



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Metodologia para validação de dados coletados por espectrofotômetros Brewer*

Jaime Rodriguez Coariti¹, José Henrique Fernandez², Maria Helena Constantino Spyrides³, Marcelo de Paula Corrêa⁴, Neusa Paes Leme⁵, George Ulguim Pedra⁶, Francisco Raimundo da Silva⁷

¹ Doutorando em Ciências Climáticas, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. jrc912@gmail.com (autor correspondente). ² Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. E-mail: jhenrix@gmail.com. ³ Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil. E-mail: mhspyrides@gmail.com. ⁴ Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil. E-mail: mpcorrea@gmail.com. ⁵ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Centro Regional do Nordeste Natal, RN, Brasil. E-mail: neusa_paesleme@yahoo.com.br. ⁶ Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, DF, Brasil. E-mail: gupbadabum@gmail.com. ⁷ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Centro Regional do Nordeste Natal, RN, Brasil. E-mail: fraimundom@hotmail.com.

Artigo recebido em 15/09/2017 e aceite em 20/02/2018

RESUMO

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) monitora fluxos da Radiação Ultravioleta (R-UV), em solo, desde 1990, através de uma rede de espectrofotômetros *Brewer* no Brasil, Bolívia, Chile e Antártida. O espectrofotômetro é reconhecido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e pelo programa “*Global Atmosphere Watch*” (GAW) como padrão para medições de ozônio e R-UV. O objetivo deste trabalho é descrever e avaliar o funcionamento do instrumento no processo de coleta da R-UV, ao mesmo tempo em que apresenta metodologia desenvolvida para validação de dados referentes ao período de 1997 a 2012 nas cidades de La Paz, Bolívia e Natal, Brasil. Avaliou-se o funcionamento da parte óptica com destaque nas Lâmpadas Padrão (SL) dos espectrofotômetros. Observaram-se desgastes naturais no funcionamento dos instrumentos. Utilizou-se o modelo matemático de transferência radiativa TUV “*Tropospheric Ultraviolet Visible Model*” para simular uma base de dados do índice de radiação ultravioleta (IUV). Por meio de análise de regressão linear entre as duas bases, realizou-se o ajuste da série temporal do *Brewer* (variável preditora) por meio da série temporal do TUV (variável resposta). Este *review* apresenta algoritmo para validação dos registros e um roteiro para a pré-análise dos dados coletados.

Palavras-chave: Radiação Ultravioleta, Espectrofotômetro Brewer, Tropospheric Ultraviolet Visible Model.

Data validation methodology for Brewer Spectrophotometer operating

ABSTRACT

The National Institute for Space Research monitors the fluxes of Ultraviolet Radiation (R-UV) on ground, since 1990, through a network of Brewer Spectrophotometers in Brazil, Bolivia, Chile and Antarctica. The spectrophotometer is recognized by the World Meteorological Organization (WMO) and the program Global Atmosphere Watch (GAW) as the standard for ozone and R-UV measurements. The objective of this work is to describe and evaluate the operation of the Brewer in the process of collecting R-UV, at the same time that it presents methodology developed for data validation for the period from 1997 to 2012 in the cities of La Paz, Bolivia and Natal, Brazil. Evaluation the operation of the optical part with highlight in the Standard Lamps (SL) of Spectrophotometers. Natural wear in the operation of the instruments were observed. The mathematical model of radiative transference of the Tropospheric Ultraviolet Visible Model (TUV) to simulate an IUV database. By means of linear regression analysis between the two bases, the time series of the Brewer (predictor variable) was adjusted by means of the TUV time series (response variable). This review presents an algorithm for validation of its records and a routine for the pre-analysis of the collected data.

Keywords: Ultraviolet Radiation, Brewer Spectrophotometer, Tropospheric Ultraviolet Visible Model.

Introdução

O Espectrofotômetro Brewer é um instrumento sofisticado desenvolvido para realizar medições da intensidade da radiação ultravioleta (R-UV),

concentração da coluna total de ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂) (Kirchhoff, 2000; Silva, 2002). É reconhecido pela “*World Meteorological*

* Trabalho extraído da tese de doutorado “Radiação Ultravioleta Solar e saúde humana nas cidades de La Paz – Bolívia e Natal – Brasil” do Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da UFRN - Natal, RN.

Organization” (WMO) e pelo programa “Global Atmosphere Watch” (GAW) como instrumento

padrão para medições de ozônio e R-UV (SCI-TEC, 1995; SCI-TEC, 1999; Zamorano, 2003).



Figura 1. Espectrofotômetro Brewer: (a) em La Paz–Bolívia, no laboratório de física da “Universidad Mayor de San Andrés” e (b) em Natal – RN, Brasil, no Laboratório do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Regional Nordeste.

Na estrutura interna do instrumento, todas as peças de alumínio são anodizadas em preto para minimizar a dispersão da luz. Além disso, há um sistema de aquecimento e/ou ventilação e um sensor de umidade que possibilita melhor desempenho e precisão no funcionamento do equipamento, regulando sua temperatura interna e possibilitando o uso sob diferentes condições ambientais. O espectrofotômetro é composto por três partes: 1) *óptica* representada por um conjunto de lentes, rede de difração, filtros e lâmpadas padrão; 2) *elétrica*, representada por painéis de controle que monitoram e ajustam a parte óptica, e, 3) *computacional*, representada por uma parte operativa que traduz os sinais elétricos em números binários e os armazena em arquivos de banco de dados. A radiação solar é coletada pela janela lateral e pelo domo de quartzo na parte superior do instrumento; essas superfícies encontram-se cobertas com um esmalte especial para garantir maior durabilidade e minimizar o aquecimento radiativo. (Figura 1).

Um tipo de medida obtida pelo Brewer é a da radiação solar direta, *direct sun measurement – ds*, coletada exclusivamente pela janela lateral. Um prisma, com ângulo reto ao zênite, direciona a luz incidente do Sol para o eixo óptico do instrumento; na sequência é acionado um segundo prisma, controlado por um microprocessador que opera em um domínio de até 270 graus de rotação. Este sistema permite identificar o ângulo zenital solar automaticamente. O posicionamento do zênite automatizado é realizado com um motor de passo (*zenith-stepper*) montado na parte frontal do

arranjo óptico e é controlado pela placa eletrônica principal (SCI-TEC, 1995).

Uma lâmpada de quartzo-halogênio fornece uma fonte de luz que é utilizada como referência para as medições de intensidade. Esta é alimentada por uma fonte de corrente contínua de 1,5 A. O filamento da lâmpada se localiza no ponto focal de uma lente dupla convexa para que a luz da lâmpada seja direcionada pelo eixo óptico dado pelo prisma principal. Embaixo da lâmpada de halogênio encontra-se a lâmpada de mercúrio que proporciona uma fonte de luz para a calibração dos comprimentos de onda. Deste modo, são denominadas como lâmpadas padrão. Na sequência, a luz é dirigida ao sistema óptico principal (*foreoptics*) ou sistema óptico frontal, composto por um diafragma de íris e dois filtros em cilindro que funcionam com um motor, integrado na placa eletrônica principal, controlado por meio de um microprocessador, e, conectado a uma fonte elétrica. Cada cilindro está dentro de uma caixa que possui seis orifícios de 25,4 mm de diâmetro, espaçados em intervalos de 60 graus, dispostos sobre uma roda. Cada orifício pode ser selecionado para cruzar o eixo óptico girando sobre finas engrenagens do filtro. A roda do filtro é usada para ajustar automaticamente o nível de luz que entra no espectrômetro. Após a passagem da luz pelo sistema óptico principal, o feixe continua pelo sistema óptico secundário ou posterior, composto por uma lente com uma parte plana e outra convexa; a superfície plana é direcionada para a fenda de entrada no espectrômetro na faixa do ultravioleta (SCI-TEC, 1995; SCI-TEC, 1999).

O subconjunto óptico do espectrofotômetro recebe a luz através da fenda de entrada e a dispersa em um espectro de alta qualidade ao longo do plano focal na fenda de saída. Seis fendas de difração são posicionadas ao longo do plano focal de saída nos comprimentos de onda operacionais. Uma delas corresponde exclusivamente ao comprimento de onda de Mercúrio (302nm). O comprimento de onda é ajustado girando-se a grade com o motor de passo que aciona um micrômetro. O procedimento automático de calibração do comprimento de onda é capaz de medir ou ajustar os comprimentos de onda com uma precisão de 0,01 nm. A saída das fendas é dada em cinco comprimentos de onda operacionais: 306,3 nm; 310,1 nm; 313,5 nm; 316,8 nm e 320,1 nm (Zamorano, 2003).

A luz que passa pelas fendas de difração é coletada no cátodo de um detector e é convertida em impulsos de fótons; esses são amplificados, discriminados e divididos antes de serem transmitidos para um contador. A contagem de fótons resultante é registrada nos canais de comprimentos de onda. Assim, o microprocessador encontra-se programado para funcionar de acordo com os comandos de um software próprio do instrumento instalado em um computador externo que executa os comandos e recebe os dados brutos que são salvos na unidade do disco rígido, em tempo real (SCI-TEC, 1995; SCI-TEC, 1999). É possível programar o horário da coleta, o número de observações diárias, mensais ou anuais e o intervalo entre as coletas.

A verificação de que o instrumento esteja funcionando corretamente constitui o primeiro passo antes de realizar qualquer coleta e/ou análise da informação. Este procedimento se dá em três etapas a saber: 1) *Calibração do instrumento pelo fabricante*. Para isso desde o ano de 1990 o *Laboratório International Ozone Services Inc* (IO3) cumpre a função de realizar as calibrações nos *Brewers* que operam na América do Sul, em alguns países da Europa e Ásia, abrangendo diversas latitudes e longitudes; 2) *Calibrações internas e externas* com lâmpadas padrões realizadas pelos operadores locais durante a coleta de dados, e 3) *Verificação da informação* coletada pelos cálculos feitos pelo software em linguagem Fortran. Com a ajuda do programa desenvolvido por Martin Stnek, em 1998, os dados originais podem ser operados em ambiente Windows fora da instrumentação para que os dados possam ser organizados em arquivos ASCII ou dat (SCI-TEC, 1999).

O procedimento de calibração consiste principalmente na avaliação do funcionamento da parte óptica e elétrica do equipamento,

especificamente das lâmpadas internas (*Standard Lamp* “SL” e *Mercury Lamp* “HG”). Este procedimento é feito através da comparação com lâmpadas padrão testadas em laboratório, funcionando de forma simultânea com as lâmpadas internas do instrumento. Desta forma, a rede de difração do *Brewer* é ajustada para realizar leituras simultâneas da irradiância das lâmpadas, realizando medições da potência a cada 3,5 nm com varredura de cada comprimento de onda em sentido de maior para menor comprimento. As medições dos dois conjuntos de lâmpadas são salvas em um arquivo de nome QLdddy###. Todos os arquivos recebem esta codificação pela forma operacional do instrumento, no qual “ddd” corresponde ao dia, “yy” corresponde ao ano e “##” à numeração de identificação do instrumento. Durante o funcionamento normal do *Brewer* também são gerados outros arquivos, comandos e testes com a mesma codificação (SCI-TEC, 1999; Zamorano, 2003).

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) vem monitorando os fluxos da R-UV, em solo, desde o início da década de 1990, por meio de uma rede de espectrofotômetros *Brewer* instalados em alguns estados do Brasil, Bolívia, Chile e na região sub Antártida. Dentro dessa rede de monitoramento destacam-se as cidades de La Paz (16°29’ S, 68°08’ W, 3600 m), capital da Bolívia, e Natal, localizada na região nordeste do Brasil (NEB) (05°47’ S, 35°2’ W, 31 m), porque se caracterizam por registrar índices de radiação ultravioleta (IUV) considerados como “*extremos*”, segundo a classificação da Organização Mundial de Saúde (OMS), ao longo de todo o ano (Kirchhoff, 2000; Silva, 2002; Rodriguez, 2011; Corrêa, 2015). Além disso, essas localidades também fazem parte da rede devido à importância que apresentam para a medição da distribuição global de O₃.

O espectrofotômetro *Brewer* requer um amplo conhecimento técnico do operador para garantir seu funcionamento adequado. Na literatura existem poucas pesquisas publicadas que divulgam a forma de operação do instrumento. Entre estas, se destacam: Brewer (1973); Sci-Tec (1995); Bais (1997); Fioletov et al (1997); Fioletov et al (1998); Sci-Tec (1999); Carvalho & Henriques (2000); Zamorano (2003). Embora essas pesquisas descrevam como a intensidade de radiação solar é mensurada em comprimentos de onda através do sistema óptico e elétrico do equipamento, essas publicações não fornecem os cuidados e considerações que se deve ter antes da utilização da informação coletada. Nesse sentido, este trabalho, além de fornecer informações sobre a operação adequada do espectrofotômetro *Brewer*, de acordo

com as normas internacionais, orienta sobre os cuidados no seu manuseio e discute a pré-análise e análise da informação obtida pelo instrumento.

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, observaram-se desajustes na parte óptica dos *Brewers* de La Paz e Natal, principalmente na intensidade das lâmpadas SL e HG refletidos em falhas dos registros de IUV. Por essa razão, o presente estudo teve como principais objetivos descrever e avaliar o funcionamento do Brewer no processo de coleta da informação de R-UV, e por meio da utilização de modelos matemáticos corrigir possíveis falhas naturais dos espectrofotômetros *Brewer*. Desse modo, obter uma base de dados, com consistência científica.

O modelo matemático de transferência radiativa “*Tropospherical Ultraviolet Visible Model (TUV)*” desenvolvido por Mandronich (1992) é utilizado para o cálculo do fluxo espectral, dos coeficientes de dissociação e da irradiância biológica entre os comprimentos de 120 a 750 nm, com uma resolução de 0,01nm.

Material e métodos

Este trabalho foi desenvolvido com informações obtidas dos instrumentos das cidades de La Paz, Bolívia (16°29’ S, 68°08’ W, 3600 m) e Natal, Brasil (05°47’ S, 35°2’ W, 31 m). O período da análise para as duas localidades corresponde ao

intervalo do ano de 1997 a 2012 com bases de dados horárias, com alguns períodos sem informação porque houve troca do instrumento, como o caso de La Paz, e/ou calibrações internas pelos operadores. A metodologia de funcionamento do espectrofotômetro Brewer é dada em três procedimentos como apresentado na Figura 2 que sumariza todo o processo de obtenção e avaliação da informação. Assim o presente trabalho refere-se ao 3ro procedimento dividido em duas etapas.

A primeira etapa parte é de caráter descritivo sobre o funcionamento do espectrofotômetro *Brewer*, desde a entrada da radiação solar até a conversão de sua intensidade, em cada comprimento de onda selecionado, em números binários e posterior armazenamento em arquivos no banco de dados.

A segunda etapa diz respeito à pré-análise dos dados coletados através do uso de programas executáveis que avaliam o IUV mensal; constantes (SL e HG) mensais e diários referentes às lâmpadas padrão. Na sequência, foi utilizado modelo TUV com simulações de IUV em condições de céu claro e uma análise de regressão, teste *t*, Chapiro test para realizar corrigir possíveis falhas na parte óptica dos instrumentos para validação e consistência científica da informação, para posteriores análises (Figura 2).

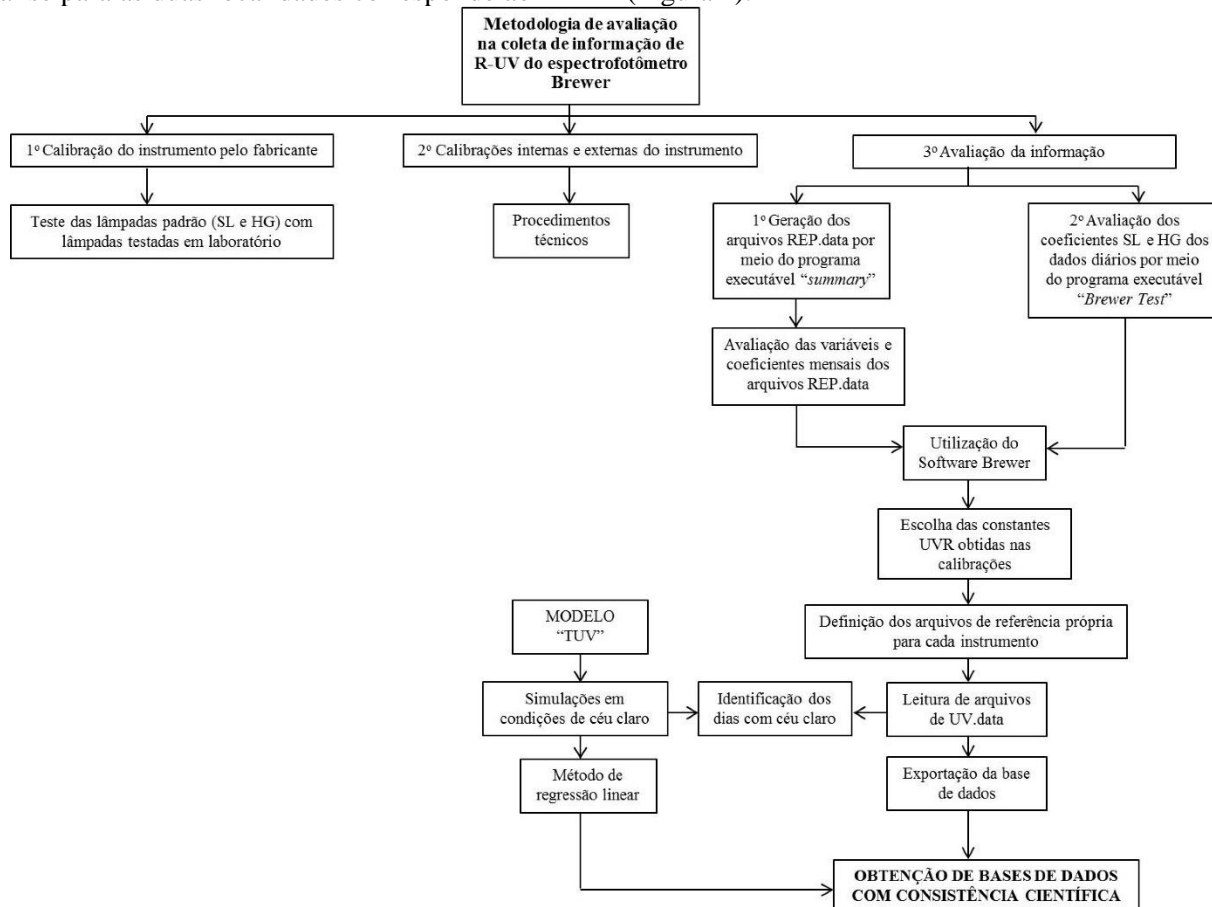


Figura 2: Fluxograma da metodologia na avaliação da informação de R-UV pelo Brewer

Nas medições realizadas, toda informação é armazenada pelo *software* em uma base de dados consistente que precisa de uma avaliação geral das variáveis e coeficientes. No intuito de facilitar a manipulação da informação, no ano de 2003, o pesquisador do INPE Felix Zamorano desenvolveu um programa executável “*summary*” que trabalha com os arquivos “AVG.dat”, os quais contêm a informação de origem e destes extrai-se o arquivo “REP.dat” que contém um resumo das principais variáveis dos máximos diários e informações sobre as lâmpadas e condições operacionais do *Brewer* (SCI-TEC, 1995). No caso específico da cidade de La Paz, operaram dois instrumentos, REP110.dat, REP056.dat e para Natal, apenas um, REP073, durante intervalo de tempo aqui analisado.

Conforme as normas de tratamento da informação estabelecidas pelo IO3, na sequência, devem-se avaliar as variáveis e coeficientes dos dados diários horários também obtidos dos arquivos “AVGs.dat”, por meio do programa executável *Brewer Test*, (Stanek, 1998). Esta verificação permite avaliar o funcionamento da Lâmpada Padrão (SL - HG) e outros parâmetros. Desse modo, realizou-se a análise dos dados AVG, utilizando os arquivos SLOAVG referente à SL, para avaliar todo o sistema óptico e elétrico do equipamento e a concentração da coluna total de ozônio (O₃); do dióxido de nitrogênio (NO₂) e HGOAVG para HG que se refere à lâmpada de mercúrio que monitora a temperatura interna do instrumento e o fluxo de radiação ultravioleta (R-UV).

Entre os principais comandos do menu principal do *software* do *Brewer*, destacam-se:

1) “*Response*” este comando direciona a constante que realiza os cálculos para gerar o arquivo resposta para ser exportado;

2) “*Inicialização*” define os arquivos de referência própria para cada instrumento. Estes arquivos devem ser definidos após a instalação do programa e salvos no arquivo “UVBrewer.ini”;

3) “*Setup*” ou “*Scan Setting*” refere-se à correção, caso seja preciso, de alguns parâmetros da faixa de R-UV, assim como o cálculo da irradiância e taxas de dose integradas. As correções são dadas para todos os parâmetros por meio de cálculos matemáticos realizados pelo próprio *software*;

4) “*export*” a exportação, nesta pesquisa foi realizada de forma mensal com o intuito de evitar saturação no programa. Assim, foram criadas pastas de saída referentes ao *Brewer* 056, 110 e 073 compreendendo o período de 1997 a 2012.

Seguidamente, deve-se escolher a constante UVRdddy## gerada a partir dos arquivos QL no processo de validação. Dentro da

informação de cada constante encontra-se informação organizada em duas colunas a primeira refere-se a cada comprimento de onda em unidades de Ångstrom (10⁻¹⁰m), e, a segunda, refere-se à resposta em contagens/m/mWm²/nm (SCI-TEC, 1999). Essa informação permite que os cálculos feitos pelo próprio programa minimizem possíveis erros na variabilidade dos registros correspondentes a R-UV. Assim, deve ser escolhida a constante mais próxima ao período que se pretende analisar.

Como o *Brewer* requer manutenção periódica, pois, via de regra, encontra-se sujeito às intempéries naturais que podem gerar alterações na sincronia entre as partes óptica e elétrica, afetando os registros da informação coletada, realizou-se uma segunda validação da informação da R-UV por meio do modelo matemático de transferência radiativa “*Tropospherical Ultraviolet Visible Model* (TUV)” (Mandronich, 1992).

O TUV considera a radiação visível, RUV-A (315 < λ < 400 nm), RUV-B (280 < λ < 315 nm) e RUV-C (100 < λ < 280 nm) e leve em conta ainda os coeficientes de fotólise e irradiações biologicamente ativas (IUV, danos no DNA, produção de Vitamina D, etc.). Uma vez que as propriedades ópticas da atmosfera variam com a altitude ou profundidade óptica, no TUV, a atmosfera é dividida em 50 camadas adjacentes e homogêneas. Em cada uma assume-se que as propriedades de dispersão e absorção são constantes, mas podem ser diferentes de camada para camada. O cálculo dos fluxos radiativos são simulados mediante a equação de transferência radiativa e algoritmos de ordenadas discretas (DISORT) desenvolvido por Stamnes et al. (1988) considerando os fatores que interferem na R-UV que atinge à superfície terrestre.

No caso desse estudo, optou-se por realizar simulações em condições de céu claro, pois a simulação em presença de nebulosidade não proporciona resultados confiáveis. Isso se deve ao fato do TUV considerar apenas camadas homogêneas e estratificadas para representar a nebulosidade, ou seja, uma condição bastante distinta da variabilidade espaço-temporal observada na natureza.

Dado que o modelo TUV foi ajustado para calcular o IUV somente em condições de céu claro, por meio do *Brewer*, foram identificados os dias nessas condições. Desse modo, obtiveram-se duas séries temporais com a mesma qualidade e consistência de informação. Na sequência, realizou-se uma análise de regressão simples considerando o método de estimação de mínimos quadrados. Considerando duas variáveis X e Y gerando n pares (X₁, Y₁), ..., (X_n, Y_n), sendo Y

função linear de X, pode-se estabelecer uma regressão linear simples cujo modelo estatístico corresponde:

$$Y_i + \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad \text{para } i = 1, \dots, n,$$

Sendo que Y_i corresponde aos dados de IUV do modelo TUV;

X_i representa a variável independente que se refere aos dados de IUV do Brewer;

ε_i representa o erro resíduo;

β_0 e β_1 correspondem aos parâmetros do modelo a serem estimados.

Calculou-se o coeficiente de determinação R^2 para verificar a qualidade de ajuste entre os valores dos instrumentos *Brewer* (variável preditora) e aqueles do TUV (variável resposta). O R^2 varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quando mais próximo de 1 melhor capta a variabilidade dos dados.

No intuito de obter uma melhor resposta do modelo, realizou-se esta análise em períodos menores, porque no cálculo da série temporal do Brewer são escolhidas constantes que geram a informação e segundo as normas internacionais aconselha-se realizar em períodos próximos aos das constantes. Além disso, em La Paz houve uma troca de equipamentos no ano de 2004.

Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta as séries temporais das máximas diárias do IUV referentes às cidades de Natal e La Paz dos arquivos REP. A série temporal de Natal corresponde ao período de 1996 a 2012, na qual se observou significativo número de registros (28%) de IUV “*extremos*” no intervalo, segundo a classificação da OMS. Ao longo da série temporal, observaram-se registros que atingiram valores de IUV de até 23. Também se destaca uma queda dos registros de até 30% ressaltando os anos de 2006 e 2007. Todos esses fatos na série temporal mostram imperfeições no funcionamento da parte óptica e/ou elétrica do *Brewer*. Quanto à série temporal da cidade de La Paz, correspondente ao período de 2006 a 2012 (item b na figura 3), observou-se um comportamento sazonal, com IUV médio de 11,8 (linha pontilhada reta), e 56% dos registros superiores à escala de “*extremo*” do IUV (OMS, 2003). Destaca-se que a cidade de La Paz encontra-se acima dos 3.600m de altitude, determinante para a elevada percentagem de IUV extremos. Pesquisas demonstraram que a cada quilômetro de altitude a intensidade de IUV aumenta de 5% a 7% (Okuno, 1996; Rivas, 2002; Corrêa, 2003; Mckenzie, 2003). Além disso, durante o verão, registraram-se valores de até 22, correspondendo a 11 unidades acima do valor estabelecido como “*extremo*” pela OMS. Tais valores são semelhantes a medições realizadas em outras pesquisas na cidade de La Paz, nas quais foram registrados IUV=24,0 (Zaratti, 2003) e IUV=19,7 (Rodriguez, 2011).

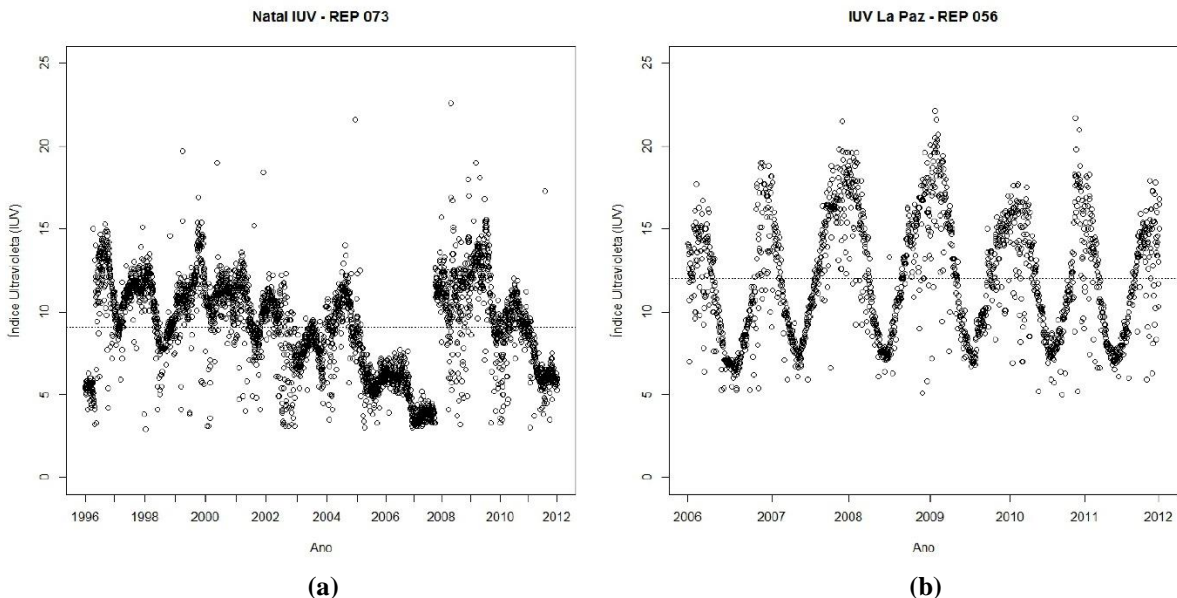


Figura 3. Séries temporais de IUV diários (a) dos arquivos REP073.dat – de Natal – Brasil referente ao período de 1996 a 2012 e (b) REP056 de La Paz – Bolívia referente ao período de 2006 a 2012

Dentro da informação do arquivo REP, também se encontram as dos coeficientes de calibração (R5, R6 e F1) que se referem ao funcionamento da intensidade da Lâmpada Padrão

(SL). A Figura 4 apresenta as séries temporais dos coeficientes do espectrofotômetro *Brewer* #056 de La Paz, correspondente ao período de 2006 a 2012. As escalas de cada coeficiente correspondem a

valores adimensionais e os parâmetros são estabelecidos nas calibrações realizadas pelos fabricantes. O último relatório disponível de calibração do IO3 foi para o ano de 2004 o qual na época encontravam-se dentro dos parâmetros (SCI-TEC, 1999; Zamorano, 2003). Como as séries correspondem a períodos mais extensos, observa-se que as intensidades das lâmpadas padrão tornaram-se instáveis no decorrer dos anos. As linhas retas pontilhadas correspondem às médias de cada série temporal. Nas séries temporais dos coeficientes SL (R5) e (R6) observam-se

comportamentos similares com alguns picos descendentes ao longo do ano de 2007, destacando a instabilidade nas intensidades das lâmpadas padrão.

A série temporal do coeficiente SL (F1), que se refere à intensidade da Lâmpada Padrão, mostra uma queda dos registros no ano de 2010. Esse comportamento nas séries temporais das lâmpadas padrão mostra que é preciso realizar um ajuste na parte óptica ou mesmo uma troca das lâmpadas.

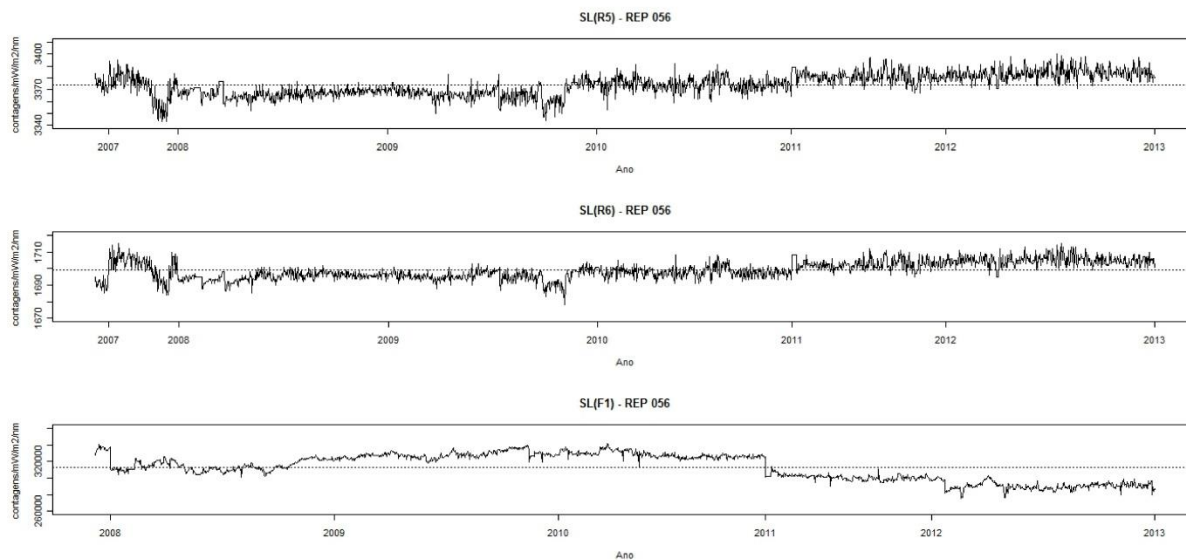


Figura 4. Coeficientes de calibração da Lâmpada Padrão do Brewer 056 da cidade de La Paz - Bolívia

Após a avaliação do arquivo REP, o procedimento seguinte compreende a avaliação das mesmas variáveis em forma horária. Para tal efeito, utilizou-se o programa “*Brewer Test*” que trabalha com os arquivos AVG, que contém toda a informação original. A Figura 5 apresenta as séries temporais horárias dos coeficientes SL (R5) e SL (R6) do *Brewer 056* de La Paz referente ao período de 2006 a 2012. A linha vermelha representa a série temporal, a linha verde corresponde a uma suavização da série feita por cálculos do próprio programa.

Por motivos de procedimentos técnicos de manutenção do instrumento, no período de outubro de 2006 a dezembro de 2007 os registros não foram contínuos. Destacam-se desajustes das lâmpadas padrão na intensidade e transmissão da luz solar na parte óptica. Isto se reflete em registros arbitrários considerados como *outliers* nas bases de dados. Portanto, deve-se considerar a necessidade de um ajuste no eixo óptico das lâmpadas ou troca das mesmas.

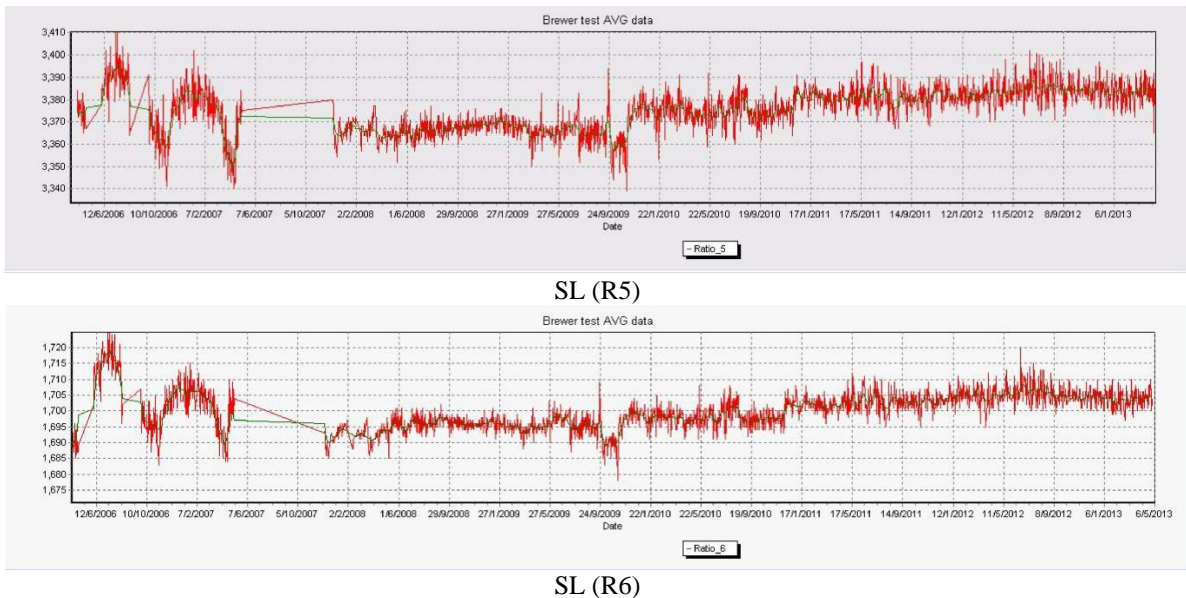


Figura 5. Coeficientes de calibração R5 e R6 da Lâmpada Padrão do Brewer 056 correspondente ao período de 2006 a 2013 da cidade de La Paz - Bolívia

A Figura 6 apresenta as séries temporais diárias das constantes SL (R5) e SL (R6) correspondentes no período de 1996 e 2012 do Brewer de Natal. Destaca-se um defeito na parte óptica do instrumento, que pode ser devido: 1) ao funcionamento da intensidade das lâmpadas, 2) à alteração no filtro localizado na parte óptica posterior, ou 3) à diminuição do ganho da foto amplificadora. Qualquer defeito de alguma dessas partes ou das três é refletido por uma alteração na variação dos registros ao longo das séries temporais. Este fato mostra uma diminuição na

sensibilidade do instrumento, dado que os registros encontram-se fora dos parâmetros estabelecidos em calibrações oficiais pelo IO3 nos anos 2000, 2004 e 2009 informando que o instrumento veio operando com alguns períodos de instabilidade na Lâmpada Padrão diminuindo sua sensibilidade em 16%. Isto indica que a informação coletada encontra-se sem consistência, com erros nas medições, posto que segundo o IO3, é aceitável uma margem de erro entre 5% a 10%. Segundo recomendações do IO3, é preciso a geração de um novo arquivo REP ou troca das lâmpadas.

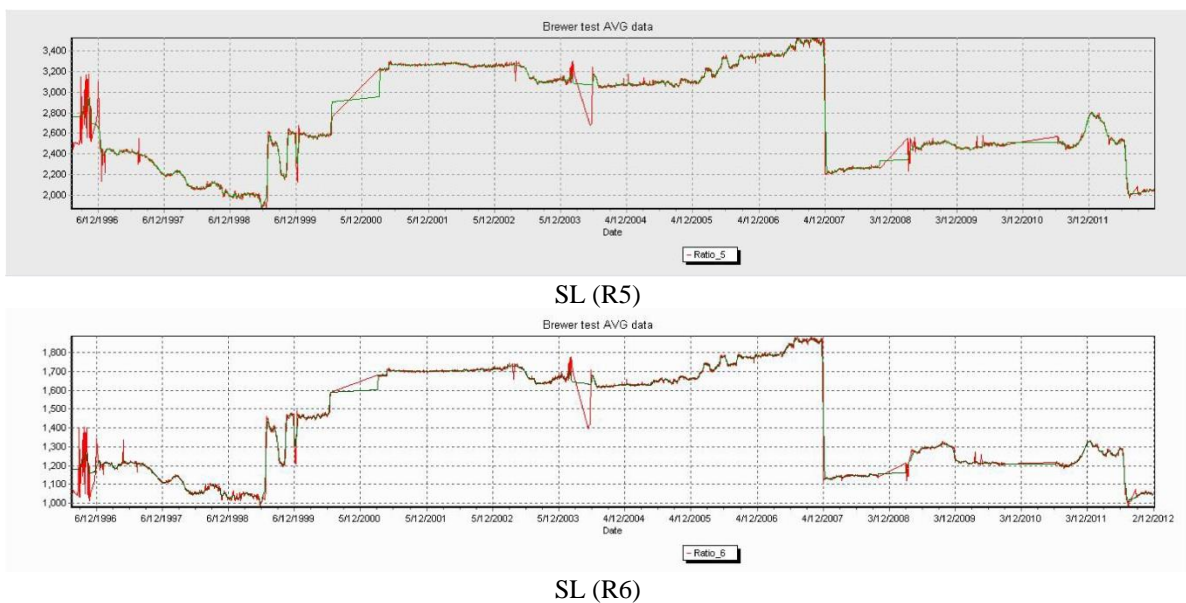


Figura 6. Coeficientes de calibração R5 e R6 da Lâmpada Standard do Brewer 073 correspondente ao período de 1996 a 2012 da cidade de Natal - Brasil

Outra variável muito importante na avaliação do funcionamento do Brewer corresponde à “HG”, que se refere à condução da

luz para o micrômetro e à rede de difração que dispersa a luz solar em cinco comprimentos de onda de operação para cinco ranhuras de saída

(SCI-TEC, 1999). A informação é extraída do arquivo HGOAVG. Além disso, registra também a temperatura interna do instrumento por meio de três sensores (termopares). A Figura 7 apresenta a série temporal dos registros da lâmpada de mercúrio HG do Brewer 073 de Natal. Observa-se que no período analisado a temperatura interna do equipamento oscilou entre 25°C a 48°C. Em La Paz, os registros de HG oscilaram entre 20°C a

45°C. Segundo o IO3, o *Brewer* é apto para funcionar entre temperaturas de -50°C até 50°C (Zamorano, 2003). Desse modo, verifica-se que não houve alterações fora do domínio de operação, na temperatura interna do equipamento, descartando a hipótese de que as alterações observadas na intensidade das SL tenham sido causadas por essa razão.

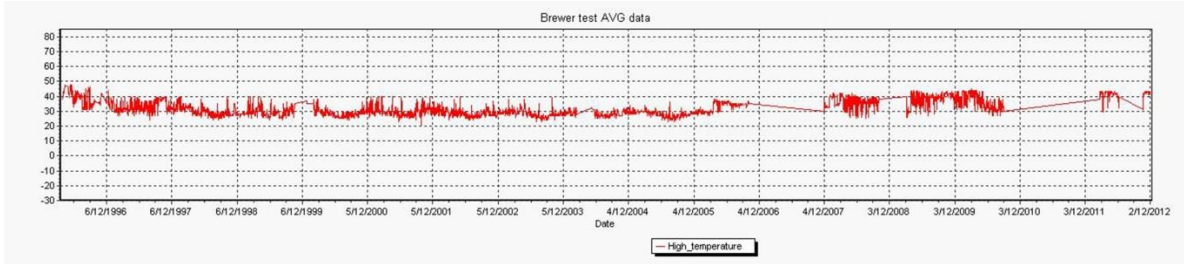


Figura 7. Série temporal da temperatura do equipamento do dia da medição extraída da constante HG do Brewer 073 correspondente ao período 1996 – 2012 na cidade de Natal – Brasil

Na Figura 8 apresentam-se as séries temporais de IUV horário das cidades de La Paz e Natal. Como esperado, as séries temporais das duas

localidades apresentam falhas e ambas apresentam uma tendência decrescente nos registros.

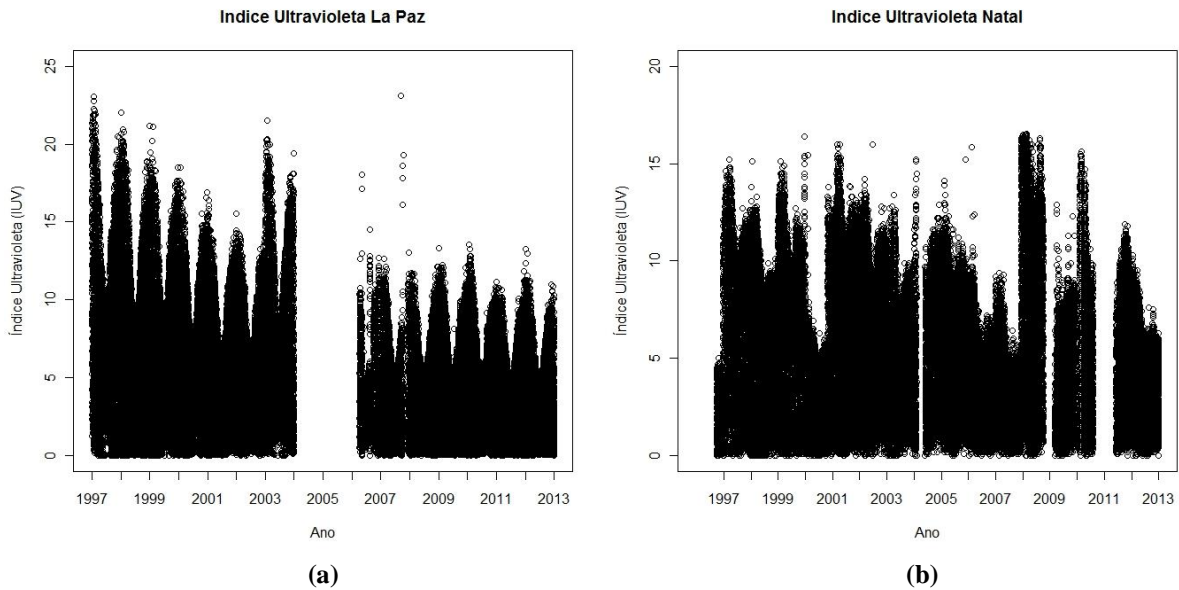


Figura 8. Séries temporais horária de IUV do Brewer das cidades de La Paz e Natal referente ao período de 1997 a 2012

De modo a corrigir as discrepâncias observadas na série, realizou-se a simulação de IUV pelo modelo TUV e comparou-se às medidas realizadas em dias de céu claro. A análise de correlação permitiu determinar as equações de ajuste. Para ilustrar, a Figura 9 apresenta a análise de correlação em períodos curtos como explicado

nos métodos com o cálculo das equações e o valor do coeficiente de determinação para a cidade de La Paz. Obtiveram-se valores R^2 acima de 0,90 para ambas as cidades.

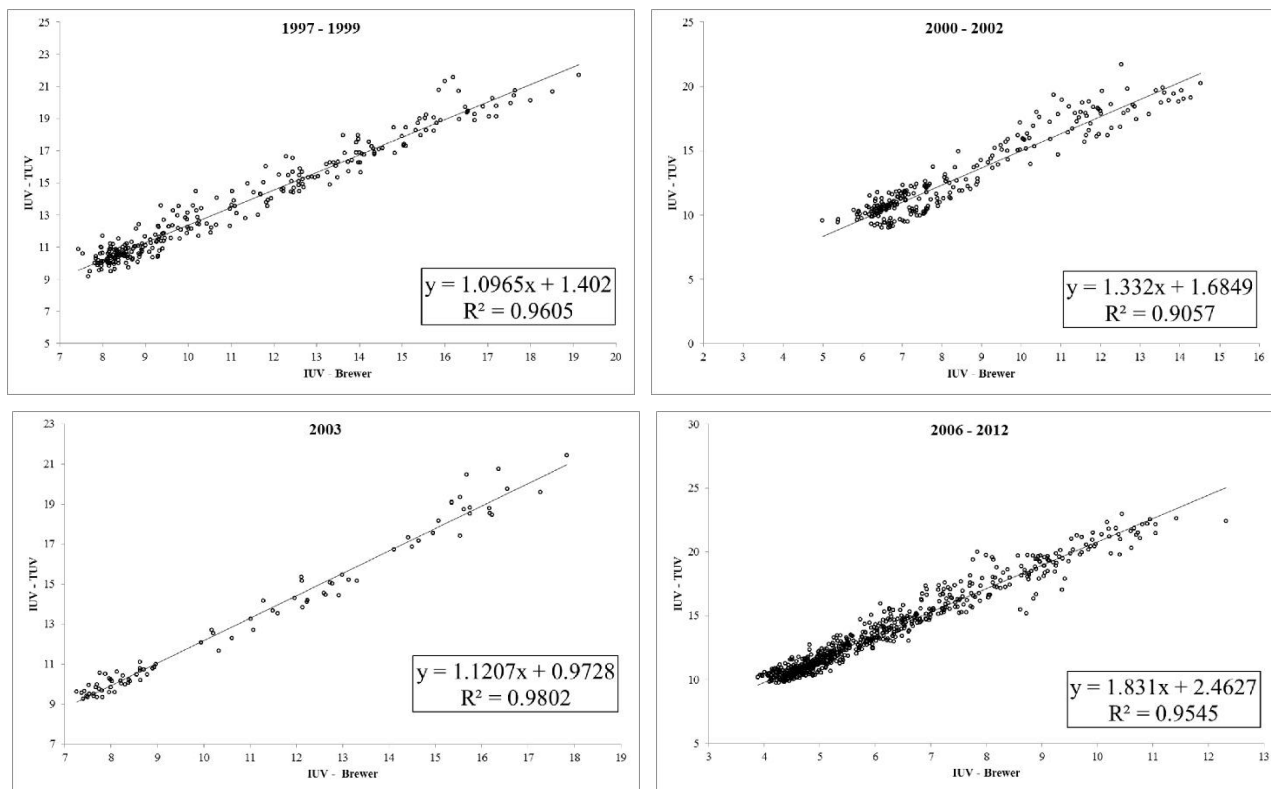


Figura 9. Análise de correlação entre o Brewer e o modelo TUV referente a cidade de La Paz - Bolívia

Conclusões

As cidades de La Paz, Bolívia e Natal, Brasil possuem características geográficas e latitudinais que constituem o principal fator para registros de IUUV “extremos” segundo a classificação da OMS. Por esse motivo, desde a década de 1990, o INPE monitora os fluxos de R-UV, em solo, nessas localidades com espectrofotômetro *Brewer*. Como foi apresentado, este instrumento exige um rigoroso controle na aquisição, no tratamento e na análise dos dados. Existe um procedimento internacional para a validação dos dados que deve ser seguido utilizando programas específicos. Assim, o presente estudo descreveu as considerações, procedimentos e cuidados mais importantes a serem levados em consideração antes de qualquer análise de informação proporcionada pelos espectrofotômetros, seguindo as normas estabelecidas pelo IO3 e dos manuais dos instrumentos, apontando características nas séries temporais de dados que indicam falhas no funcionamento dos equipamentos, especificamente em sua parte óptica, constituindo o principal problema para o uso científico da informação coletada.

Ao longo da avaliação foram observados períodos de instabilidade na Lâmpada Padrão (SL) e na Lâmpada de Mercúrio (HG), também

reportados nos relatórios da IO3 nas calibrações nos anos 2000, 2004 e 2009 os quais indicaram que houve uma diminuição da intensidade das lâmpadas em até 16%, sendo que o permitido é de 5% a 10%. Essas falhas na parte óptica dos instrumentos foram constatadas nas alterações das séries temporais dos arquivos REP com as máximas diárias e nos arquivos AVG com dados diários e horários.

Por meio do modelo TUV e de análise de correlação foi realizada a correção das discrepâncias nas bases de dados dos espectrofotômetros para as duas localidades que puderam assim ser disponibilizadas para posteriores análises, agora apresentando consistência científica (processo de validação dos dados).

Agradecimentos

Pelo apoio no financiamento para o deslocamento e coleta da informação em La Paz – Bolívia, os autores agradecem aos projetos:

1. Determinação do perfil vertical de variáveis atmosféricas no Rio Grande do Norte para validação de dados obtidos por satélites: DEPEVARN – SAT.
Edital AEB /MCT /CNPq No 033/2010
Processo CNPq n° 560314/2010-8

2. Apoio à formação de recursos humanos em clima e eventos climáticos extremos provocados por mudanças globais do clima. Edital/Chamada: MCTI e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Processo 01200.002657/2010-06 Encomenda 2009/2010/2011 (APQ) Processo CNPq n° 402555/2011-2
3. Monitoramento da Camada de Ozônio e da radiação UV, na América do Sul e na Antártica (ATMANTAR). Processo CNPq n°52.0182/2006-5

Referências

- Bais, A. F., 1997. Absolute spectral measurements of direct solar ultraviolet irradiance with Brewer spectrophotometer. *Applied Optics* 36, 5199-5204.
- Brewer, A.W., 1973. A replacement for the dobson spectrophotometer?. *Pure and Applied Geophysics* 106-108, 919-927.
- Carvalho, F., Henriques, D. 2000. Use of brewer ozone spectrophotometer for aerosol optical depth measurements on ultraviolet region. *Advances in Space Research* 25, 1006-2000.
- Corrêa, M. P., 2003. Índice Ultravioleta: Avaliações e Aplicações. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.
- Corrêa, M. P., 2015. Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America. *Anais Brasileiro de Dermatologia* 90, 297-313.
- Fioletov, V., Kerr, J. B., Wardle, D. I., 1997. The relationship between total ozone and spectral UV irradiance from Brewer observations and its use for derivation of total ozone from UV measurements. *Geophys. Res. Lett* 24, 2997-3000.
- Fioletov, V., Griffioen, E., Kerr, J. B., Wardle, D. I., 1998. Influence of volcanic sulfur dioxide on spectral uv irradiance as measured by brewer spectrophotometers. *Advances in Space Research* 25, 1665-1668.
- Kirchhoff, V., 2000. A Variação Sazonal da Radiação Ultravioleta Solar Biologicamente Ativa. *Revista Brasileira de Geofísica* 18, 63-74.
- Madronich, S., 1992 Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface. *Geophysical Research Letters* 19, 37-40.
- Mckenzie, R.L., Björn, L.O., Bais, A., Ilyasad, M., 2003. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. *Photochem Photobiol Sci* 2, 5-15.
- Okuno, E., Nakajima, T., Yoshimura, E. M., Hiodo, F., Fausto, A. M. F., Paes, W. S., Umisedo, M. K., Otsubo, S., 1996. Radiação ultravioleta solar em São Paulo, Chiba, Calafate e Ilha de Páscoa. *Revista Brasileira de Engenharia* 12, 143-153.
- Rivas, M. A., Rojas, E. E., Cortés, N. J., Santander, G. E., 2002. Efecto de la altura en la radiación solar ultravioleta en Arica norte de Chile. *Revista Facultad de Ingeniería* 10, 59-62.
- Rodriguez, J.C., 2011. Análise dos efeitos da radiação solar ultravioleta (R-UV) em populações habitantes a diferentes altitudes. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2011.
- SCI-TEC. Spectrophotometer Instruments Inc. Brewer MKIV. 1999. OM-BA-C231 REV B, August 15. Operator's Manual. Saskatoon, Sask., Canada.
- SCI-TEC. Spectrophotometer Instruments Inc. Brewer MKIV. 1995. OM-BA-C231 REV B. Operator's Manual. Saskatoon, Sask., Canada.
- Silva, A.A., 2002. A Espessura Óptica de Aerossóis na banda do UV-B. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE.
- Stamnes, K., Tsay, S.C., Wiscombe, W., Jayaweera, K., 1988. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer a multiple scattering and emitting media. *Applied Optics* 27, 2502-2509.
- OMS. Organización Mundial de la Salud, 2003. Índice UV Solar Mundial. Guia Práctica. Ginebra.
- Zamorano, F. C., 2003. Determinação do Espectro UV-B utilizando o Radiômetro GUV: Aplicação a medidas realizadas em Punta Arenas. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE.
- Zaratti, F., Gisbert, R. F., 2003. La Radiación Ultravioleta en Bolivia. Organización Panamericana de la Salud, La Paz.