

Foram considerados apenas os dados de nível 2, que passaram por tratamento prévio e não apresentam contaminação nos resultados devido à presença de nuvens. Foram escolhidas estações que apresentavam disponibilidade de dados de nível 2 por período maior que 12 meses. A estação com maior disponibilidade de dados foi a de Alta Floresta (123 meses) e a menor a de Santiago (14 meses), sendo a média próxima de 63 meses. Os parâmetros atmosféricos para a estação denominada de “Atacama” foram obtidos através do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) instalado no satélite AQUA. O MODIS é um instrumento desenvolvido pelo GSFC (*Goddard Space Flight Center*) na NASA e possui 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de  $0,4$  a  $14,4 \mu\text{m}$  com resolução de 12 bits e capacidade de resolução espacial que varia de 250 a 1.000 metros de acordo com canal utilizado. Foram tratados os dados fornecidos pelo sensor

MODIS na grade definida por 22-23S e 67-68W. Esta região no deserto de Atacama foi determinada pois apresentava a maior quantidade de dados válidos (menor contaminação devido ao albedo da neve) durante o período analisado (2003-2009).

A Figura 3 apresenta os valores médios mensais e os desvios padrões para a espessura óptica de aerossóis nas regiões analisadas. Na Figura 4 são vistos os resultados obtidos para os valores médios mensais de água precipitável e seus desvios padrões.

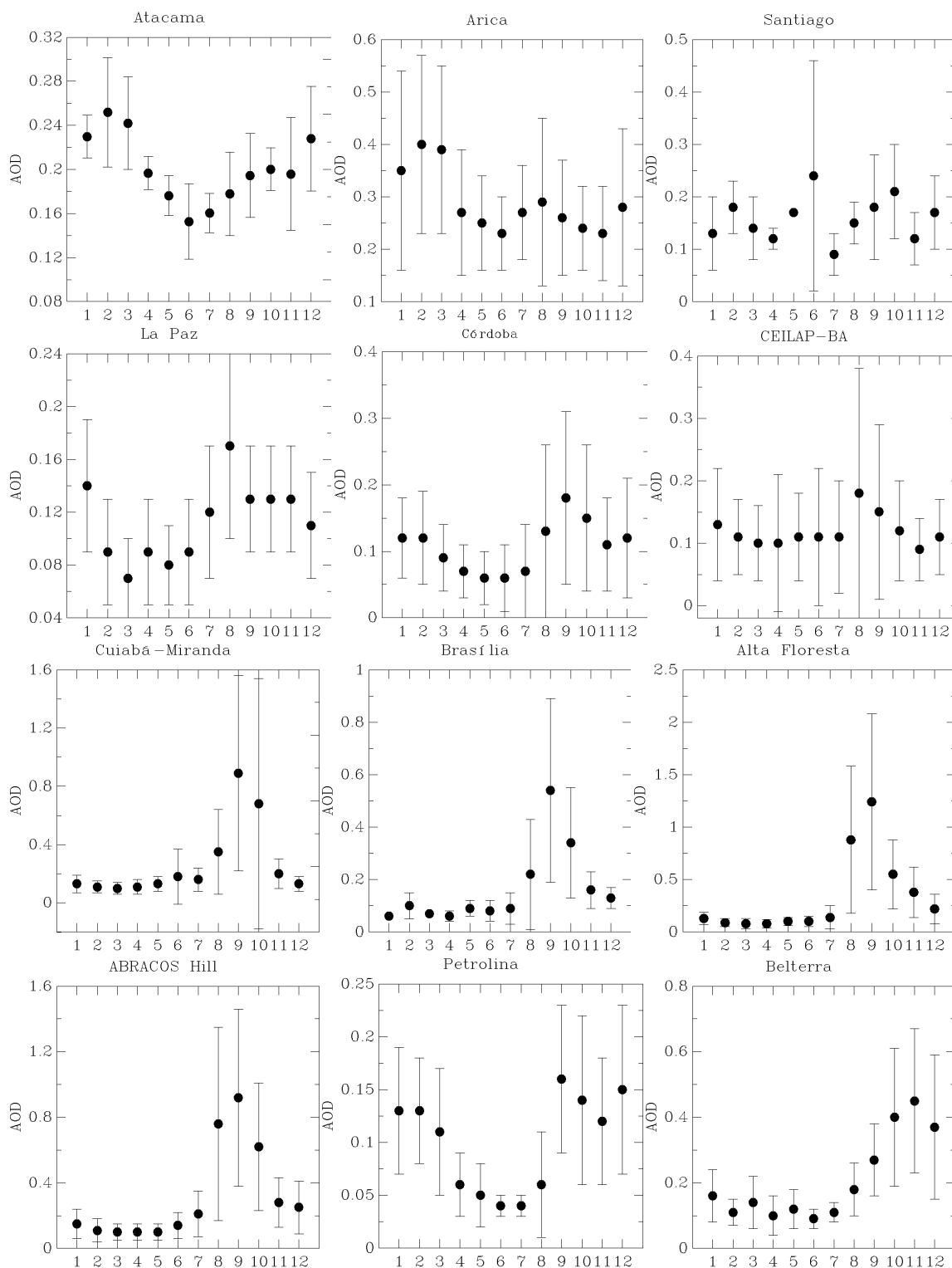


Figura 3: Valores médios mensais e respectivos desvios padrões para a espessura óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm nas regiões analisadas. A numeração no eixo horizontal representa o número do mês.

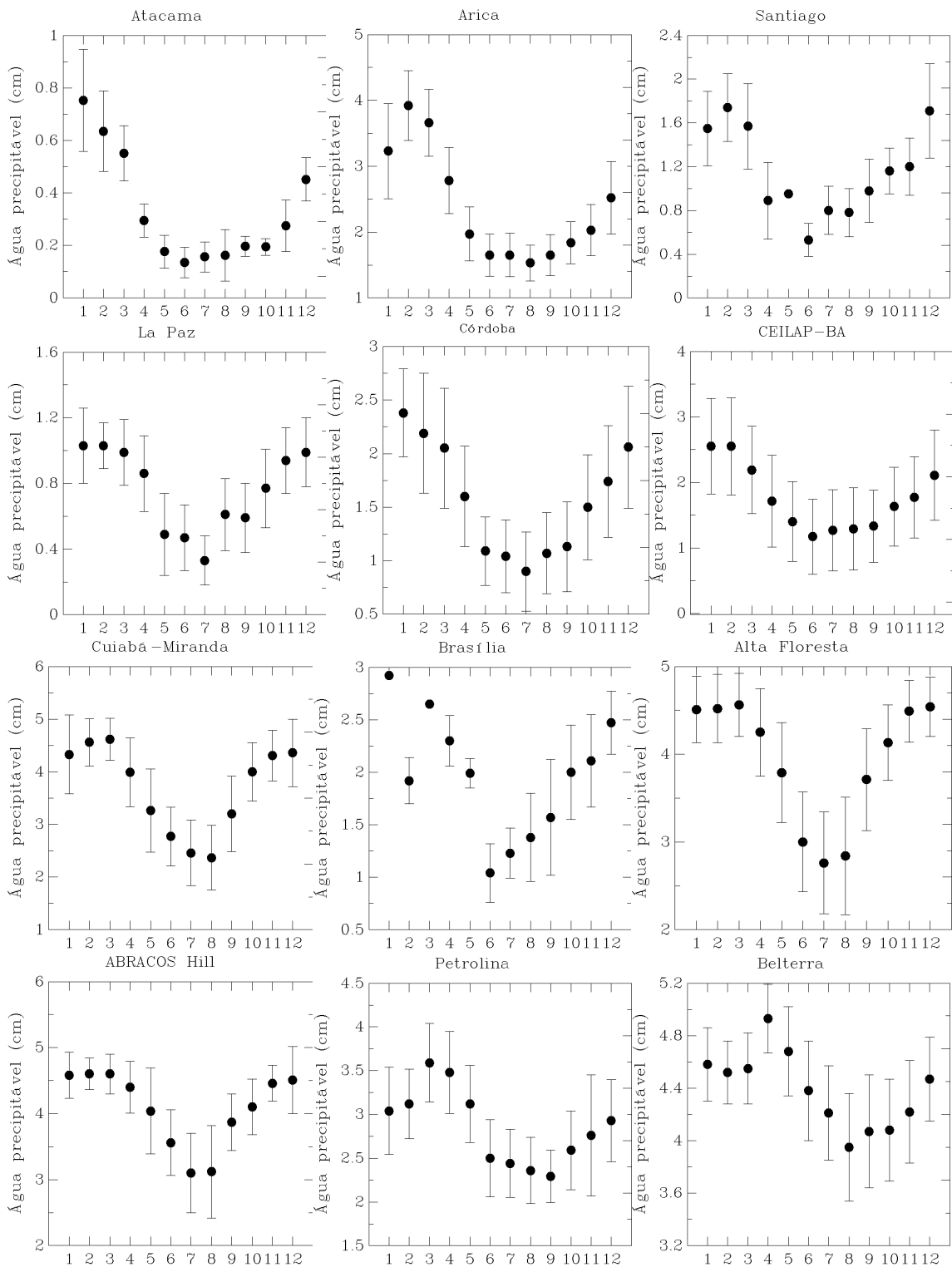


Figura 4: Valores médios mensais e respectivos desvios padrões para a coluna de água precipitável nas regiões analisadas. A numeração no eixo horizontal representa o número do mês.

Além do valor médio de AOD, foram analisadas as características do material particulado nas regiões estudadas. Os valores médios anuais para o expoente alfa de Ångström e o AOD estão mostradas na Figura 5. O expoente alfa de Ångström está relacionado com o tamanho médio das partículas de aerossóis. Valores baixos indicam aerossóis de tamanho elevado, enquanto valores altos estão correlacionados com partículas pequenas, geralmente oriundas da queima de biomassa.

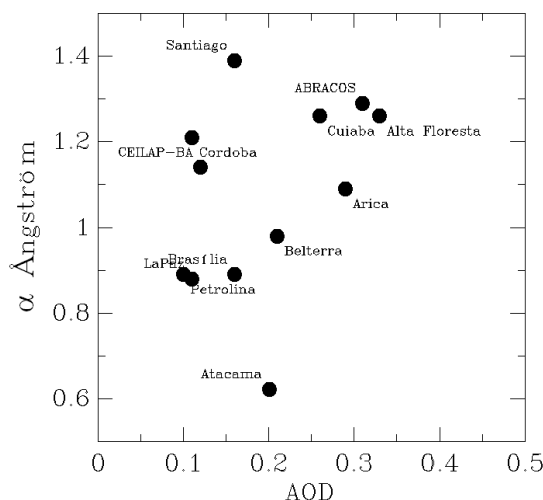


Figura 5: Valor médio anual para a espessura óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm (eixo horizontal) e expoente alfa de Ångström (eixo vertical) nas regiões analisadas.

A coluna total de ozônio para as regiões analisadas foi obtida empregando-se dados obtidos pelo sensor OMI (*Ozone monitoring Instrument*) a bordo do satélite AURA. A Figura 6 mostra a distribuição do valor médio anual para a coluna de ozônio sobre a América do Sul no ano de 2008. O conteúdo total de ozônio integrado numa coluna atmosférica mostrado na Figura 6 está expresso em *Unidades Dobson* (DU). Um DU é a espessura, medida em unidades de centésimos de milímetro, que a coluna de ozônio poderia ocupar na temperatura e pressão padrão (273K e 1 atm), logo 1 DU equivale a uma camada de O<sub>3</sub> com 0,01 mm de espessura.

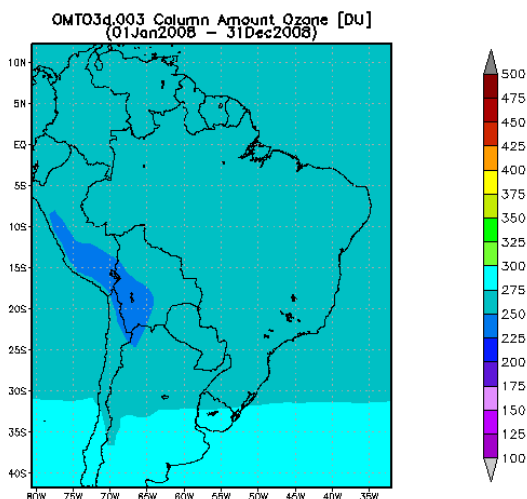


Figura 6: Valor médio anual para a coluna de ozônio sobre a América do Sul medida através do sensor OMI a bordo do satélite AURA.

Uma comparação direta entre os valores de AOD e água precipitável nas regiões analisadas com os valores existentes na norma ASTM G173-03 pode ser visualizada na Figura 7. Observa-se que os valores sugeridos pela norma americana G173-03 não são representativos para grande parte das regiões analisadas. Notadamente, o valor de AOD empregado na norma não corresponde com os encontrados na América do Sul. No entanto, as regiões de Córdoba, La Paz e Atacama possuem valores médios de água precipitável menor que o sugerido pela norma G173-03. Principalmente devido à queima de biomassa na região central e norte do continente sul-americano no período de baixa precipitação (entre julho-outubro) várias estações estudadas neste trabalho apresentam valores médios de AOD elevados, como pode ser verificado na Figura 3.

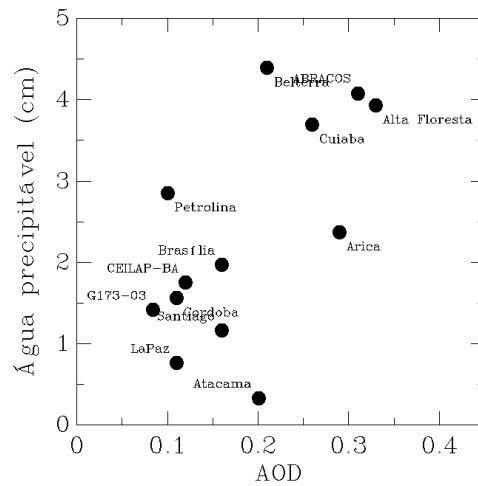


Figura 7: Valor médio anual para a espessura óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm (eixo horizontal) e coluna de água precipitável (eixo vertical) nas regiões analisadas.

### DIFERENÇAS ESPECTRAIS EM RELAÇÃO AO PADRÃO ASTM G173-03

A Figura 6 mostra as diferenças espectrais para 3 regiões analisadas em comparação com o espectro padrão adotado na norma ASTM G173-03. Para uma melhor visualização os espectros estão divididos em duas regiões, uma limitada entre 280 e 780 nm, correspondendo à região do ultravioleta e visível e outra entre 780 até 2500 nm, representando o segmento do infravermelho próximo. Estas diferenças espectrais foram simuladas através do programa de transferência radiativa SMARTS2 que também foi adotado como referência na execução da norma G173-03. Com exceção dos parâmetros atmosféricos analisados previamente (aerossóis, água precipitável e ozônio) os demais parâmetros (massa de ar, ângulo de inclinação, etc.) foram os mesmos utilizados para a formulação do espectro padrão. Observa-se um maior desvio na região do ultravioleta devido ao efeito de espalhamento causado pela maior espessura de aerossóis. As diferenças causadas pela quantidade de água precipitável são marcantes na região do infravermelho onde o vapor de água possui várias bandas com forte absorção.

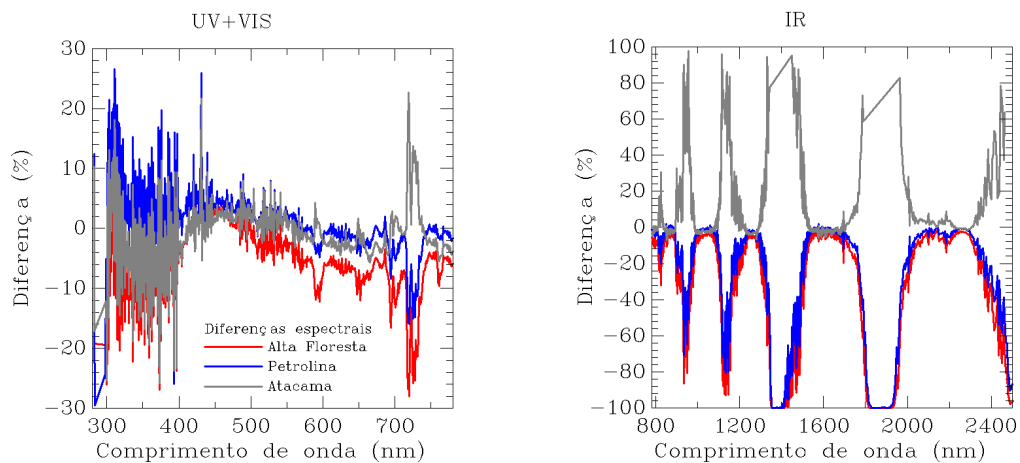


Figura 8: Diferenças espectrais entre o espectro padrão ASTM G173-03 e o espectro típico para as regiões de Alta Floresta, Petrolina e Atacama. À esquerda são visualizadas as diferenças entre 280 e 780 nm, enquanto à direita, é mostrado o espectro entre 780 e 2500 nm.

### CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise climatológica dos principais parâmetros atmosféricos que alteram a distribuição espectral da irradiância solar. Observa-se que a queima de biomassa na região central e norte do continente provoca uma elevação nos valores médios anuais para a espessura óptica de aerossóis em grande parte das regiões analisadas. Como esperado, estações próximas à região amazônica possuem uma média anual elevada para os valores de água precipitável, enquanto as estações situadas próximas à cordilheira dos andes têm valores baixos deste constituinte atmosférico. Os resultados obtidos revelam que o espectro padrão sugerido pela norma norte americana ASTM G173-03 pode não ser representativo para as condições encontradas em grande parte da América do Sul.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Enio Bueno Pereira (CPTEC/INPE) e Brent N. Holben (NASA) pelos seus esforços em desenvolver e manter as estações das redes SONDA e AERONET utilizadas neste trabalho. Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq pertencentes ao edital MCT/CNPq 27/2007 e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

## REFERÊNCIAS

- Araki K. e Yamaguchi M. (2003). Influences of spectrum change to 3-junction concentrator cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 75, 707-714.
- Case M.A., Owusu Y.A., Chapman H., Dargan T. e Ruscher P. (2008). On the matter of proposed new low-latitude solar reference spectra. *Renewable Energy* 33, 2645-2652.
- Gottschalg R, Infield D.G. e Kearney M.J. (2003). Experimental study of variations of the solar spectrum of relevance to thin film solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 79, 527 – 537.
- Gueymard C.A. (2007). Latitude and climate dependent optimal siting and spectral effects of concentrating PV technologies: preliminary analysis. Workshop on Concentrating Photovoltaic Optics and Power. Marburg, Alemanha.
- Haag R. e Krenzinger A. (2008). Análise da influência de parâmetros atmosféricos e locais na distribuição espectral da radiação solar. Congresso Brasileiro de Energia Solar, Florianópolis. Anais do II Congresso Brasileiro de Energia Solar.
- Haag R. e Krenzinger A. (2010). Estimativa da distribuição espectral da radiação solar no Brasil utilizando modelos de transferência radiativa e análise multiinstrumental: satélite, radiômetros em superfície e radiossondagem. Trabalho aceito para publicação no III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, PA.
- Holben B.N., Tanre D., Kaufman Y, Smirnov A., Eck T., Slutsker I., Dubovik O., Markham B., e Abuhassan N. (1998). Atmospheric aerosol optical properties measured through the NASA Aerosol Robotic Network (AERONET). International Aerosol Symposium, St.Petersburg, Russia, July 6-9.
- Martins F. R., Guarnieri R.A., Chagas R.C., Neto S.L.M., Pereira E.B., Andrade E. e Thomaz C. (2007). Projeto SONDA – rede nacional de estações para coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar Fortaleza, 8 a 11 de abril.

## ABSTRACT

This work presents an estimation of the spectral distribution of the solar irradiance in Earth surface in different South America regions. There are used data obtained by AERONET (Aerosol RObotic NETwork) and SONDA (System of National Organization of Environmental Data) stations and through sensors carried on board of satellites for getting the principal atmospheric parameters that alter the spectral distribution of the solar radiation. The computational model of atmospheric radiative transfer SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) was employed to evaluate the solar spectral irradiance between 280 – 4000 nm. Some spectral typical distributions for the analyzed regions are compared with the adopted by the American Standard ASTM G173-03.

**Keywords:** solar energy, technology and education.