

## Medida de la turbulencia atmosférica en los Observatorios de Canarias: la técnica SCIDAR

J.J. Fuensalida<sup>(1)</sup>, B. García-Lorenzo<sup>(1)</sup>, J.A. Castro-Almazán<sup>(1)</sup>, S. Chueca<sup>(1)</sup>, J.M. Delgado<sup>(1)</sup>, J.M. González-Rodríguez<sup>(1)</sup>, E. Hernández<sup>(1)</sup>, C. Hoegemann<sup>(1)</sup>, E.G. Mendizabal<sup>(1,2)</sup>, C. Muñoz-Tuñón<sup>(1)</sup>, M. Reyes<sup>(1)</sup>, M.A.C. Rodríguez-Hernández<sup>(1)</sup>, A.M. Varela<sup>(1)</sup>, M. Verde<sup>(1)</sup>, J. Vernin<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Astrofísica de Canarias, C/ Vía Láctea, S/N, 38200 La Laguna, Tenerife, Canarias. jjf@iac.es

<sup>(2)</sup> Instituto Nacional de Astronomía, Óptica y Electrónica, Tonanzintla, Puebla, México

<sup>(3)</sup> Laboratoire Universitaire d'Astrophysique de Nice, Niza, Francia

### Resumen

La turbulencia atmosférica afecta de manera considerable a las observaciones astronómicas desde Tierra. El conocimiento de las capas de turbulencia dominantes en la atmósfera permitiría construir instrumentos ópticos eficientes que compensen las distorsiones introducidas por la turbulencia atmosférica en las imágenes de los objetos astronómicos. El Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) lleva a cabo un programa de caracterización de la turbulencia en los observatorios del Teide (OT) y Roque de los Muchachos (ORM) en las islas de Tenerife y La Palma, respectivamente, mediante la técnica SCIDAR (Scintillation Detection and Ranging). SCIDAR es una técnica que permite medir tanto el perfil vertical de intensidad de turbulencia atmosférica ( $C_N^2(h)$ ), como la velocidad de las capas turbulentas en función de la altura ( $V(h)$ ). En este trabajo describimos los conceptos de la técnica SCIDAR, y presentamos resultados estadísticos de perfiles de turbulencia atmosférica obtenidos para el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM, La Palma, Canarias), así como su evolución temporal.

### 1. Introducción

La atmósfera terrestre afecta drásticamente a las observaciones astronómicas desde Tierra. La turbulencia atmosférica distorsiona los frentes de onda de la luz que se propaga a través de ella, degradando fuertemente la resolución espacial que un telescopio de gran diámetro podría alcanzar en ausencia de atmósfera. En los últimos años se han desarrollado técnicas instrumentales, denominadas sistemas de óptica adaptativa, que tratan de compensar los efectos de la turbulencia atmosférica sobre la luz que nos llega de los objetos astronómicos. Estas técnicas son complejas

en diseño y operación debido al desconocimiento de los parámetros que describen la turbulencia atmosférica en los observatorios donde se instalan. Sólo la correcta caracterización del comportamiento estadístico de la estructura vertical de la turbulencia permitiría simplificar el diseño de los sistemas de óptica adaptativa y lograr su máxima eficiencia. Con este fin, diversas técnicas están siendo probadas y aplicadas en diferentes observatorios del mundo (ver <http://www.iac.es/projects/sitesting/> para más información). El Instituto de Astrofísica de Canarias comenzó un programa sistemático de caracterización de la turbulencia atmosférica en los observatorios Canarios. En este trabajo describimos la técnica SCIDAR y presentamos algunos resultados estadísticos obtenidos para el Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en la isla de La Palma.

### 2. La Técnica SCIDAR

Las capas de turbulencia presentes en la atmósfera terrestre introducen fluctuaciones de intensidad, denominadas centelleo, que distorsionan el frente de ondas de la luz que nos llega de los objetos astronómicos. La técnica SCIDAR estudia los patrones de centelleo producidos por la turbulencia atmosférica en la luz procedente de las dos estrellas de un sistema binario sobre la pupila de un telescopio, para determinar la estructura vertical de la turbulencia y la velocidad de las capas turbulentas. La metodología de esta técnica consiste en obtener un número elevado de patrones de centelleo instantáneos (con tiempos de exposición entre 1 y 3 milisegundos) con un telescopio de apertura suficientemente grande (diámetros superiores a 75 centímetros). Los perfiles de turbulencia atmosférica se derivan de la inversión de las funciones de autocorrelación promedio de los patrones de centelleo, mientras que la velocidad de

las capas turbulentas se obtiene de las correlaciones temporales de una serie de patrones.

Consideremos el caso más simple en el que nuestra atmósfera sólo tiene una capa de turbulencia situada a una altura  $H$ . Si observamos un sistema binario situado en la vertical de nuestro telescopio, cuyas estrellas están separadas un ángulo  $\phi$  en el cielo, obtendremos una función de autocorrelación formada por un triplete de puntos cuya separación es  $R$ . Por geometría (ver figura 1) se tendrá:  $H=R/\phi$ . Esta situación simple se puede generalizar al caso en el que tengamos diversas capas turbulentas, estando cada capa asociada a su altura. Dicha altura es calculable a partir de la posición de los picos de la función de autocorrelación media de las imágenes de la binaria.

La técnica SCIDAR clásica (Vernin & Roddier 1973) fue desarrollada durante años, pero no permitía medir la turbulencia en capas de baja altura, cercanas a la cúpula del telescopio desde el que se realizan las medidas. Para resolver este inconveniente, se propuso la técnica SCIDAR generalizada (Fuchs, Tallon & Vernin 1998) que ha sido explorada y probada en los últimos años (Ávila, Vernin & Cuevas 1998; Kluckers et al. 1998). Mientras que en el método SCIDAR clásico el plano de medida está situado en el plano de la pupila del telescopio, en el SCIDAR generalizado el plano de medida se coloca en un plano conjugado por debajo del plano de la pupila para poder medir la turbulencia en capas bajas.

### 3. Resultados estadísticos para el ORM

El Instituto de Astrofísica de Canarias lleva realizando observaciones SCIDAR rutinarias desde el año 2002 en el Observatorio del Teide (Tenerife) y desde Febrero de 2004 en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma). En la figura 2 se muestra la evolución de la turbulencia atmosférica a lo largo de una noche de observación en el ORM.

En el ORM disponemos ya de más de 70000 perfiles individuales de turbulencia, obtenidos en periodos de una semana durante doce meses consecutivos. El análisis de los resultados estadísticos correspondientes a los seis primeros meses de observación en el ORM han sido presentados recientemente y constituye el primer estudio estacional de perfiles verticales de turbulencia (Fuensalida et al. 2004). Resultados preliminares derivados para el Observatorio del Teide pueden encontrarse en Fuensalida et al. 2004a,b. Combinando los perfiles individuales obtenidos durante 68 noches de observación,

hemos derivado el perfil de turbulencia estadístico para el ORM (figura 3). En este perfil estadístico encontramos que gran parte de la turbulencia está concentrada en una capa cercana al nivel del suelo, mientras que sólo se observan trazas de otras capas de turbulencia más débiles a 2.5 y 10.6 kilómetros sobre el observatorio. De la evolución temporal de los perfiles promedio mensuales en el ORM observamos una evolución del perfil de turbulencia a lo largo del año. En general, más de la mitad de la turbulencia está concentrada en la capa cercana al suelo, sobre todo durante los meses de invierno (figura 4a). En verano, la turbulencia aparece bien estratificada en dos o tres capas situadas al nivel del suelo, 2.5 y 12.6 kilómetros, como se muestra en la figura 4b, en la que presentamos el perfil promedio para el mes de julio.

Los resultados preliminares del análisis de los perfiles obtenidos en el ORM indican que la turbulencia atmosférica sobre el observatorio se concentra en capas bajas, situadas por debajo de los primeros cinco kilómetros sobre el nivel del observatorio (2400 metros). Esporádicamente se detectan diversas capas de turbulencia situadas por encima de los 5 kilómetros, sobre todo en los meses de verano, en los que existe menor turbulencia concentrada en las capas bajas. La tendencia observada favorece la corrección de los efectos de la atmósfera sobre las imágenes astronómicas en campos excepcionalmente grandes comparados con otros observatorios astronómicos de alta calidad.

### 4. Agradecimientos

Nuestra investigación está parcialmente financiada por el Ministerio Español de Ciencia y Tecnología (AYA2003-07728).

### 5. Referencias

- [1] Ávila, R., Vernin, J., & Cuevas, S. 1998, *PASP*, 110, 1106
- [2] Fuchs, A., Tallon, M., & Vernin, J. 1998, *PASP*, 110, 86
- [3] Fuensalida, J.J., García-Lorenzo, B., Castro, J., Chueca, S., Delgado, J.M., González-Rodríguez, J.M., Hoegemann, C., Reyes, M., Verde, M., & Vernin, J. 2004, *SPIE*, 5572, 1
- [4] Fuensalida, J.J., Chueca, S., Delgado, J.M., García-Lorenzo, B., Rodríguez-González, J.M., Hoegemann, C., Mendizábal, E., Reyes, M., Verde, M., & Vernin, J. 2004a, *SPIE*, 5490, 749

[5] Fuensalida, J.J., Chueca, S., Delgado, J.M., García-Lorenzo, B., González-Rodríguez, J.M., Hoegemann, C., Mendizábal, E., Reyes, M., Verde, M., & Vermin, J. 2004b, 5382, 619

[6] Kluckers, V., Woeder, N., Adcock, M., & Dainty, C. 1998, A&ASuppl.Ser., 130, 141

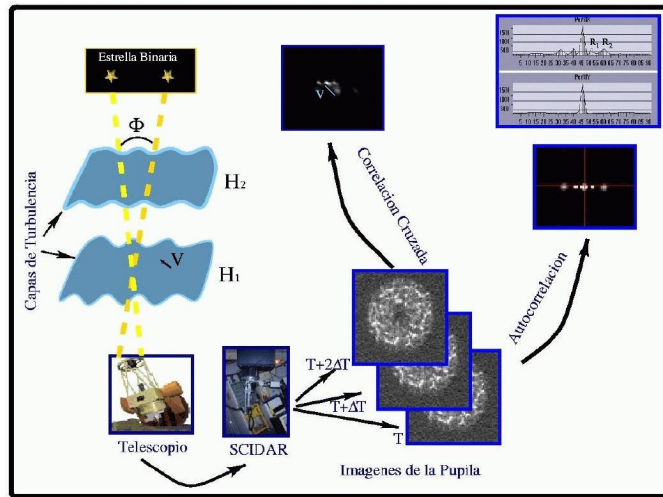


Figura 1: Visión esquemática de la técnica SCIDAR. Los patrones de centelleo producidos en la pupila de nuestro telescopio por la luz de un sistema binario son analizados mediante software para obtener la estructura vertical de la turbulencia atmosférica y la velocidad de las distintas capas turbulentas.

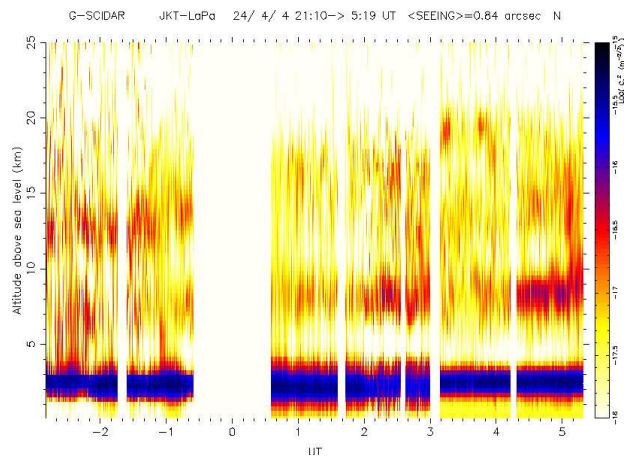


Figura 2: Evolución temporal de  $C_N^2(h)$  a lo largo de la noche del 24 al 25 de Abril de 2004 en el Observatorio del Roque de los Muchachos (la Palma). El eje horizontal corresponde al tiempo en horas, tomando como origen la medianoche. El eje vertical corresponde a la altura sobre el nivel del mar en kilómetros. Los colores corresponden a la intensidad de la turbulencia de acuerdo a la escala a la derecha. El ORM está a una altura de 2400 metros sobre el nivel del mar, donde se concentra la capa de turbulencia más intensa en este gráfico.

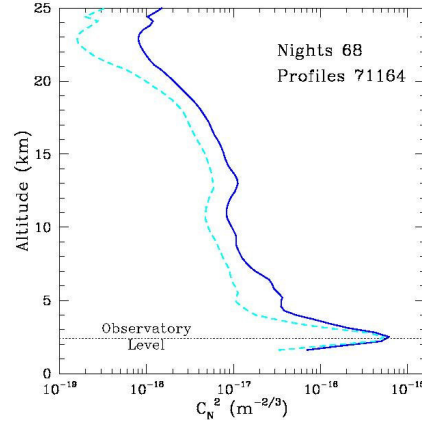


Figura 3: Perfil de turbulencia promedio (línea continua) y mediano (línea discontinua) obtenido para el ORM a partir de 68 noches de observación en este observatorio utilizando la técnica SCIDAR. La línea horizontal punteada indica la altura del observatorio (2400 metros).

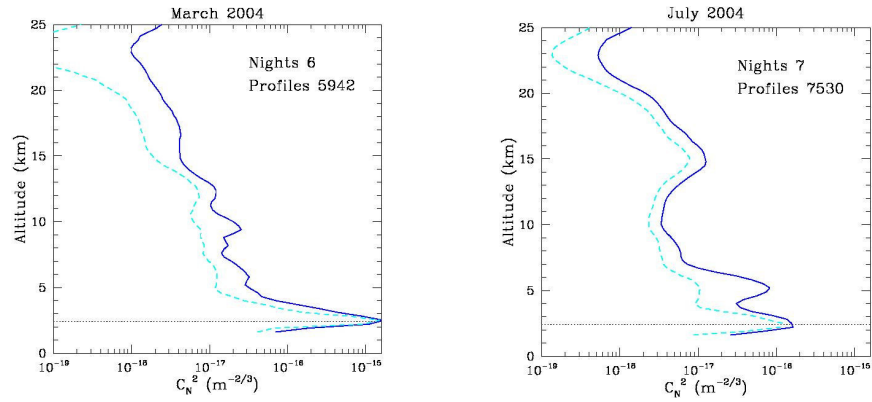


Figura 4: Perfil de turbulencia promedio (línea continua) y mediano (línea discontinua) obtenido para de observaciones mediante la técnica SCIDAR para los meses de Marzo y Julio de 2004 en el Observatorio del Roque de los Muchachos. En las gráficas indicamos el número total de noches de observación y perfiles individuales de los que se ha sacado la estadística..