

## Estudo da caracterização de um fotômetro solar CIMEL 318-1

Marcos Cavalcante de Melo<sup>1,2</sup>  
Ruy Morgado de Castro<sup>1</sup>  
Edson de Aquino Barros<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Estudos Avançados - IEAv  
Caixa Postal 6044 - 12228-001 – São José dos Campos - SP, Brasil  
{cavalcante, rmcastro, aquino}@ieav.cta.br

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho – UNESP  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG  
Caixa Postal 205 – 12516-410 - Guaratinguetá - SP, Brasil

**Abstract.** In this work, we studied the characterization of the sun photometer CIMEL 318-1 using the Langley's method. This equipment belongs to the Laboratory of Radiometry and Characterization of Electrooptic Sensors IEAv-DCTA. It is used to estimate various atmospheric parameters (optical depth). Considering the components in the atmosphere influence on data supplied by sensor systems, the information generated by this photometer is necessary to effect the correction of these data. Nevertheless, for the sun photometer to be used to estimate those parameters it is necessary to characterize it first. One way to do it is by using the Langley's method, where the value of the linear coefficient  $V_{0\lambda}$  was determined. For this purpose we used the information pertinent to direct solar irradiance data collected in 2010 for the region of São José dos Campos where the equipment is in operation. Thus we obtained the values of  $V_{0\lambda}$  for bands 1020 nm, 870 nm, 670 nm and 440 nm with their respective uncertainties through the method of ordinary least squares method in matrix form. Further in this work, we evaluated the quality and compatibility of that statistical method with experimental data by displaying the behavior of the function set and calculating the reduced chi-square.

**Palavras-chave:** remote sensing, sun photometer, atmospheric parameters, Langley's method, sensoriamento remoto, fotômetro solar, parâmetros atmosféricos, método de Langley.

### 1. Introdução

Atualmente, em Sensoriamento Remoto, o desenvolvimento de metodologias de calibração dos sistemas imageadores vem ganhando importância, pois desta forma se torna possível obter e tratar os dados de forma quantitativa.

Esta tarefa pode ser realizada com o uso da caracterização espectral e radiométrica feita inicialmente em laboratório, com todas as condições de medição bem definidas e controladas, porém as condições de uso do sensor são bem diferentes destas encontradas no laboratório. Para isto, é importante verificar, com certa frequência, se as caracterizações continuam válidas, realizando uma caracterização deste sensor em campo.

Souza (2003) afirma que a caracterização em campo se torna necessária, pois o sensor, ao imagear um determinado local, registra um valor digital correspondente à radiação solar refletida pelo alvo, localizado na superfície terrestre. Mas para que tal valor digital represente de fato uma grandeza que forneça características do alvo, alguns fatores devem ser considerados, dentre eles, a influência dos componentes atmosféricos.

Segundo Sayão (2008), a radiação solar ao penetrar na atmosfera terrestre sofre interações com os constituintes presentes, o que pode resultar em seu espalhamento ou na sua absorção, o primeiro pode gerar uma atenuação e o segundo na mudança da direção do feixe da radiação solar incidente impedindo que chegue à superfície terrestre. Os principais constituintes causadores do espalhamento são o oxigênio e nitrogênio, e os responsáveis pela absorção são o ozônio, vapor d'água e aerossóis.

O estudo da influência pode ser feito a partir medidas da irradiância solar em determinados comprimentos de onda, na qual, conforme Echer e Souza (2001), a Lei de atenuação de Beer-Lambert-Bouguer descreve tal fenômeno como a atenuação exponencial do feixe da radiação eletromagnética incidente:

$$E_{\lambda} = E_{0\lambda} \cdot e^{-\tau_{\lambda} \cdot m} \quad (1)$$

onde:  $E_{\lambda}$  é o valor da irradiância solar na superfície, para um determinado comprimento de onda  $\lambda$ ;  $E_{0\lambda}$  é a irradiância solar no topo da atmosfera terrestre (exoatmosfera);  $\tau_{\lambda}$  é a profundidade óptica total da atmosfera; e  $m$  é a massa óptica, que é uma grandeza adimensional, relativa, que determina o caminho percorrido pela radiação solar ao penetrar na atmosfera.

Segundo Rollim (2000), o  $\tau_{\lambda}$  pode ser determinado como a soma das profundidades ópticas dos componentes que mais influenciam a transmitância da radiação eletromagnética na atmosfera. Assim, temos:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{aerossóis, \lambda} + \tau_{Rayleigh, \lambda} + \tau_{O_3, \lambda} + \tau_{NO_2, \lambda} + \tau_{H_2O, \lambda} \quad (2)$$

onde:  $\tau_{\lambda}$  é a espessura óptica total;  $\tau_{aerossóis, \lambda}$  é a espessura óptica dos aerossóis;  $\tau_{Rayleigh, \lambda}$  é o valor do espalhamento de Rayleigh;  $\tau_{O_3, \lambda}$  e  $\tau_{NO_2, \lambda}$  é a atenuação das interações com o ozônio e dióxido Nitrogênio, respectivamente;  $\tau_{H_2O, \lambda}$  é a atenuação correspondente ao vapor d'água presente na atmosfera.

A massa óptica,  $m$ , pode se calculada, conforme Osterwald (2000), por meio de:

$$m = \frac{P}{101,235} \cdot [\cos \theta_z + 0,15(39,885 - \cos \theta_z)^{-1,253}]^{-1} \quad (3)$$

onde:  $P$  é a pressão atmosférica local, em milibar ( $mB$ );  $\theta_z$  é o ângulo zenital solar.

O ângulo zenital solar ou distância zenital,  $\theta_z$ , é uma coordenada horizontal local a qual fornece o ângulo que Sol faz com o ponto onde a vertical do lugar intercepta a esfera celeste (zênite), que pode ser, conforme Kepler e Saraiva (2003), determinado pela equação:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos H \quad (4)$$

onde:  $\delta$  é a declinação solar que é o ângulo medido sobre o meridiano do Sol, o qual depende basicamente do dia do ano;  $\varphi$  é a latitude do local onde se realiza a medição;  $H$  é ângulo horário, que é o ângulo medido sobre o equador passando pelo mediano do Sol.

Rollim (2000), afirma que uma forma de obter os parâmetros atmosféricos é acompanhar, com um fotômetro solar, a irradiância solar direta. Em geral, os fotômetros solares captam a radiação solar, transformando-a (por meio de circuitos eletrônicos) em um sinal de tensão, que por sua vez é convertido em um valor digital, deste modo a equação 1 pode ser reescrita como:

$$V_{\lambda} = \frac{V_{0\lambda}}{D^2} \cdot e^{-\tau_{\lambda} \cdot m} \quad (5)$$

onde:  $V_{\lambda}$  é o valor de “tensão” proporcional a irradiância solar direta, para um determinado comprimento de onda;  $V_{0\lambda}$  é uma constante a ser determinada, que é proporcional a “tensão” obtida pelo fotômetro, correspondente a irradiância média anual no topo da atmosfera; e  $D$  é distância entre a Terra e Sol, em Unidades Astronômicas (U. A).

O valor da Distância entre o Sol e a Terra ( $D$ ) foi necessário, pois como a órbita a Terra em relação ao sol é aproximadamente uma elipse seu valor não permanece constante ao longo do ano, assim o valor irradiância solar deve ser corrigido devido a este fato, como afirma Souza (2003). O valor desta distância pode ser calculado, segundo Osterwald (2000), por:

$$D = 1,00011 + 3,4221 \times 10^{-2} \cdot \cos A_d + 1,28 \times 10^{-3} \cdot \sin A_d + 7,19 \times 10^{-4} \cdot \cos 2A_d + 7,7 \times 10^{-5} \cdot \sin 2A_d \quad (6)$$

onde:  $A_d$  é o dia angular calculado por:

$$A_d = (J_d - 1) \cdot \frac{2\pi}{365} \quad (7)$$

onde:  $J_d$  é o dia no ano.

No entanto, para que o fotômetro solar seja utilizado para estimar tais parâmetros atmosféricos (espessuras ópticas), para verificar as influências em dados de sensoriamento remoto, é necessário primeiramente caracterizá-lo, ou seja, determinar o valor de  $V_{0\lambda}$ . Uma forma de realizar tal tarefa é utilizando Método de Langley (Rolim, 2000).

Neste método é avaliado o comportamento dos dados,  $V_\lambda$ , obtidos pelo fotômetro solar em função dos valores da massa óptica,  $m$ . Para isto deve-se calcular o logaritmo neperiano da expressão 5, para que forneça uma equação linear:

$$\ln(V_\lambda \cdot D^2) = \ln(V_{0\lambda}) - \tau_\lambda m \quad (8)$$

Assim por meio de ajuste de uma reta, a dados experimentais, determina-se o valor da espessura óptica total ( $\tau_\lambda$ ) que corresponde ao coeficiente angular, e do  $V_{0\lambda}$ , que é o coeficiente linear (obtido por uma extrapolação para  $m = 0$ ).

No Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos do IEAv-DCTA, o fotômetro solar disponível é o modelo CE 318-1 da CIMEL, o qual possui bandas espectrais específicas que permitem a obtenção de dados relativos a aerossóis, ozônio, vapor d'água, etc. Esse dados são utilizados para efetuar a correção atmosférica, necessária para a caracterização de sistemas sensores. Entretanto, para este fim, é necessário primeiramente que o próprio fotômetro esteja caracterizado.

Este modelo de equipamento também é usado por diversas instituições pelo mundo, fazendo parte da rede AERONET (*AEROSOL ROBOTIC NETWORK*), com o objetivo de monitorar diversos tipos de aerossóis e o seu impacto nas mudanças climáticas globais. Castanho (2005) afirma que esta rede é coordenada pela NASA, sendo que uma vez por ano, todos os fotômetros são caracterizados por meio de uma inter-calibração com um instrumento de referência, que realiza medidas no observatório de Muama Loa (localizado no Hawaii), este, por sua vez, é caracterizado pelo método de Langley.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é estudar a caracterização do fotômetro solar CIMEL 318-1, em especial, para a região de São José dos Campos. Com isto, neste trabalho, foram usadas somente as informações relativas a irradiância solar direta, utilizando o método de Langley, o qual consistiu em obter o  $V_{0\lambda}$  relativo a todas as bandas. Deste modo, foi utilizado o Método dos Mínimos Quadrados na forma matricial afim de que os parâmetros das retas fossem ajustados.

## 2. Metodologia de Trabalho

O CE 318-1 realiza medições da irradiância solar direta e difusa, em 5 bandas espectrais (440, 670, 870, 936 e 1020 nm). O equipamento foi instalado em um local onde pusesse medir a irradiância solar direta e difusa sem obstáculos entre o mesmo e o Sol. Devido a necessidade de acesso ao equipamento decidiu-se que, para essa fase do estudo, o IEAv seria conveniente. O IEAv está localizado próximo a zona urbana de São José dos Campos –SP, a uma altitude de aproximadamente 650 m.

No entanto, a caracterização desses fotômetros deve ser feita por medições, desde o nascer do Sol, até o seu ocaso, sendo que a espessura óptica total deve ser constante ao longo do dia (Castanho 2005). Para isso, os locais elevados e sem interferência humana seriam mais apropriados.

Depois de instalado, o CIMEL 318-1 realiza, automaticamente, um conjunto de medições de irradiância solar direta e difusa, em horários pré-estabelecidos. Especificamente para a irradiância direta, cada conjunto de medições é composto por três valores de tensão, para cada banda. Os dados obtidos são transferidos diariamente para um microcomputador localizado próximo ao equipamento.

Neste trabalho, foram analisados os dados da radiância direta, coletados no ano de 2010 nas bandas de 1020, 870, 670 e 440 nm. Em um estudo posterior, será feita uma análise da banda 936 nm, que fornece informações sobre a concentração de vapor d'água, bem como dos dados obtidos em anos anteriores.

Para a análise foram selecionados os dados obtidos quando o dia apresentava, visualmente, um "céu limpo". Para estes dados é realizado o cálculo da média, do desvio padrão e do desvio padrão da média das tensões para que fossem utilizados em uma análise estatística. Em seguida, os dados da tensão são plotados em função do horário da medição. Deste modo, quando o comportamento destes gráficos era de uma curva suave, esses eram selecionados para uma análise quantitativa (estatística).

Em alguns conjuntos de medições, foram encontrados desvios padrões com valores elevados, o que destoava do conjunto de dados, isso revelava que os três valores de tensão medidos eram "distintos". Uma explicação para tal fato pode ser pela presença de uma nuvem no momento da medição ou mesmo por algum obstáculo momentâneo. Entretanto esta hipótese não pode ser confirmada, pois não havia nenhum monitoramento para que a confirmasse. Desta maneira, os dados que apresentaram tal comportamento, desvios padrões 5 vezes maiores que os demais, foram descartados na análise.

Para o restante do tratamento dos dados foi necessário elaborar uma rotina em programação "C" que realizasse a leitura automática dos dados do fotômetro e efetuasse os cálculos descritos, equações 3 a 8, para cada conjunto de medições. Em especial, para obter o ângulo zenital, foi utilizada uma rotina desenvolvida por Reda e Andreas (2008), que fornece valores precisos para este parâmetro, visto que um valor impreciso do ângulo zenital acarreta em erros significativos no valor na massa óptica, como pode ser observada na expressão 3.

Agora, de forma quantitativa, foi analisado o comportamento dos gráficos de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  em função de  $m$  dos dias selecionados, que devem possuir um comportamento linear. Desta maneira, foi ajustada uma reta aos dados experimentais utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ). A partir desta reta, foi feita a análise do comportamento dos resíduos, que segundo Helene (2006), determinam a diferença de cada ponto com o valor ajustado. Espera-se que esta flutuação seja aleatória, o que nem sempre ocorre, pois em alguns casos os resíduos apresentam um comportamento tendencioso. Assim, quando era obtido um comportamento tendencioso, os dados eram descartados.

Após esta análise quantitativa, os dias foram selecionados para a utilização do Método dos Mínimos quadrados da forma matricial (Helene, 2006). Este método permite ajustar simultaneamente um único  $V_{0\lambda}$  e valores de  $\tau_\lambda$  para todos os dias selecionados. Assim, considerando que a equação da reta (8) pode ser reescrita em uma forma matricial, conforme Helene (2006), como:

$$\vec{Y} = \vec{p} \cdot \mathbf{X} \quad (9)$$

onde: O  $\mathbf{Y}$  é o vetor de dados que contém os valores de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$ ;  $\vec{p}$  é a matriz de parâmetros, no qual contém o valor de  $V_{0\lambda}$  e os valores de  $\tau_\lambda$  para cada dia;  $\mathbf{X}$  é a matriz de planeamento.

Segundo Helene (2006), o vetor parâmetro,  $\vec{p}$ , pode ser obtido por:

$$\vec{p} = (\mathbf{X}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{X}) \cdot (\mathbf{X}^T \mathbf{V}^{-1} \vec{Y}) \quad (10)$$

onde:  $\mathbf{V}$  é a matriz variância dos dados.

A matriz de variância,  $\mathbf{V}$ , é obtida propagando-se as incertezas em  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$ , ou seja:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_Y + \mathbf{V}_{XY} \quad (11)$$

onde:  $\mathbf{V}_Y$  é a matriz variância levando em consideração as incertezas estimadas em  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$ ;  $\mathbf{V}_{XY}$  é a matriz variância em  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  devido as incertezas estimadas na massa óptica,  $m$ .

Uma vez realizado o ajuste pelo MMQ é necessário verificar a sua qualidade, sua compatibilidade com os dados experimentais. Para isto, além de visualizar o comportamento da função ajustada com os dados no gráfico, pode-se calcular o valor do qui-quadrado reduzido, como afirma Helene (2006).

### 3. Resultados e Discussão

Inicialmente foram selecionados para análise apenas os dados de 13 períodos que apresentavam, visualmente, “céu claro”. Com estes dados foi realizada a análise qualitativa, onde era verificado o comportamento dos dados de tensão em função do horário da medição. Um exemplo de um período selecionado pode ser visto na figura 1A, onde se pode observar o comportamento exponencial da tensão média na banda de 870nm. Em contrapartida, dias que não apresentaram um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 1A foram descartados.

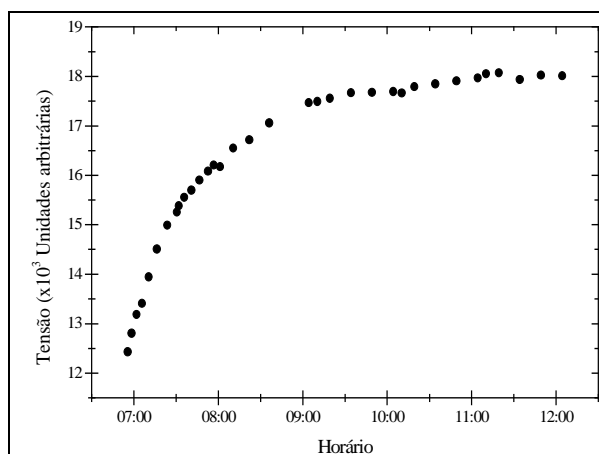


Figura 1A: Gráfico da tensão medida na banda 870nm em função do horário no dia 01/09/2010 à tarde.

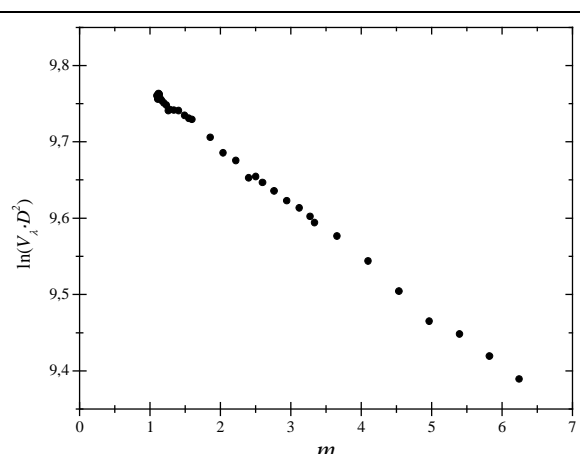


Figura 1B: Um exemplo referente ao dia 01/09/2010 que mostra um comportamento que se aproxima de uma reta. Comentário sobre as incertezas.

Em seguida foram calculados os valores de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  e massa óptica,  $m$ . Na Figura 1B pode ser observado um gráfico de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  em função de  $m$  (ver equação 8). Os valores das incertezas de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  foram obtidos pela propagação do desvio padrão da média dos valores de tensão. Para a estimativa das incertezas em  $m$ , foram consideradas duas fontes de incerteza: 1) uma de 0,5% da massa óptica, correspondente a precisão nos cálculos de  $m$ . Este valor foi estimado a partir dos estudos de Kasten (1989), no qual afirma que a incerteza da massa óptica, utilizando a equação 3, é menor que 0,5%; 2) a outra por uma estimativa baseada no ajuste do horário no fotômetro, que foi estimado em 30 segundos, cujo impacto na

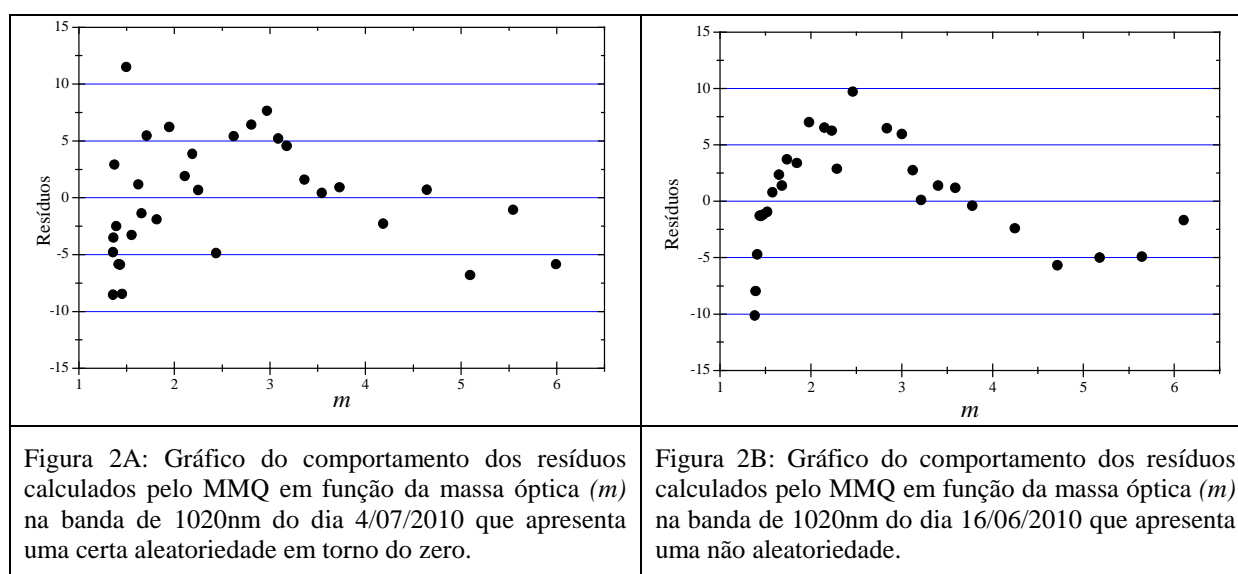
massa óptica varia durante o dia. Desta forma, a incerteza final,  $\sigma_m$ , em  $m$  foi calculada pelo somatório destas duas estimativas como:

$$\sigma_m = \sqrt{(0,005m)^2 + (-0,00384 - 0,000937m + 0,00174m^2)^2} \quad (12)$$

Então as incertezas em  $m$  foram propagadas para  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$ . Com estes dados foram realizados ajustes, de uma reta pelo MMQ, para cada banda e para cada período de medição.

Com os parâmetros ajustados, foi feita a análise do comportamento dos resíduos, em que se esperava que os resíduos apresentassem uma flutuação “aleatória”. Na Figura 2, podem ser observados dois exemplos com comportamentos distintos, ambos da banda de 1020nm, dos resíduos. A Figura 2A, do dia 4/07/2010, apresenta um comportamento mais aleatório e o 2B, do dia 16/06/2010, apresenta uma forma tendenciosa, sugerindo, conforme mencionado anteriormente, que a profundidade óptica total da atmosfera ( $\tau_\lambda$ ) varia ao longo do período. Com isso, foram selecionados para o ajuste como MMQ na forma matricial, os períodos que mostraram um comportamento aleatório dos resíduos. Em resumo, os períodos foram: 4/7/2010, 30/8/2010, 1/9/2010 e 12/9/2010.

Esperava-se também que os valores dos resíduos estivessem concentrados entre -3 e 3, para um conjunto de aproximadamente 30 dados. Como os valores obtidos são bem superiores (ver Figura 2) tem-se a indicação que: 1) as incertezas foram subestimadas; ou 2) a função ajustada não seja a mais adequada. A segunda hipótese é a mais provável e será comentada adiante.



Desta forma, utilizando o Método dos Mínimos quadrados da forma matricial, foram obtidos os valores de  $V_{0\lambda}$  para cada banda, apresentados na Tabela 1, juntamente com as incertezas correspondentes, bem como os valores do qui-quadrado reduzido obtido no ajuste.

Bandas	$V_0$	$\sigma_{V_0}$	Incerteza relativa (%)	qui-quadrado reduzido
1020nm	12544	7	0,053	127
870nm	18601	8	0,042	89
670nm	26609	24	0,089	50
440nm	13657	17	0,125	61

Tabela 1: Contém os valores de  $V_{0\lambda}$  para cada banda, suas incertezas e do qui-quadrado reduzido obtido utilizando o método dos mínimos quadrados da forma matricial.

Pode se verificar que os valores do qui-quadrado reduzido foram muito maiores que um, indicando, novamente, que: ou as incertezas podem ter sido subestimadas; ou que a função utilizada não seja a mais indicada para representar o conjunto de dados.

Tendo em vista que as medições foram realizadas na cidade de São José dos Campos, em uma zona urbana, existe uma possibilidade significativa que os valores de  $\tau_\lambda$ , ou seja, que os parâmetros atmosféricos, não sejam constantes ao longo do dia. Com isto, o comportamento de  $\ln(V_\lambda \cdot D^2)$  em função de  $m$  não poderia ser descrito apenas por uma reta, como estabelece o método de Langley. Assim, este pode ser o principal motivo para que o valor de qui-quadrado reduzido fosse tão elevado.

Para melhorar a caracterização do fotômetro solar, já obtida, seria interessante aprimorar o modelo existente (método de Langley), incluindo termos/coeficientes que pudessem representar a variação dos parâmetros atmosféricos. Para isto seria necessário acompanhar simultaneamente, com outros equipamentos, os parâmetros atmosféricos, próximos ao local de medição.

Além disso, outra forma de obter uma caracterização mais adequada seria realizar medições em locais onde a atmosfera não fosse tão influenciada com a atividade humana, ou seja, com poluição e etc. Espera-se que em locais com altitudes elevadas esta condição possa ser atendida.

#### 4. Conclusões

Neste trabalho, foi realizado o estudo da caracterização de um fotômetro solar CIMEL 318-1A, com os dados coletados no ano de 2010, utilizando o método de Langley, com o qual, foram obtidos os valores de  $V_{0\lambda}$  para as bandas 1020 nm, 870 nm, 670 nm e 440 nm, com as suas respectivas incertezas, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados na forma matricial. Também foi possível verificar que o método estatístico aplicado se mostrou robusto e confiável.

Porém, foi verificado um valor elevado do qui-quadrado reduzido obtido no ajuste. Fato que indica que os dados não se comportam linearmente, já que para que isso ocorresse o valor da espessura óptica,  $\tau_\lambda$ , deveria ser constante ao longo do dia. Fato que não deve ocorrer em uma zona urbana como São José dos Campos. Então, se torna conveniente tentar realizar tal estudo em outro local, onde se espera que o  $\tau_\lambda$  seja constante ao longo do dia, ou aprimorar o modelo existente para representar a variação destes parâmetros.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a todos da Divisão de Geo-Inteligência – IEAV que colaboram diretamente ou indiretamente com este trabalho.

#### Referências Bibliográficas

- Castanho, A.D.A, Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo. 2005. 131 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.
- Echer, E.; Souza, M. P.; Schuch N. J. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre, **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p.276-283, 2001.
- Helene, O. A. M., **Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial**, Editora Livraria da Física, 2006.
- Kasten, F; Toung, A.T. Revised optical mass table and approximation formula, **Applied Optics**, v. 28, n. 22 p.4735-4738, 1989.

Kepler, S.O; Saraiva,M.F.O. **Astronomia e Astrofísica**, 2003, Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/trigesf>. Último acesso em 09/11/2010.

Ostewald. C.R. Spectroradiometric Sun Photometry, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 17, p.1171-1188, 2000.

Reda, I;Andreas, A. **Solar Position Algorithm for solar radiation applications** , National Renewable Energy Laboratory, 2008, NREL/TP – 560-34302, Disponível em <http://studioiacovoni.org/documenti/spa.pdf>. Último acesso em 09/11/2010.

Rolim. E. M. **An Introduction to the use of Sun-photometer for the atmospheric correction of airborne sensor data**, 2000, Disponível em <http://www.ncaveo.ac.uk/site-resources/pdf/cimel.pdf>. Último acesso em 09/11/2010.

Sayão, A.C. Estudo da variabilidade sazonal da profundidade óptica do aerossol em São Paulo a partir de radiômetros MFRSR. 2008. 131 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

Souza. P.E.U. Calibração Radiométrica da Câmera CCD/CBERS-1. 2003. 160 p. (INPE-5522-TDI/519). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.