

Métodos de calibración de campo para la medida del espesor óptico de aerosoles mediante fotómetros solares

Field calibration methods for aerosol optical depth determination with sun photometers

Carlos Toledano

Grupo de Óptica Atmosférica. Dpto. Física Teórica, Atómica y Óptica, Universidad de Valladolid, P. Prado de la Magdalena s/n, 47071, Valladolid. Email: toledano@baraja.opt.cie.uva.es

RESUMEN

El presente artículo está enmarcado en un trabajo de tesis doctoral acerca de la caracterización óptica de los aerosoles atmosféricos en la estación de El Arenosillo (Huelva), integrada en la red AERONET. La continuidad de las series de datos largas se basa en los procedimientos de calibración de la red. Como previo al análisis de las calibraciones en la tesis mencionada, se expone el presente resumen sobre los métodos de calibración para fotómetros, en particular sobre los métodos de campo para realizar calibraciones absolutas que permitan calcular el espesor óptico de aerosoles, poniendo especial énfasis en sus dificultades y limitaciones.

Palabras clave: Calibración, Fotometría Solar, Método de Langley.

ABSTRACT

This paper makes part of a doctoral thesis related with the characterization of atmospheric aerosol optical properties at El Arenosillo (Huelva, Spain). This site is integrated in AERONET network. The consistency of AERONET of long data series is based in the calibration protocols of the network, which are analyzed in the mentioned PhD dissertation. Prior to the analysis of these calibrations, a summary of the calibration methods for sun photometers is presented, in particular field methods for absolute calibration in order to retrieve aerosol optical depth. Special emphasis is given to the difficulties and limitations of these methods.

Key words: Calibration, Sun Photometry, Langley Method.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] C. Toledano, *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'El Arenosillo' de la red AERONET*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid (2005).
- [2] B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. F. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, I. Jankowiak, A. Smirnov, "AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization", *Remote Sens. Environ.* **66** (1), 1-16 (1998).
- [3] V. Soufflet, D. Tanré, A. Royer, N. T. O'Neill, "Remote sensing of aerosols over boreal forest and lakes from AVHRR data", *Remote Sens. Environ.* **60** (1), 22-34 (1997).
- [4] Ch. Wehrli, "Calibration of filter radiometers for determination of atmospheric optical depth", *Metrologia* **37** (5), 419-422 (2000).
- [5] J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson, D. A. McSparron, "Standard Irradiance Calibrations", NBS Special Publication No.250-20, (1987).
- [6] B. Schmid, P. R. Spyak, S. F. Biggar, C. Wehrli, J. Sekler, T. Ingold, C. Matzler, N. Kampfer, "Evaluation of the applicability of solar and lamp radiometric calibrations of a precision sun photometer operating between 300 and 1025 nm", *Appl. Opt.* **37** (18), 3923-3941 (1998).

- [7] B. G. Gardiner, "Spectroradiometer Calibration Methods and Techniques. In Solar Ultraviolet Radiation. Modelling, Measurement and Effects", Series I: Global Environmental Change Vol, 52., pag. 119-132, Edts: C. S. Zeferos, A. F. Bais, Berlin (1997).
- [8] J. Slusser, J. Gibson, D. Bigelow, D. Kolinski, P. Disterhoft, K. Lantz, A. Baubien, "Langley method of calibrating UV filter radiometers", *J. Geophys. Res.* **105** (D4), 4841-4849 (2000).
- [9] B. Schmid, Ch. Wehrli, "Comparison of Sun photometer calibration by Langley technique and standard lamp", *Appl. Opt.* **34** (21), 4500-4512 (1995).
- [10] B. W. Forgan, "General method for calibrating Sun photometers", *Appl. Opt.* **33** (21), 4841-4850 (1994) (también comunicación privada, 2003).
- [11] J. A. Reagan, L. W. Thomason, B. M. Herman, J. M. Palmer, "Assessment of atmospheric limitations on the determination of the solar spectral constant from ground-based spectroradiometer measurements", *IEEE T. Geosci. Remote* **GE-24**, 258-265 (1986).
- [12] M. A. Box, "Finite bandwidth and scattered light effects on the radiometric determination of atmospheric turbidity and the solar constant", *Appl. Opt.* **20** (13), 2215-2219 (1981).
- [13] G. E. Shaw, "Sun photometry", *B. Am. Meteorol. Soc.* **64** (1), 4-10 (1983).
- [14] J. W. Spencer, "Fourier series representation of the position of the Sun", *Search* **2** (5), 172 (1971).
- [15] C. Toledano, V. E. Cachorro, R. Vergaz, A. M. de Frutos, M. Sorribas, J. M. Vilaplana, B. De la Morena, "Analysis and correction of a fictitious diurnal cycle in the aerosol optical depth: the KCICLO method", *Opt. Pura Apl.* **37** (1), 49-60 (2004).
- [16] Alcántara-Ruiz, F. J. Olmo, L. Alados-Arboledas, "Langley calibrations of sunphotometer at Sierra Nevada, Granada, Spain", *Opt. Pura Apl.* **37** (3), 3263-3269 (2004).
- [17] L. Harrison, J. Michalsky, "Objective algorithms for the retrieval of optical depths from ground-based measurements", *Appl. Opt.* **33** (22), 5126-5132 (1994).
- [18] B. M. Herman, M. A. Box, J. A. Reagan, C. M. Evans, "Alternate approach for the analysis of solar photometer data", *Appl. Opt.* **20** (17), 2925-2928 (1981).
- [19] H. Kremser, P. Koepke, H. Quenzel, "Aerosol optical thickness from direct solar radiation: improved Langley method applied to measured data. IRS'84". *Current Problems in Atmospheric Radiation*, Ed. G. Fiocco. A. Deepak Publ. S46-49. Hampton, Virginia USA (1984).
- [20] E. I. Terez, G. A. Terez, "A method to determine atmospheric optical depth using observations of direct solar radiation", *J. Geophys. Res.* **108** (D22), AAC6 1-6 (2003).
- [21] Ch. Wehrli, "Calibration of filter radiometers for the GAW aerosol optical depth network at Jungfraujoch and Mauna Loa", ARJ Workshop, SANW Davos (2002).
- [22] P. Goloub, Service d'Observation PHOTONS/AERONET – Bilan pour évaluation et renouvellement – Avril de 2005 (ver también <http://www-loa.univ-lille1.fr/photons/>).
- [23] L. W. Thomason, B. M. Herman, J. A. Reagan, "The effect of atmospheric attenuators with structured vertical distributions on air mass determination and Langley-plot analysis", *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1851-1854 (1983).
- [24] B. W. Forgan, "Bias in solar constant determination by the Langley method due to structured aerosol: Comment", *Appl. Opt.* **27** (12), 2546-2548 (1988).
- [25] N. Robinson, *Solar Radiation*. Elsevier, Amsterdam (1966).
- [26] M. Campanelli, T. Nakajima, B. Olivieri, "Determination of the solar calibration constant for a sun-sky radiometer: proposal of an in-situ procedure", *Appl. Opt.*, **43** (3), 651-659 (2004).
- [27] J. Nieke, B. Pflug, G. Zimmermann, "An aureole-corrected Langley-plot method developed for the calibration of HiRES grating spectrometers", *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **61** (10), 739-744 (1999).
- [28] W. H. Erxleben, J. A. Reagan, "An approach for obtaining best estimates of spectral optical depths and calibration intercepts from solar radiometer data corrupted by temporal variations", *Geoscience and Remote Sensing Symposium* (1996). IGARSS '96. **2**, 1014-1016 (1996).
- [29] G. K. Korotaev, S. M. Sakerin, A. M. Ignatov, L. L. Stowe, E. P. McClain, "Sun-photometer observations of aerosol optical thickness over the North Atlantic from a Soviet research vessel for validation of satellite measurements", *J. Atmos. Ocean. Tech.* **10** (5), 725-735 (1993).
- [30] M. Tanaka, T. Nakajima, M. Isóbara, "Calibration of a sunphotometer by simultaneous measurements of direct-solar and circumsolar radiations", *Appl. Opt.* **25** (7), 1170-1176 (1986).

- [31] M. Campanelli, et al., "Determination of the solar calibration constant for a sun sky radiometer". Aeronet/Photons Workshop 2004, El Arenosillo (Spain), Mayo 2004.
- [32] T. Takamura, T. Nakajima and SKYNET community group, "Overview of SKYNET and its Activities", *Opt. Pura Apl.* **37** (3), 3303-3308 (2004).
- [33] V. Soufflet, C. Devaux, D. Tanré, "A modified Langley plot method for measuring the spectral aerosol optical thickness and its daily variations", *Appl. Opt.* **31** (12), 2154-2162 (1992).
- [34] V. E. Cachorro, P. M. Romero, C. Toledano, E. Cuevas, A. M. de Frutos, "The fictitious diurnal cycle of aerosol optical depth: A new approach for "in situ" calibration and correction of AOD data series", *Geophys. Res. Lett.*, **31** (12), L12106, (2004).
- [35] T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, S. Kinne, "The wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols", *J. Geophys. Res.* **104** (D24) 31333-31350 (1999).
- [36] World Meteorological Organization. Global Atmosphere Watch No. 101. Report of the WMO workshop on the measurement of atmospheric optical depth and turbidity. Silver Spring, USA, 6 – 10 December 1993.

1. Introducción

El presente artículo es un extracto del primer capítulo de la tesis doctoral titulada "Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación 'El Arenosillo' de la red AERONET" [1]. En esta tesis doctoral se realiza un análisis de los aerosoles atmosféricos mediante medidas fotométricas dentro del ámbito de la red mundial de observación de los aerosoles AERONET (Aerosol Robotic Network [2], <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>).

Uno de los temas objeto de estudio en la tesis citada es la calidad de los datos y la continuidad de las series de datos largas llevadas a cabo con diferentes fotómetros. Así mismo se exponen los protocolos de calibración de la red AERONET y se discuten diversos problemas de calibración detectados en algunos períodos de medida en la estación de El Arenosillo. Los problemas detectados en la medida del espesor óptico de aerosoles dieron lugar al desarrollo de una metodología nueva para el control y la corrección de errores de calibración en fotómetros de campo. Por todo ello resultaba necesario exponer en el primer capítulo un pequeño resumen de los métodos de calibración de fotómetros, poniendo el énfasis en los métodos de campo, que son los empleados en la red de fotómetros AERONET.

La instrumentación que se puede emplear para las medidas radiométricas es realmente diversa en cuanto al modo de funcionamiento, rangos de medida, resolución, etc. Una descripción exhaustiva queda fuera de los objetivos del presente trabajo. Las características relevantes para describir estos instrumentos son numerosas: resolución, paso, rango espectral, anchura de los filtros, campo de iluminación, rango dinámico del detector... Para las medidas de extinción (medida directa al sol) se

limita el campo de vista del detector mediante un tubo limitador de campo o un colimador. El campo de iluminación media (FOV, *field of view*) es también un parámetro importante para la descripción de un sistema de medida.

El procedimiento concreto para calibrar estos instrumentos difiere según el tipo, pero en general hay tres métodos para realizar calibraciones en los instrumentos radiométricos: la calibración en laboratorio, la calibración absoluta por el método de Langley y otros métodos derivados, y la calibración por comparación. No se van a discutir aquí los métodos que impliquen vuelos en globo, avión o satélite [3,4].

El parámetro fundamental que se analiza en Toledano [1] es el espesor óptico de aerosoles (AOD), que se calcula a partir de las medidas de irradiancia directa del sol. Por tanto nos vamos a centrar en los métodos para calibrar en irradiancia instrumentos radiométricos como el fotómetro Cimel, que es el fotómetro estándar de la red AERONET. Es necesario tener en cuenta que el cálculo del AOD a partir de la ley de Beer-Bouguer-Lambert (1) no requiere una calibración absoluta en unidades físicas, sino la determinación de la señal del instrumento fuera de la atmósfera, es decir, lo que se denomina constante extraterrestre del instrumento.

2. Calibraciones de irradiancia en laboratorio

La calibración en el laboratorio se basa en la utilización de lámparas estándar de irradiancia conocida [5]. Para ello se realiza un montaje en el que se coloca la lámpara estándar a una distancia especificada del detector. Se emplean lámparas a las que se ha trasladado la calibración de lámparas

referenciadas por el NIST (*National Institute of Standards and Technology*) u organismos análogos. Realizando una serie de medidas con nuestro instrumento se obtiene un fichero que nos sirve para convertir la señal del instrumento (en cuentas digitales, voltaje, etc.) en irradiancia (en W/m^2), es decir, obtenemos una calibración absoluta en irradiancia.

Esta calibración absoluta requiere la caracterización de la función instrumento. La función instrumento es la respuesta en irradiancia del instrumento ante una fuente monocromática, y tiene siempre una anchura finita en longitud de onda. Si empleamos filtros interferenciales hay que determinar su respuesta espectral. El espectro conocido de la lámpara de calibración debe ser pesado con la función instrumento [6]. El resultado se divide por la señal del instrumento para obtener el coeficiente de calibración para una determinada longitud de onda o canal.

Estas lámparas tienen una vida útil determinada (unas 50h) y la certificación tiene un coste elevado. Requieren una alimentación perfectamente estabilizada y controlada para emitir la potencia deseada, a la vez que unas rampas de encendido y apagado para evitar el deterioro de la lámpara y por tanto de la calibración. A su vez hay que asegurar la geometría del montaje así como comprobar que toda la lámpara (y no solo el filamento) quede completamente dentro del campo de iluminación plena del detector.

En caso de existir elementos intermedios entre la fuente y el detector (fibras ópticas, difusores, lentes, etc.) el montaje para la calibración debe hacerse con todos los elementos del sistema, es decir, el mismo montaje que para realizar medidas, además de evaluar por separado la transmitancia espectral de cada uno de estos elementos, en particular filtros y lentes, para poder disponer de una calibración absoluta en irradiancia. La calibración puede ser sólo relativa, esto es, trasladando la forma del espectro pero no su valor absoluto. Esto puede ser suficiente si se van a emplear posteriormente cocientes entre distintas longitudes de onda. En este caso basta con hacer medidas de la lámpara estándar, sin importar la distancia a la que se coloca la lámpara ni la presencia de lentes, aunque el montaje debe siempre incluir todos los elementos del sistema.

Si queremos obtener el espesor óptico de aerosoles a partir de la calibración en laboratorio, es necesario realizar una calibración absoluta y además utilizar un espectro de irradiancia solar extraterrestre, lo cual introduce un cierto error. En el trabajo de Schmid *et al* [6] se realiza una discusión

detallada sobre diversos espectros de irradiancia solar disponibles en la literatura, y cómo influyen en el cálculo del AOD, en particular en la región espectral ultravioleta (UV).

Las fuentes de error son diversas [6-8]:

- La incertidumbre sobre el espectro de la lámpara referenciada, en torno al 1% para un estándar de 2º orden.
- La inexactitud en la corriente que atraviesa la lámpara. Por ejemplo, un 0.1% de error en la corriente, puede producir un error en la irradiancia en el UV de un 10%.
- Diferencia de magnitud entre la irradiancia de la lámpara y la irradiancia solar, ya que las lámparas pueden emitir una señal mucho menor que la del sol. En este caso estaríamos calibrando el detector bajo unas condiciones diferentes de las de medida, siendo decisiva la linealidad en la respuesta del detector frente al flujo incidente.
- Incertidumbres en el montaje experimental, por ejemplo en la distancia o la alineación del filamento de la lámpara con el instrumento.
- Errores en la medida de la respuesta espectral o función instrumento del aparato.
- Errores al interpolar el espectro de la lámpara al paso que precisemos.
- Eliminación del ruido o la corriente oscura, que es la señal que el instrumento detecta cuando la iluminación a la entrada es nula.
- Repetitividad en la respuesta del instrumento, esto es, la facultad de repetir los valores experimentales de una misma magnitud física medidos bajo idénticas condiciones experimentales.
- La inestabilidad en las condiciones de temperatura y humedad dentro del laboratorio de calibración.
- La existencia de reflexiones no deseadas, por ejemplo en las paredes del laboratorio.

Todas las fuentes de error influyen de forma diferente según la región del espectro en la que estemos trabajando. La evaluación de estos errores debe hacerse en cada caso concreto, aunque en general se suele estimar en torno al 1%-3%. Sin embargo se pueden encontrar discrepancias mayores que esa estimación, en torno al 5%, al comparar calibraciones con lámparas frente a calibraciones por el método de Langley, que discutiremos a continuación, lo que sugiere que estas incertidumbres pueden ser mayores [4,8,9].

Desde el punto de vista de la logística (envíos de instrumentos, desplazamientos, instalación, etc.) sería muy deseable la posibilidad de realizar en laboratorio calibraciones fiables de los fotómetros solares. Sin embargo, las calibraciones absolutas en irradiancia realizadas mediante lámparas difícilmente superan la precisión del 3%, lo cual es insuficiente para evaluar el espesor óptico de aerosoles en condiciones de baja turbiedad, ya que esta precisión en la calibración se traduciría en un posible error cercano al 100% en el espesor óptico de aerosoles [10]. Por esto el método más empleado a la hora de calibrar instrumentación para la medida del AOD es el método de Langley. No obstante, en regiones del espectro en las que haya absorciones debidas a gases, el método de Langley es de difícil aplicación [11], por lo que la calibración en laboratorio sigue jugando un papel importante en los instrumentos que tienen resolución espectral (espectrógrafos y espectrorradiómetros).

3. Calibraciones absolutas por el método de Langley

El método de Langley [12,13] se basa en la ley de Beer-Bouguer-Lambert, en la que indicamos el subíndice λ puesto que esta relación se cumple para cada longitud de onda:

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

I es la irradiancia medida a nivel del suelo, I_0 es la irradiancia extraterrestre, corregida de la distancia tierra-sol, τ es el espesor óptico total de la atmósfera y m es la masa óptica relativa, que se define como el cociente entre el camino óptico real de la luz solar a través de la atmósfera y el camino óptico que atravesaría si la incidencia solar fuese vertical. Tomando logaritmos se obtiene:

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{0\lambda} - \tau_{\lambda} \cdot m \quad (2)$$

Si para una longitud de onda se representa el logaritmo de la irradiancia medida frente a la masa óptica relativa, a lo largo de una serie de medidas sin variación en el espesor óptico total, el resultado es una recta cuya pendiente es el espesor óptico total y cuya ordenada en el origen corresponde al logaritmo de la irradiancia extraterrestre para esa longitud de onda o canal. Ésta nos dará el coeficiente de calibración para esta longitud de onda o canal. Podemos ver un ejemplo de esta representación en la Figura 1.

Si comparamos esta señal extraterrestre (en voltaje o cuentas digitales) con el espectro de irradiancia extraterrestre, y teniendo en cuenta la función instrumento o respuesta espectral de los

filtros, podemos obtener unos coeficientes de calibración para convertir la señal bruta en unidades físicas (W/m^2). En todo caso, para el cálculo de espesores ópticos con la ley de Beer-Bouguer-Lambert no son necesarios coeficientes de calibración en unidades físicas, como ya se ha indicado, tan solo la señal extraterrestre que se obtiene a partir de la ordenada en el origen en el ajuste de Langley.

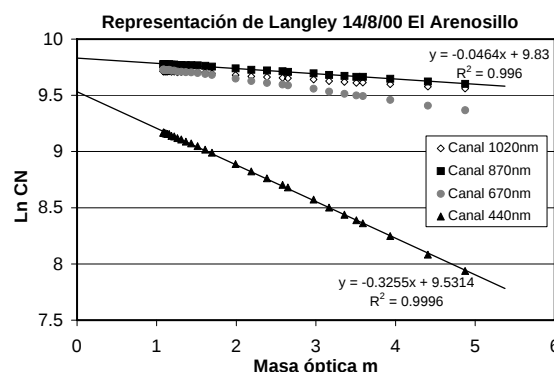


Fig.1. Ejemplo de representación de Langley con datos del fotómetro Cimel en El Arenosillo. En el eje X tenemos la masa óptica relativa; en el eje Y el logaritmo de las cuentas digitales (CN). Mostramos el resultado de las rectas de ajuste para los canales de 440 y 870 nm.

Estos coeficientes, tal y como se obtienen a partir del ajuste del método de Langley, dependen de la distancia tierra-sol del día en que se realiza la calibración. Por ello se hace una corrección para obtener un coeficiente referido a la distancia media tierra-sol. Cuando se quiera calcular el espesor óptico para un día concreto, se vuelve a aplicar esta corrección, que podemos evaluar, por ejemplo, con la siguiente fórmula [14], que depende simplemente del día del año (N_d), donde Γ se conoce como el ángulo del día (en radianes), dado por $\Gamma = 2\pi(N_d - 1)/365$:

$$d = 1.00110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) \quad (3)$$

El método de Langley clásico requiere que el espesor óptico total de la atmósfera permanezca constante durante la serie de medidas realizadas. A su vez estas medidas deben cubrir un rango de masas ópticas, que será distinto según las características del instrumento que pretendemos calibrar, del lugar de calibración (en particular la latitud) y de la región del espectro a que nos refiramos. En un trabajo

anterior [15] se expone el problema de la elección del rango de masas ópticas. Habitualmente se consideran masas ópticas menores que 6 ó 7 en las calibraciones por el método de Langley [16,17]. Slusser *et al* [8] también aborda la elección del rango de masa ópticas, en este caso para la región espectral ultravioleta, donde la sensibilidad del instrumento es un factor determinante, encontrándose que para el canal de 300 nm el rango de masas ópticas es tan solo de 1.2 a 2.2.

Pueden ocurrir variaciones en el espesor óptico de la atmósfera que no son detectables a partir del ajuste de Langley, en particular a partir de indicadores como el coeficiente de correlación o la desviación estándar, y que introducen errores difícilmente evaluables. Se advierte claramente [11,18-20] que variaciones monótonas en el AOD dan lugar a errores sistemáticos en la calibración por el método de Langley, que además son imposibles de detectar en un solo ajuste. Por ello, para asegurar una precisión del 1% en la calibración (en lugares idóneos, como alta montaña) es necesario realizar un cierto número de ajustes a partir de los cuales realizar un promedio. Al menos 20 ajustes por el método de Langley son necesarios para asegurar una precisión del 1% en el voltaje extraterrestre [8], lo cual es imprescindible para poder determinar el AOD con un error absoluto de 0.01-0.02. En condiciones de baja turbiedad este error absoluto puede significar un error relativo superior al 10% en el AOD [4,21]. Si llevamos un poco más lejos este argumento, la bondad de una estación de medida para realizar calibraciones por el método de Langley se puede caracterizar mediante el tiempo que hace falta para llevar a cabo los ajustes necesarios para alcanzar una precisión del 1% en la calibración [21]. La clave para esta condición se encuentra en el número de días estables y soleados de la estación.

Las condiciones ideales para realizar una calibración Langley pasan por la menor variación posible en el espesor óptico total. Esta variación, en las longitudes de onda no afectadas por absorciones, se debe a los aerosoles, por lo que se suelen buscar lugares en alta montaña, en altitudes donde la cantidad de aerosoles en la columna atmosférica es baja y sus variaciones pequeñas en términos absolutos. Las estaciones por encima de la capa límite planetaria, como Mauna Loa en Hawai, son óptimas para este tipo de calibraciones. De hecho numerosas redes de fotómetros realizan la calibración absoluta de sus instrumentos de referencia en Mauna Loa. Por supuesto las zonas urbanas no son adecuadas, y en los lugares dentro de la capa de mezcla continental se requerirá un número elevado de calibraciones y los coeficientes de calibración estarán afectados por más error. El

Observatorio Atmosférico de Izaña, situado en la isla de Tenerife a 2360 m sobre el nivel del mar, es una estación idónea para este tipo de calibraciones, en particular por su accesibilidad e instalaciones, así como el clima y la altitud. La Red Ibérica de Medida de Aerosoles (RIMA), actualmente en desarrollo, realizará la calibración de sus instrumentos de referencia en Izaña, donde ya se calibran de forma rutinaria los instrumentos *master* de la red PHOTONS [22].

Las fuentes de error para el método de Langley [6,8,11] se deben a:

- La estabilidad del espesor óptico total durante las medidas. En la región UV las variaciones de ozono durante el día tienen especial importancia. Las variaciones en la cantidad de aerosol afectan a todo el rango espectral. Tienen especial relevancia las variaciones sistemáticas del espesor óptico de aerosoles, como ya se ha comentado.
- El ancho de banda finito del espectro, puesto que la ley de Beer-Bouguer-Lambert es sólo aplicable monocromáticamente, y su aplicación sobre una banda de cierta anchura espectral (la función instrumento del aparato o la anchura del filtro empleado) conlleva un error. Este error aumenta con la anchura y también depende de la región espectral considerada.
- La linealidad de la respuesta del detector frente al flujo incidente.
- La contribución de radiación difusa en la medida directa al sol, en función de lo grande que sea el campo angular que ve el detector.
- Si deseamos convertir la señal en unidades físicas, entonces hay que considerar también el error del espectro de irradiancia extraterrestre que se emplee. Los errores suelen ser menores del 2% y además son susceptibles de mejora a medida que se desarrollen mejores medidas desde satélites.
- La consideración de una misma masa óptica para moléculas, aerosoles y gases absorbentes (como el ozono). Estas diferencias son mayores para el UV por la fuerte dependencia con el ozono y aumentan con el ángulo cenital solar.
- La entrada de luz parásita a nuestro sistema, en particular por la transmitancia fuera de la banda nominal en filtros interferenciales.
- Las variaciones en la temperatura del instrumento, en caso de que no esté estabilizado, que pueden provocar tanto un cambio en la respuesta del detector como un desplazamiento en longitud de onda de los filtros interferenciales.

4. Otros métodos basados en el método de Langley

4.1. Método de Langley modificado

El método de Langley clásico (2) lleva implícita la suposición de que las masas ópticas de las diferentes especies que contribuyen al espesor óptico total son iguales. En rigor, al aplicar la ley de Beer-Bouguer-Lambert, cada componente debe tener una masa óptica diferente, puesto que son diferentes los perfiles verticales de concentración de cada uno de ellos [23,24]. Por tanto es más exacto evaluar de forma independiente la masa óptica de aerosoles (a), moléculas (m) y gases absorbentes (g):

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{0\lambda} - \tau_{a\lambda} \cdot m_a - \tau_{m\lambda} \cdot m_m - \tau_{g\lambda} \cdot m_g \quad (4)$$

La diferencia entre la masa óptica relativa de aerosoles y las masas ópticas relativas de moléculas y de ozono se ha representado en la Figura 2. Las diferencias se incrementan con el ángulo cenital solar. Esta expresión (4) de **Langley “modificado”** [10], requiere el conocimiento de las diferentes masas ópticas así como el contenido de los gases absorbentes que se desee considerar. Es habitual considerar el ozono por su influencia en las regiones ultravioleta y visible, en las que también tienen mayor influencia los aerosoles. De esta manera se minimizan los errores en la calibración derivados de los cambios en el contenido de ozono, aunque esto obliga a disponer de medidas auxiliares [11].

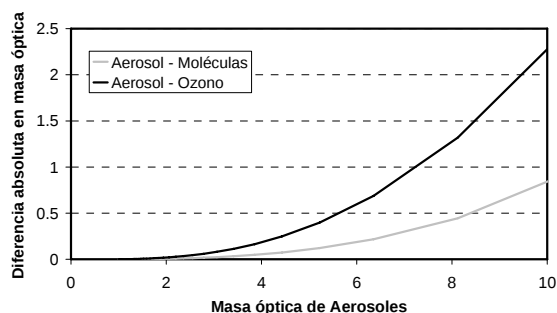


Fig. 2. Diferencia entre la masa óptica de aerosoles y la masa óptica para moléculas y ozono [25].

4.2. Método de Langley “pesado”

Por otra parte la regresión lineal por el método de mínimos cuadrados en el método de Langley da más peso a las medidas en masas ópticas grandes [18]. Por tanto se puede mejorar el cálculo estadístico mediante una modificación para que todas las observaciones que se consideren en el ajuste de Langley tengan el mismo peso (**Langley “pesado”**). En Herman *et al* [18] se propone una metodología de ajuste pesado. Otros autores [10,16] proponen una pequeña variación sobre el método de Langley para evitar este problema estadístico, que consiste en

dividir por la masa óptica de aerosoles. Si realizamos esta corrección sobre el Langley modificado, tenemos:

$$\ln I_{\lambda} / m_a = (\ln I_{0\lambda} - \tau_{m\lambda} \cdot m_m - \tau_{g\lambda} \cdot m_g) / m_a - \tau_{a\lambda} \quad (5)$$

Esta modificación intercambia los papeles de pendiente y ordenada respecto del método de Langley clásico. Sin embargo sigue requiriendo una gran estabilidad en el contenido de aerosoles, y en el caso de adoptarse la versión modificada, también requiere el conocimiento del contenido de gases y las mencionadas masas ópticas de aerosoles, moléculas y gases absorbentes por separado. En el trabajo de Alcántara *et al* [16] se compara este método de Langley pesado con los métodos de Langley clásico y modificado, indicándose que no existen diferencias apreciables en los resultados de la calibración al realizar el ajuste pesado. También se indica que en condiciones de posible inestabilidad de la atmósfera durante el calibrado es conveniente emplear el método de Langley modificado.

4.3. Calibraciones de campo en condiciones de inestabilidad en el AOD

Diversos autores [20,26-28] se han enfrentado con la dificultad de obtener calibraciones con el método de Langley en estaciones ordinarias, sujetas a la disponibilidad de días estables y despejados, y en todo caso con una variabilidad en el espesor óptico de aerosoles mucho mayor que en estaciones situadas por encima de la capa límite. Se trata de establecer ciertas variaciones, en ocasiones con la ayuda de medidas auxiliares, que permitan realizar calibraciones absolutas cuando no se cumplen las condiciones para aplicar el método de Langley clásico.

El trabajo de Korotaev *et al* [29] propone un método de calibración basado en el método de Langley. En este caso se parte del hecho de que el aerosol de fondo en la estación (*background*) no debe tener dependencia alguna con la altura solar, es decir, que cuando el AOD es suficientemente pequeño no debería mostrar ciclo diurno alguno, lo cual está de hecho implícito en el método de Langley. Dado que un error en la constante de calibración provoca un error en el AOD que depende de la masa óptica [15], se realizan variaciones en el coeficiente de calibración hasta conseguir eliminar la dependencia de AOD con la masa óptica, encontrando así el coeficiente de calibración correcto.

En varios trabajos [26,27,30] se propone el uso de medidas de radiancia en la aureola solar, bien para el control de la transmitancia atmosférica, bien

como medidas complementarias que permitan realizar una calibración cuando no se dan las condiciones para la aplicación del método de Langley. Los mismos autores ponen de relieve la dificultad principal con la que se enfrentan estos métodos, que es la correcta evaluación de la radiancia de la aureola en condiciones de *scattering* múltiple, lo que requiere complejos modelos de transferencia radiativa y diversas suposiciones. Las medidas de radiancia en la aureola son además muy sensibles a la precisión de posicionamiento del instrumento [10]. El procedimiento de Campanelli *et al* [26,31], requiere la aplicación de un algoritmo de inversión a las medidas de radiancia del cielo para determinar diversos parámetros ópticos (parte real e imaginaria del índice de refracción de los aerosoles, albedo de la superficie) que a su vez permiten determinar la constante de calibración del fotómetro en condiciones de AOD inestable, siempre que el tipo de aerosol (dado por el índice de refracción) no cambie. Evidentemente este tipo de métodos requieren instrumentos que realicen tanto medidas directas al sol como medidas de la radiancia del cielo, como los fotómetros Cimel y Prede de las redes AERONET y SKYNET [32] respectivamente.

El trabajo de Kremser [19] propone una metodología basada en permitir que el espesor óptico de aerosoles varíe linealmente con el tiempo durante el ajuste de Langley. Este cambio es sustancial ya que todos los métodos mencionados basan la bondad de los resultados en que las variaciones que se produzcan en el AOD sean pequeñas y además aleatorias. La metodología de Kremser disminuye notablemente la dispersión en una serie de ajustes de Langley realizados en Tsumeb, Namibia. La variación que introduce sobre el método de Langley, permitiendo una variación lineal del AOD, consigue reducir el error de los coeficientes de calibración del 3% al 1%. De manera similar, el trabajo de Terez y Terez [20] permite una variación de AOD lineal con el tiempo durante el ajuste de Langley, llegando a un conjunto de calibraciones con una dispersión menor que el método de Langley ordinario.

Por otra parte Forgan [10] propone dos métodos, denominados ‘método general’ y ‘ratio-langley’, aunque en este caso se trata de métodos relativos. A partir de un canal del instrumento que esté correctamente calibrado, se puede realizar una calibración de los demás canales aunque las condiciones atmosféricas no sean idóneas para la aplicación del método de Langley. Ambas metodologías están basadas en la fuerte correlación que se observa entre canales de AOD y la variación suave del AOD con la longitud de onda. La razón entre el AOD en dos canales del instrumento puede

permanecer casi inalterada aunque los valores absolutos del AOD cambien. Para ello basta que se mantenga inalterada la distribución de tamaños de aerosoles relativa, o lo que es lo mismo, que se mantenga el tipo de aerosol aunque varíe su cantidad. Las condiciones para la correcta aplicación de estos métodos relativos son por tanto menos restrictivas que las calibraciones absolutas por el método de Langley.

La expresión matemática de estos métodos consiste en establecer la diferencia entre las ecuaciones del método de Langley para dos canales diferentes, el de referencia con calibración conocida, y aquél cuya calibración se quiere determinar. El método del ‘ratio-langley’ (6) emplea la diferencia directamente de la expresión del método de Langley (2), mientras que el ‘método general’ (7) emplea la ecuación del Langley modificado (4), en el que se consideran los diferentes componentes atmosféricos por separado. En este caso, Ψ_{1r} es la razón entre el AOD en el canal de referencia (r) y en el canal que queremos calibrar (denotado con subíndice 1). Los subíndices ‘0’ se refieren a las constantes de calibración de los canales.

$$\ln(I_1 / I_r) = \ln(I_{01} / I_{0r}) - (\tau_1 - \tau_r)m \quad (6)$$

$$\Psi_{1r} \cdot (m_a \tau_r) - \ln I_{01} = -(\ln I_1 + m_m \tau_m + m_g \tau_g) \quad (7)$$

En el trabajo de Soufflet *et al* [33] se realizaron medidas experimentales en una localidad en la que no se cumplían los requisitos para un Langley clásico. También plantea un procedimiento, en este caso iterativo, para encontrar la calibración de un fotómetro con una variación del método de Langley.

4.4. El método KCICLO

La aparición de valores negativos del espesor óptico de aerosoles así como un ciclo diurno, dieron lugar a un trabajo de revisión de las calibraciones de los fotómetros Cimel de AERONET en la estación de El Arenosillo [34]. Como resultado de ese estudio se desarrolló de un método, llamado KCICLO, para la evaluación y corrección de estos errores. Según el método KCICLO, el error en el espesor óptico de aerosoles ($\delta\tau$) debido a la incertidumbre en la calibración viene dado por:

$$\delta\tau = \frac{1}{m} \ln K \quad (8)$$

donde m es la masa óptica relativa y $K=I'_0/I_0$ es el cociente entre el coeficiente de calibración que estamos empleando I'_0 y el verdadero I_0 . Por tanto K nos da el error del coeficiente de calibración. Dado

que este error va a depender de la masa óptica, un error en el coeficiente de calibración provoca un ciclo diurno de forma cosenoidal en la medida del AOD [15]. Esta dependencia del AOD con la altura solar es la que permite detectar el problema de calibración y corregirlo. Para más detalles se puede consultar Toledano [1] y Toledano *et al* [15].

5. Intercalibración o calibración por comparación con un instrumento de referencia

La intercalibración consiste en trasladar a un instrumento la calibración de otro que ya está previamente calibrado, el cual denominamos instrumento de referencia o *master*. Se aplica con mayor éxito y facilidad entre instrumentos idénticos. Dos instrumentos distintos pueden diferir en resolución, tiempo para realizar la medida, campo de iluminación, rango espectral, etc. Esto dificulta enormemente el traslado de la calibración de uno a otro. Incluso entre instrumentos idénticos hay que extremar, por ejemplo, la exactitud de la hora en ambos instrumentos, pues diferencias de pocos segundos empeoran sensiblemente el resultado, en particular si la transmitancia de la atmósfera no es muy estable.

El método de intercalibración consiste en realizar un conjunto de medidas simultáneas con los dos instrumentos, asegurando que las condiciones sean idénticas (mismo campo de vista, ausencia de nubes, reloj, correcto posicionamiento, etc.). Después los coeficientes $I_{0\lambda}$ se transfieren mediante un ajuste lineal. Aplicamos la ley de Beer-Bouguer-Lambert para el instrumento de referencia (*ref*) y para el que se quiere calibrar:

$$\begin{aligned} I_{\lambda}(ref) &= I_{0\lambda}(ref) \cdot \exp(-\tau m) \\ I_{\lambda} &= I_{0\lambda} \cdot \exp(-\tau m) \end{aligned} \quad (9)$$

Se realiza el cociente y se despeja el coeficiente de calibración o irradiancia extraterrestre $I_{0\lambda}$ del instrumento que se pretende calibrar, construyendo con las medidas simultáneas realizadas la siguiente recta sin ordenada en el origen:

$$I_{0\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_{\lambda}(ref)} \cdot I_{0\lambda}(ref) \quad (10)$$

El conjunto de medidas simultáneas debería abarcar todo el rango posible en la irradiancia solar

directa, o lo que es equivalente, de masas ópticas. Si para realizar la comparación se hace uso tan solo de las horas centrales del día no se abarca todo el rango dinámico del instrumento. Así mismo es deseable que la intercalibración se realice en condiciones de turbiedad baja, como puede ser el caso de estaciones situadas en altitud [36]. Los errores de este método, en su evaluación analítica a partir de la recta de ajuste, se podrían minimizar teóricamente realizando un número elevado de observaciones simultáneas. Sin embargo en la calibración de instrumentos de la red AERONET por medio de intercomparación se indica que, frente a una precisión del 0.2% para los instrumentos de referencia (calibrados por el método de Langley en estaciones en altura) la precisión se evalúa en torno al 2% para los fotómetros calibrados por comparación con estos instrumentos de referencia, si bien es cierto que se consideran también otras fuentes de error adicionales [2,35]. Es decir, puede haber una incertidumbre mayor de la que teóricamente se deriva del ajuste. No es recomendable por tanto trasladar calibraciones utilizando patrones de segundo ó tercer orden, etc. pues se perdería precisión rápidamente.

6. Conclusión

Los métodos de campo para la calibración absoluta de instrumentos radiométricos se emplean actualmente por parte de grandes redes de medida como AERONET, fundamentalmente el método de Langley clásico. Sin embargo las variaciones de transmitancia de la atmósfera, debidas sobre todo a los aerosoles, introducen errores de difícil control o evaluación. Las calibraciones en laboratorio no alcanzan en general la precisión requerida para el cálculo del espesor óptico de aerosoles. Por ello numerosos autores han propuesto métodos de campo alternativos al método de Langley clásico, aunque la repetición de las calibraciones durante un conjunto de días, así como la elección de estaciones por encima de la capa límite, son las condiciones que mejor aseguran un resultado correcto.

Agradecimientos

Agradezco a la CICYT el apoyo económico en los proyectos REN2000-0903-C08-04CLI y REN2002-00966.