

REGISTRO DEL ESPECTRO SOLAR DIFUSO UTILIZANDO UN ESPECTRÓGRAFO DE FABRICACIÓN PROPIA.

G. A. Salazar¹, G. G. Romero², L. R. Saravia^{1,3,4}

¹Facultad de Ciencias Exactas - ²Facultad de Ingeniería - ³INENCO
Universidad Nacional de Salta
Avda. Bolivia 5150- 4408FVY- Salta - Argentina
e-mail: salazarg@unsa.edu.ar

El estudio de la irradiancia solar difusa es de particular importancia para varias ramas de la Física Atmosférica y Ambiental, como así también para las ingenierías relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar. El espectrógrafo utilizado tiene características que lo hacen adecuado para realizar estudios de radiación solar difusa utilizando pocos dispositivos pero sin resignar calidad en los datos registrados. En este trabajo se analiza la versatilidad de un espectrógrafo tipo Littrow, de fabricación propia, para la medición de radiación solar difusa en la ciudad de Salta. El espectrógrafo utiliza como medio dispersante una red de difracción la que puede rotar variando su ángulo de incidencia, barriendo de esta manera todo el espectro. El dispositivo utiliza como medio de registro una cámara CCD (704x576), controlada por computadora. El perfil de intensidades, en función de la longitud de onda, del espectro solar difuso se obtiene procesando digitalmente las imágenes capturadas.

MEASUREMENTS OF DIFFUSE SOLAR RADIATION SPECTRUM

The study of the diffuse solar irradiance is very important in many applications of Atmospheric and Environmental Physics, as well as in routine engineering that develops the use of the solar energy. In this paper we analyze the performance of a type Littrow spectrograph for diffuse solar radiation measurements in Salta (Argentina). The spectrograph uses a grating to scatter the light. This grating can rotate to have different incidence angles, covering all the spectra. The device uses a computer controlled CCD (704 x 576 pixels) camera to register the images. The lengthwave dependent intensities profiles of the diffuse solar spectra are obtained by mean of digital processes.

I. INTRODUCCIÓN.

Proponemos aquí la utilización de un espectrógrafo de fabricación propia para la realización de mediciones, del tipo espectral, de radiación solar difusa. Esta es la radiación que llega de todo el cielo producto del efecto dispersivo que efectúa la atmósfera sobre la luz del Sol.

El estudio de este tipo de radiación solar no solo puede utilizarse en el mejoramiento de sistemas que aprovechen la radiación solar para generar energía sino que también puede ser de utilidad en el estudio de las características de la atmósfera como lo es la estimación de concentraciones de gases presentes en ella.

Existe numerosa bibliografía donde se estudia detalladamente las razones del cambio climático y en todas ellas se hacen detallados estudios de la atmósfera^{(1),(2),(3)}, haciendo hincapié en los factores que alteran la misma, siendo el más importante la emisión indiscriminada de gases que acentúan el efecto invernadero (CFCs, NO_x, CO₂, etc.), generando un aumento de la temperatura promedio del planeta.

El estudio de las características y, sobre todo, de los cambios en la atmósfera se ha tornado de particular importancia en los últimos años. Los efectos del cambio climático que sufre el planeta son evidentemente catastróficos en muchos puntos del orbe. Estudiar dichos cambios

y buscar posibles soluciones al mismo es una tarea imperiosa.

Para verificar la performance del instrumento, se utilizan las bases teóricas de la técnica óptica conocida como D.O.A.S.⁽⁴⁾ (Differential Optical Absorption Spectrometry) que permite calcular, en promedio, la concentración de trazas de distintos gases presentes en la atmósfera abierta.

La ecuación básica de la espectroscopía de absorción, que describe la absorción pura de una especie en un medio homogéneo, esta dada por la ecuación de Lambert-Beers:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-L \cdot c \cdot \sigma(\lambda)) \quad (1)$$

donde $I_0(\lambda)$ es la intensidad inicialmente emitida por una fuente de radiación, $I(\lambda)$ es la intensidad de radiación después de pasar por una capa de espesor L donde se encuentra un gas en concentración c . La cantidad $\sigma(\lambda)$ es la sección transversal de absorción a la longitud de onda λ .

Si conocemos $I_0(\lambda)$, $I(\lambda)$, $\sigma(\lambda)$ y L podemos calcular la concentración c como

$$c = \log(I_0(\lambda)/I(\lambda)) \cdot (\sigma(\lambda) \cdot L)^{-1} \quad (2)$$

En condiciones atmosféricas reales debemos también tener en cuenta otros fenómenos que contribuyen a la extinción de radiación. Dichos fenómenos son la dispersión

⁴Investigador CONICET

Rayleigh, debida a las moléculas de aire, y la dispersión de Mie, debida a la presencia de aerosoles. Si bien estos fenómenos no son de absorción, contribuyen a la extinción de la luz, por lo que debemos tenerlos en cuenta. Agregando la dispersión de Rayleigh y de Mie a la ecuación 1 tenemos

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-L \cdot (\Sigma(\sigma_i(\lambda) \cdot c_i) + \epsilon_R + \epsilon_M)] \quad (3)$$

donde ϵ_R es el coeficiente de extinción de Rayleigh y ϵ_M es el coeficiente de extinción de Mie. En la ecuación (3) también se hace notar el hecho que en la atmósfera real existe más de una especie de gas.

La técnica D.O.A.S., como ya dijimos, hace uso de las estructuras de absorción características (líneas y bandas) de las moléculas de un gas, a lo largo de un camino de longitud conocida en la atmósfera abierta.

Sin embargo, la determinación de la “verdadera” radiación $I_0(\lambda)$ puede llegar a resultar muy complicada, ya que involucra la necesidad de “quitar” la atmósfera presente entre la fuente de radiación y el detector. La técnica D.O.A.S. evita esto midiendo, lo que se denomina, “absorción diferencial”. Para ello primero separa en dos partes la sección transversal de absorción $\sigma(\lambda)$: una de “variación lenta” con la longitud de onda, $\sigma_s(\lambda)$, y otra de “variación rápida” con la longitud de onda, $\sigma^r(\lambda)$:

$$\sigma(\lambda) = \sigma_s(\lambda) + \sigma^r(\lambda) \quad (4)$$

Reemplazando esta expresión en la ecuación (3) y teniendo en cuenta que tanto la dispersión de Rayleigh como la de Mie son variaciones lentas con la longitud de onda, podemos escribir:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-L \cdot \Sigma(\sigma^r_i \cdot c_i)] \cdot \exp[-L \cdot (\Sigma(\sigma_{si}(\lambda) \cdot c_i) + \epsilon_R + \epsilon_M)] \cdot A(\lambda) \quad (5)$$

donde $A(\lambda)$ es la atenuación debida a la óptica del sistema.

A partir de esta ecuación, podemos definir una intensidad en ausencia de absorción diferencial como

$$I_s(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp[-L \cdot (\Sigma(\sigma^s_i(\lambda) \cdot c_i) + \epsilon_R + \epsilon_M)] \cdot A(\lambda) \quad (6)$$

donde solo aparecen la parte “lenta” σ^s de la sección transversal σ , los coeficientes de extinción de Rayleigh y de Mie y la atenuación debida a la óptica $A(\lambda)$

Si dividimos esta intensidad $I_s(\lambda)$ con la intensidad $I(\lambda)$ registrada, y aplicamos logaritmo tenemos

$$\log(I_s(\lambda)/I(\lambda)) = L \cdot \Sigma \sigma^r_i \cdot c_i \quad (7)$$

De esta manera podemos calcular la concentración de un gas sin tener que recurrir a parámetros de difícil obtención. La sección transversal σ^r es un dato que se encuentra en variada bibliografía. Esto es lo que hace que la técnica D.O.A.S. sea tan útil.

II. EL ESPECTRÓGRAFO. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN.

El instrumento que se utiliza para medir distribuciones de energía respecto de la longitud de onda es el espectrómetro.

Es un instrumento que colecta una señal óptica espectralmente dispersa y forma su imagen. La señal de salida son imágenes monocromáticas que se corresponden con

las longitudes de onda presentes en la luz que llega a la rendija de entrada.

Una subclase de los espectrómetros son los espectrógrafos, que presentan un rango de longitudes de onda en el plano focal de salida. En el interior de un espectrógrafo tenemos dos sistemas ópticos (Fig. 1). El primero, llamado colimador, forma la imagen de la rendija en el elemento dispersor (un prisma o una red de difracción) utilizando un sistema de lentes. El sistema cámara forma las imágenes de difracción (generadas por el elemento dispersor) de la rendija, utilizando también un sistema de lentes, sobre el plano focal de una cámara fotográfica o de una CCD. De esta manera se registra un espectro.

Dentro de los parámetros ópticos de un espectrógrafo encontramos la pureza espectral $\delta\lambda$, que nos da una idea del ancho de las líneas monocromáticas registradas. La capacidad que tiene un espectrógrafo para definir líneas muy próximas entre si en un espectro, viene dado por el parámetro conocido como el poder de resolución R , que se define como la longitud de onda dividida por la pureza espectral: $R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$. De esta manera, R nos dará una idea

de la resolución de un espectrógrafo.

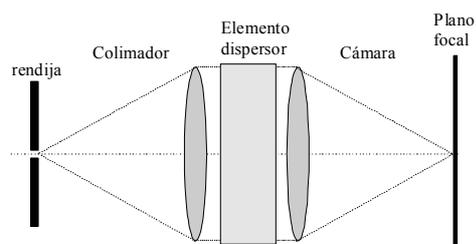


Fig. 1. Esquema de un espectrógrafo.

Para el espectrógrafo se eligió la configuración conocida como tipo Littrow. La principal ventaja de dicha configuración es que utiliza el mismo sistema de lentes para el sistema colimador como para el sistema cámara. De esta manera se ahorra espacio, elementos y el sistema completo resulta más liviano.

La construcción y calibración del espectrógrafo es mostrada y discutida en el trabajo (5) de las referencias.

II. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El análisis de los resultados experimentales esta dividido en dos partes. En la primera parte se acondicionan las imágenes con el objeto de trabajar solo con las gráficas espectrales, que son las que contienen la información.

En la segunda parte se analiza si los datos obtenidos con nuestro espectrógrafo tienen la suficiente calidad para ser usados en estudios posteriores. Para ello, utilizando la técnica D.O.A.S., compararemos los espectros registrados con otro estándar.

Acondicionamiento de las imágenes.

Se realizaron una serie de registros de radiación difusa solar cenital: esto es, se apuntó la rendija del espectrógrafo hacia el cenit. Los registros se realizaron en el Campo Experimental del INENCO, sito en el campus de la Universidad Nacional de Salta (latitud $-24^{\circ} 43' 38.5''$ longitud $-65^{\circ} 24' 33.3''$).

Las gráficas de los espectros se obtuvieron realizando el procedimiento descrito en el trabajo en la ref. (5).

Las mediciones se efectuaron entre las 8 de la mañana y las 12 del mediodía. Se muestran a continuación dos de los registros acondicionados para su posterior análisis.

- 1) Imagen 397, 8:47 a.m., hora oficial local.
- 2) Imagen 360, 11:08 a.m., hora oficial local.

En las Fig.2, 3, 4 y 5 se muestran las imágenes y los perfiles de cada una de ellas. Además de las líneas de espectro se aprecian líneas horizontales debidas a pequeñas imperfecciones de la rendija y manchas debidas a polvo en la lente.

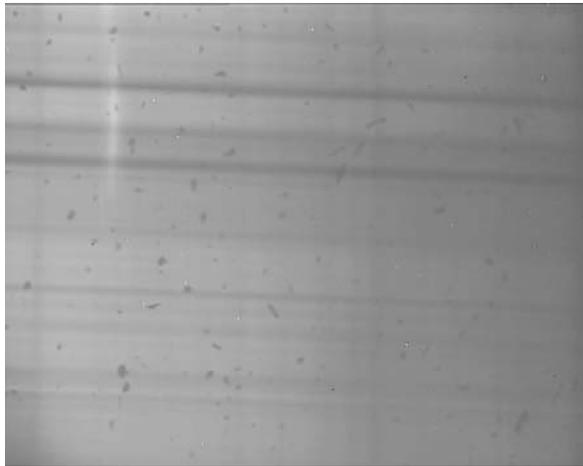


Fig. 2. Imagen de espectro solar difuso (imagen 397)

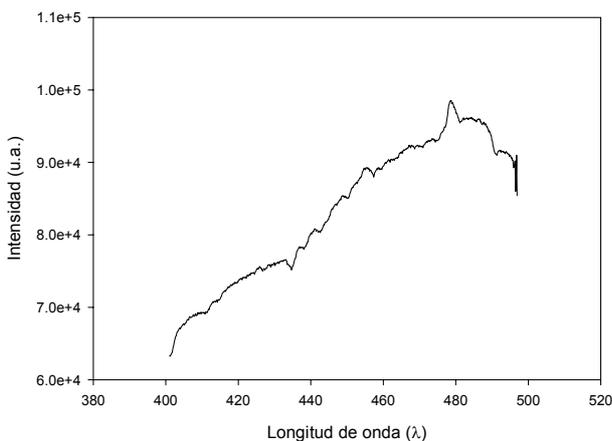


Fig. 3. Perfil completo de intensidades de la imagen 397

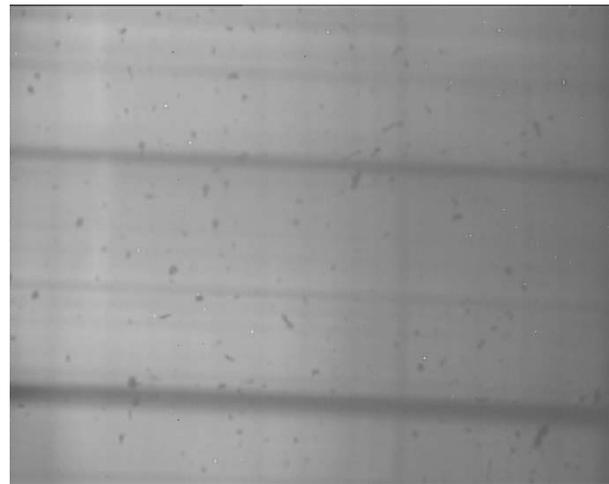


Fig. 4. Imagen de espectro solar difuso (imagen 360)

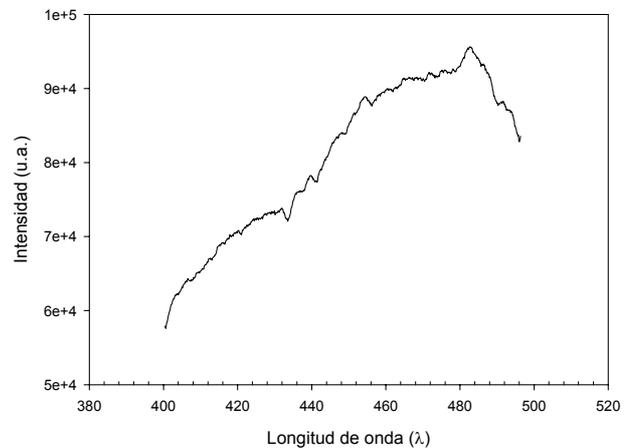


Fig. 5. Perfil completo de intensidades de la imagen 360.

Si bien el rango de longitudes de onda que abarca cada imagen completa es de aproximadamente 100 nm (exactamente 99,6 nm), se analiza solo la zona comprendida entre 432 nm a 448 nm, debido a que en esta zona existe una zona de absorción del $\text{NO}_2^{(6)}$. En trabajos posteriores se compararan estos espectros con espectros estándares para determinar concentraciones de gases en atmósfera. En las figuras 6 y 7 se muestra esta región, de las figuras 3 y 5.

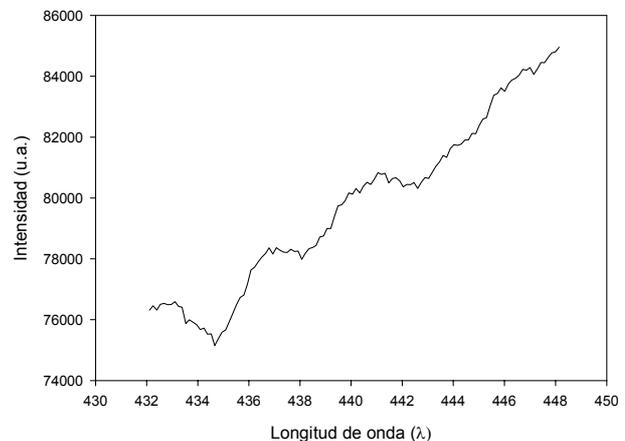


Fig. 6. Gráfica de la imagen 397.

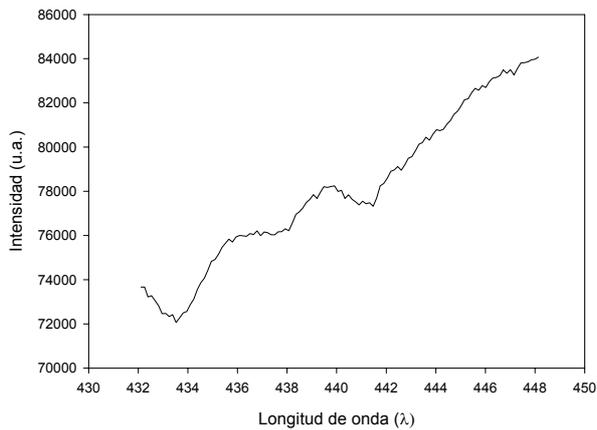


Fig. 7. Gráfica de la imagen 360

Análisis de los espectros.

Para el análisis de los espectros se utilizan los fundamentos teóricos de la técnica D.O.A.S. descrita más arriba. Las secciones transversales de los diversos gases se encuentran disponibles en la bibliografía especializada y corresponden a datos de variación rápida.

Según el gas que se analiza, y según sea la longitud de onda, la sección transversal $\sigma(\lambda)$ nos indica si hay marcados patrones de absorción o no. En nuestro caso, dado el rango de longitudes de onda que hemos elegido (432 nm a 448 nm), tendremos una fuerte presencia espectral de NO_2 y una menos evidente de O_3 . En la figura 8 se muestra la sección transversal del NO_2 en el rango considerado (7).

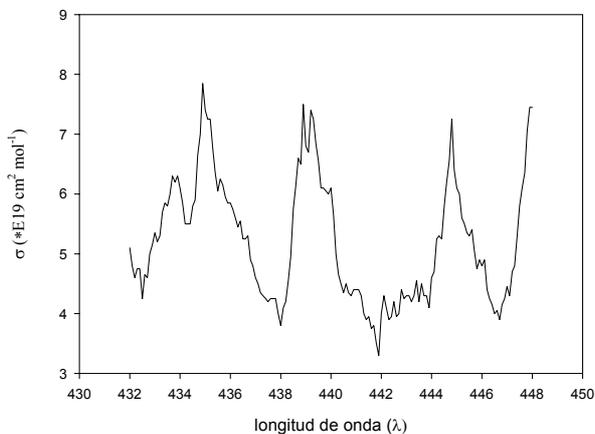


Fig. 8. Sección transversal del NO_2 , en el rango [432-448] nm para 298 K.

A fin de realizar una comparación entre los espectros medidos y la sección transversal de referencia primero es necesario quitar la variación lenta del espectro medido, según la ecuación (4).

Para ello podemos simplemente graficar la “línea de tendencia”, utilizando alguna hoja de cálculo, para obtener la “variación lenta” del espectro analizado. La misma se muestra en la figura 9.

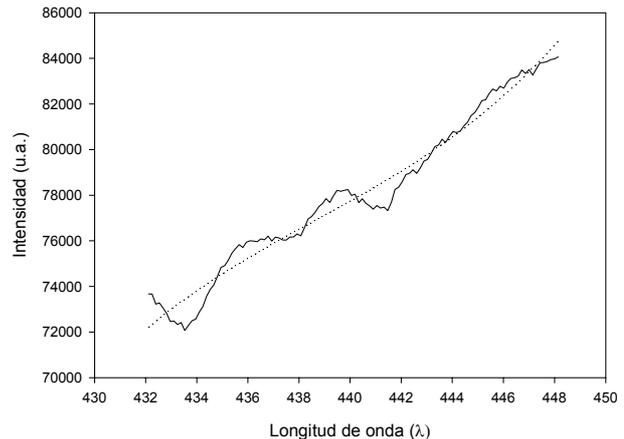


Fig. 9. Línea de tendencia (línea de puntos) en la grafica 360.

Luego se restan los valores del espectro registrado con los de la línea de variación lenta: de esta manera se logra obtener la variación rápida del espectro, que es donde se encuentra la información que se busca.

El poder de resolución de nuestro espectrógrafo es baja ($R \approx 550$) pero es suficiente para registrar las variaciones que queremos medir. En la figura 10 se ve la variación rápida obtenida de la información provista por la figura 7.

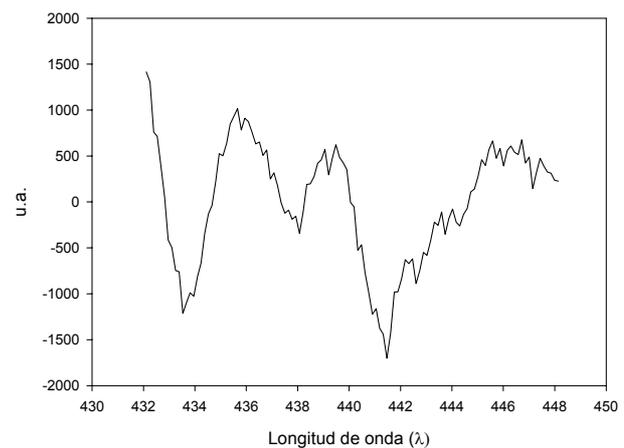


Fig. 10. Variación rápida de la señal de la imagen 360.

Puede observarse que prácticamente se repite la “estructura” espectral de la sección transversal del NO_2 de la figura 8 en la variación rápida del espectro analizado (Fig. 10). Por ejemplo: tenemos un pico entre 434 nm y 438 nm, otro entre 438 nm y 442 nm, luego sube hasta 445 nm y baja hasta 447 nm lo que también se observa en la figura 8, pero muy poco marcado. Las diferencias entre las gráficas se deben en principio a que en los datos del espectro analizado intervienen otros gases aparte del NO_2 . Además influye el tipo de regresión que tomamos para quitar la variación lenta.

Esto demuestra que la resolución del espectrógrafo es lo suficientemente buena para medir dichas señales.

IV. CONCLUSIONES

Se han registrado espectros solares difusos con un espectrógrafo tipo Littrow, de fabricación propia, con el propósito de utilizarlo para analizar sus características.

El espectrógrafo ha demostrado que resuelve aceptablemente el patrón de absorción de NO_2 , por lo que serviría para realizar mediciones de otras especies en la atmósfera.

Esto brinda la posibilidad de realizar estudios atmosféricos a partir de registros de radiación solar difusa cenital utilizando el espectrógrafo construido.

Referencias:

1-Boecker E. y Van Grondelle R (1.999) Environmental Physics. John Wiley & Sons.
2- Irvarne J. y Cho H. (1.980) Atmospheric Physics. D. Reidel Publishing Company.

3- Wark K. y Warner C. (1.998). Contamination del Aire – Origen y Control. Editorial Limusa.

4- Platt U. (1994) Chapter 2: Differential Optical Absorption Spectroscopy. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques. John Wiley & Sons, Inc.

5- Salazar G., Romero G., Alanís E. y Saravia L. (2005) Construcción y calibración de un espectrógrafo tipo Littrow. Energías Renovables y Medio Ambiente – Vol. 16.

6- Gil M. y Cacho J. (1992) NO_2 Total Column Evolution during the 1989 spring at Antarctica Peninsula. Journal of Atmospheric Chemistry. Vol. 15. pp 187 – 200. Kluwer Academic Publishers.

7-Leroy B., Rigaud P. y Hicks E. (1987) Visible Absorption cross-section of NO_2 at 298 K and 235 K. Annales Geophysicae, 5A(4), pp 247-250.