

ANÁLISIS DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA NOCTURNA DURANTE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL CIBA 2008

C. Yagüe ⁽¹⁾, D. Ramos ⁽³⁾, M. Sastre ⁽¹⁾, G. Maqueda ⁽²⁾, S. Viana ⁽³⁾, E. Serrano ⁽¹⁾, G. Morales ⁽³⁾, B. Ayarzagüena ⁽¹⁾, C. Viñas ⁽⁴⁾ & E. Sánchez ⁽⁵⁾

(1) Dept. de Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid, Spain.
(carlos@fis.ucm.es)

(2) Dept. de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera. Universidad Complutense de Madrid, Spain.

(3) Agencia Estatal de Meteorología, Spain.

(4) Dpto. Tecnología de la Edificación. E.U. de Arquitectura Técnica. Universidad Politécnica de Madrid, Spain

(5) Dept. de Ciencias Ambientales. Universidad de Castilla-La Mancha, Toledo, Spain.

RESUMEN

En el mes de junio de 2008 se desarrolló una campaña de medidas en la Capa Límite Atmosférica en el CIBA (Centro de Investigación de la Baja Atmósfera), que se encuentra sobre un extenso páramo de la meseta norte (41°49' N, 4°56' W) de características de terreno homogéneo. Se dispuso de instrumentación en una nueva torre meteorológica de 10m, que incluye en varios niveles sensores de temperatura y humedad, anemómetros de cazoletas y veletas, así como un anemómetro sónico. También se dispuso de dos microbarómetros con tecnología de cuarzo en los niveles de 50 y 100m en la torre principal del CIBA (de 100m). Además, tres microbarómetros adicionales se situaron en una disposición triangular de unos 200m de lado en la superficie. Por otra parte, se utilizó un globo cautivo para la determinación de perfiles verticales de temperatura y viento hasta 1000 m de altura. Finalmente, un monitor de partículas GRIMM (MODELO 365), que permite la medida simultánea y continúa de la concentración de partículas materiales de diferentes tamaños (PM10, PM2.5 y PM1) cada 6 segundos, se instaló a 1.5m del suelo. Este trabajo muestra algunos resultados preliminares de la campaña CIBA2008, a partir del análisis de los principales procesos físicos presentes en la Capa Límite Nocturna (NBL), de los diferentes periodos de estabilidad observados y de los correspondientes parámetros turbulentos, así como de las estructuras coherentes detectadas. Las perturbaciones de presión medidas en los diferentes microbarómetros permiten estudiar los principales parámetros ondulatorios a través de transformadas *wavelet*, y comparar dichas estructuras con las detectadas en los registros de viento y de partículas.

1.- INTRODUCCIÓN

La Capa Límite Atmosférica (ABL) es la zona de la baja atmósfera que está directamente influida por la superficie terrestre a través de los forzamientos dinámicos y térmicos. Por la noche con frecuencia se enfría y forma una capa estable conocida como Capa Límite Estable (SBL) o Capa Límite Nocturna (NBL) (Stull, 1988). Muchos fenómenos tienen lugar en la SBL: divergencia del flujo radiativo, chorros de capa baja, turbulencia intermitente, generación y ruptura de ondas o formación de nieblas (Viana et al., 2008) entre otros. Además, estos procesos tienen una importante influencia en la evolución y el comportamiento de la difusión atmosférica en la ABL. Algunos ejemplos estarían relacionados con la difusión de diferentes componentes y propiedades atmosféricas dependiendo de los diferentes procesos y condiciones atmosféricas presentes, siendo especialmente importantes la velocidad y cizalla del viento, la turbulencia y el grado de estratificación (Arya, 1999).

Por la noche, la generación mecánica de turbulencia y la atenuación de la misma producida por la estabilidad presente pueden cambiar rápidamente, llevando a un diferente nivel de turbulencia, que en muchas ocasiones es intermitente y esporádico. Para poder llegar a un mejor conocimiento del comportamiento de la NBL y de los fenómenos físicos relacionados con ella, se han llevado a cabo en los últimos años diferentes campañas de campo, tanto en latitudes medias (Cuxart et al., 2000; Poulos et al., 2002; Yagüe et al., 2007; Conangla et al., 2008) así como en zonas polares (Grachev et al., 2005).

Un punto interesante de estudio es la influencia de la estabilidad y el enfriamiento radiativo en la generación de nieblas, buscando relaciones entre la niebla y la turbulencia, ya que los procesos físicos implicados en su evolución no se entienden de un modo completo (Welch and Welicki, 1986; Zhou and Ferrier, 2008; Terradellas et al., 2009). Otro punto importante en el estudio de la SBL es la relación existente entre la turbulencia y las ondas, especialmente las ondas internas de gravedad, que con frecuencia aparecen en condiciones estables (Nappo, 2002; Viana et al., 2009). Estas ondas pueden ser detectadas mediante el análisis de las variaciones de presión a un cierto nivel por encima de la superficie.

En este trabajo presentamos resultados nocturnos obtenidos durante la campaña CIBA2008 considerando algunos de los procesos que se acaban de citar. Los principales objetivos son: a) Estudiar los procesos físicos fundamentales presentes en la NBL, así como los diferentes periodos de estabilidad observados y los correspondientes parámetros turbulentos; b) Analizar las estructuras coherentes detectadas en situaciones estables a partir de diferentes registros micrometeorológicos (presión, viento, concentración de partículas PM).

2.- DATOS E INSTRUMENTACIÓN

Durante el mes de junio de 2008 se llevó a cabo en el Centro de Investigación de la Baja Atmósfera (CIBA) una campaña de campo intensiva (CIBA2008). El centro se encuentra situado (Fig. 1) a unos 30 km al NW de Valladolid capital sobre terreno homogéneo y en el centro de una extensa altiplanicie (41°49' N, 4° 56' W). Se puede encontrar información suplementaria sobre el CIBA y otras campañas previas en Cuxart et al. (2000). En este trabajo hemos analizado ocho días consecutivos de la campaña (14-21 de junio) para poder obtener una completa evolución de las propiedades de la NBL bajo diferentes condiciones sinópticas.

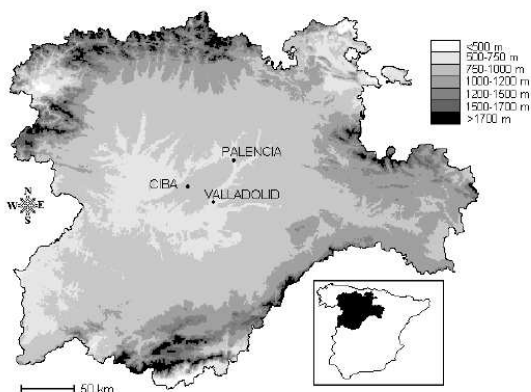


Fig 1.- Localización del CIBA.

Las medidas obtenidas durante la campaña se realizaron a través de diferente instrumentación (ver Tabla 1 para más detalles):

<i>Instrumento</i>	<i>Altura (m)</i>	<i>Frec. de muestreo (Hz)</i>
Anemómetro sónico (METEK USA-1)	10	20
Anemómetro de cazoletas (Theodor Friedrichs. MOD. 4035)	1.5 – 3 – 5 – 7.5 – 10	1
Veletas (Theodor Friedrichs. MOD. 4122)	1.5 – 3 – 5 – 7.5 – 10	1
Termómetros (Theodor Friedrichs. MOD. 2030. PT100)	1.5 – 3 – 7.5 – 10	1
Sensores de humedad (Theodor Friedrichs. MOD. 3030. Capacity probes)	1.5 – 10	1
Microbarómetros (PAROSCIENTIFIC MOD, 6000-16B)	1.5 – 50 – 100	2
Medidor de partículas (GRIMM 365)	1.5	1/6

Tabla 1. Características de los instrumentos de medida utilizados.

1. Instrumentación dispuesta en un mástil de 10m de altitud, que incluye un anemómetro sónico (10m), termómetros, anemómetros de cazoletas y veletas (1.5, 3, 5, 7.5 y 10m), y sensores de humedad relativa (1.5 y 10m).
2. Dos microbarómetros de precisión, instalados en la torre permanente del CIBA de 100m (50 y 100m), que medían la presión atmosférica con una precisión de 0.002 hPa, de manera que permiten detectar estructuras coherentes (ondas de gravedad, ondas de K-H, etc) de amplitudes típicas entre 0.01-0.2 hPa y periodos del orden de minutos, así como perturbaciones más rápidas de origen turbulento.
3. Tres barómetros de precisión cerca de la superficie (1.5m) formando un triángulo de unos 200m de lado, para poder caracterizar los fenómenos coherentes (periodo,

longitud de onda, velocidad de fase y dirección de propagación) que se propagan por el entorno del CIBA (Viana et al., 2007). Asimismo se instaló también en superficie (1.5m) un monitor de partículas que mide la concentración de partículas: PM10, PM2.5 y PM1, y se dispuso de las medidas procedentes de un equipo RASS-SODAR, de uso permanente en el CIBA que proporciona perfiles continuos de temperatura y viento en los primero centenares de metros en la atmósfera.

- Un equipo de sondeo cautivo que proporcionó 63 perfiles de temperatura y viento hasta una altura de 200-900m, en función de las condiciones meteorológicas presentes en cada momento.

3.- RESULTADOS

En este apartado presentaremos la evolución de los principales parámetros evaluados para las diferentes noches analizadas de la campaña CIBA2008, describiendo en detalle dos noches de características bastante diferentes.

3.1 Evolución de los principales parámetros en CIBA2008

La Fig. 2 muestra las evoluciones de las variables meteorológicas medias y de estabilidad (R_B) para los 8 días estudiados (14-21 junio 2008). Además se han calculado los parámetros turbulentos (velocidad de fricción, energía cinética turbulenta y flujo de calor sensible). En la Tabla 2 se encuentran las definiciones de los diferentes parámetros evaluados. El periodo considerado para estudiar la NBL fue entre las 1800 y las 0600 GMT, lo que incluye la transición vespertina (la puesta de Sol tiene lugar alrededor de las 2000 GMT) y la transición diurna (amanece a las 0445 GMT aproximadamente). El periodo estudiado se puede dividir en dos con diferente estabilidad: 4 noches con una capa límite neutral o débilmente estable (13-14, 14-15, 15-16 16-17) y 4 noches donde se desarrollaron fuertes estabilidades (17-18, 18-19, 19-20, 20-21). Las noches estables se caracterizaron por vientos débiles, que propiciaron el desarrollo de fuertes inversiones superficiales de temperatura, y valores altos y positivos del número de Richardson (se ha tomado un valor crítico de 0.5) La humedad relativa juega un papel muy importante en la evolución de las temperaturas nocturnas y en la estabilidad desarrollada (Viana et al., 2008): altos valores de humedad (13-14, 15-16, 16-17) conducen a pequeñas disminuciones de la temperatura y a capas límite cuasi-neutrales, incluso en presencia de vientos bajos (noche del 16-17).

Parámetro	Expresión
Energía cinética turbulenta	$TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$
Velocidad de fricción	$U_* = \sqrt{(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2}$
Fuerza de la inversión de temperatura	$\Delta T_{10-1.5} = T_{10m} - T_{1.5m}$
Número de Richardson Bulk	$Ri_B = \frac{\frac{g}{T_0} \sqrt{Z_1 Z_2} \ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \Delta\theta}{(\Delta U)^2}$
Flujo de calor sensible	$H = c_p \rho \langle w'\theta' \rangle$

Tabla 2. Parámetros turbulentos y de estabilidad evaluados.

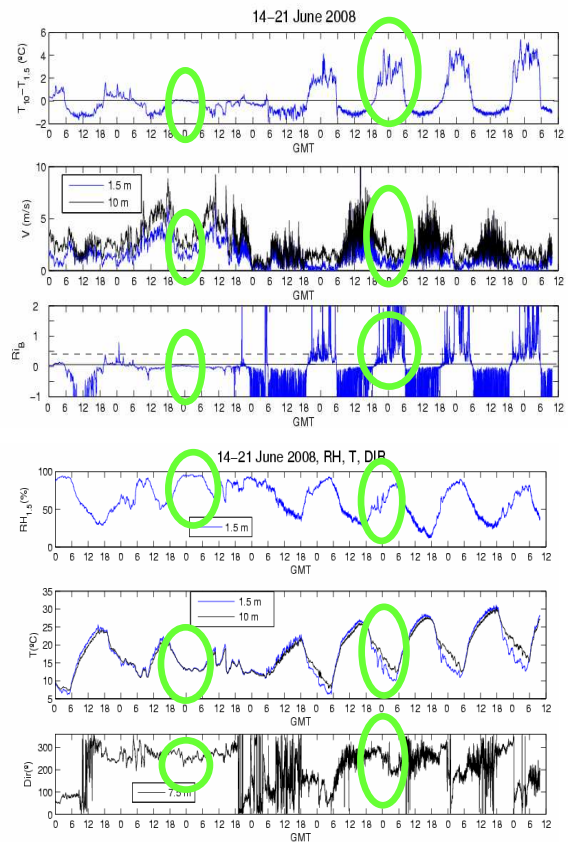


Fig. 2.- De arriba a abajo: a) diferencia de temperatura entre los niveles de 10m y 1.5m, b) módulo de la velocidad del viento a 10m y 1.5m, c) número de

Richardson *Bulk*, d) humedad relativa a 1.5m, e) temperatura en los niveles de 1.5m y 10m, f) dirección del viento en 7.5m, desde el 14 al 21 de junio de 2008. Las noches del 15-16 y del 18-19 de junio están señaladas con un círculo.

En cuanto al comportamiento de los parámetros turbulentos (evaluados en promedios de 5min., Fig. 3), se muestra la alta correlación existente entre la energía cinética turbulenta (TKE) y la velocidad de fricción (U_*). Ambos parámetros permiten detectar durante la noche los momentos de mayor turbulencia frente a otros con fuerte estabilidad.

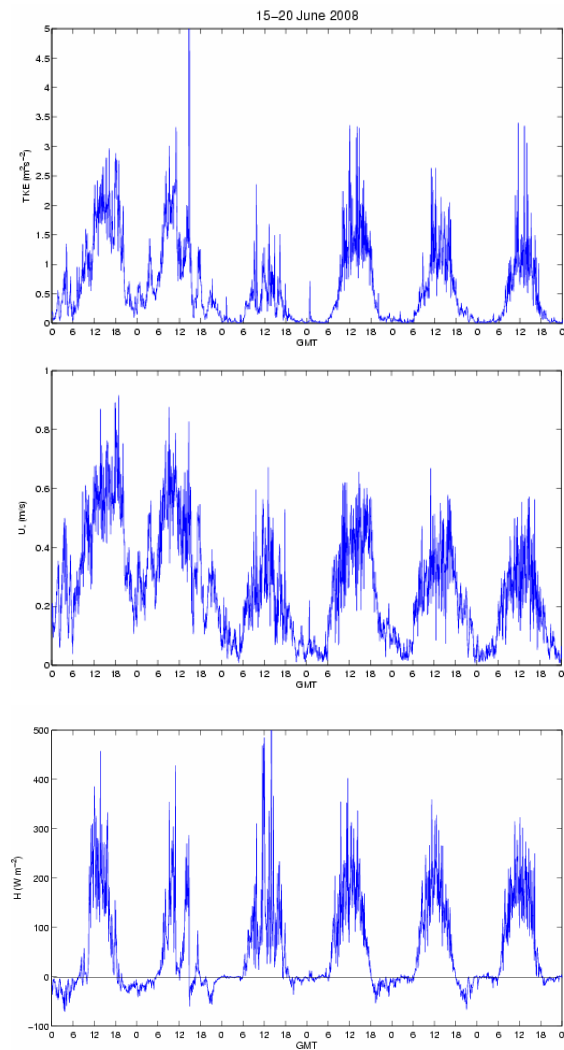


Fig. 3.- De arriba a abajo: Evolución del 15 al 20 de junio de la energía cinética turbulenta, velocidad de fricción, y flujo de calor sensible.

Por lo que se refiere al comportamiento de la concentración de partículas materiales, hay que resaltar que en general se observaron valores mínimos a las horas diurnas y máximos durante la noche (Fig. 4), encontrándose las mayores diferencias entre el día y la noche en el segundo periodo estudiado (18-21 de junio), donde las noches

fueron más estables. Esto podría estar relacionado con una menor capacidad de la baja atmósfera para difundir las partículas durante las noches estables. Sin embargo no se ha obtenido una clara correlación entre los diferentes parámetros analizados.

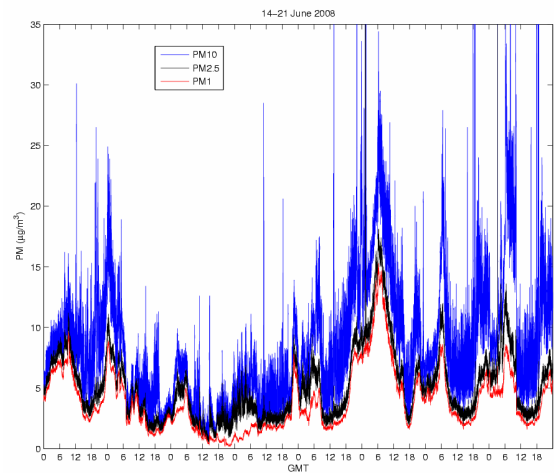


Fig. 4.- Evolución de las concentraciones de PM10, PM2.5 y PM1 a lo largo de los 8 días analizados

Aunque los resultados muestran una dispersión alta, existe una tendencia decreciente en PM10 para viento y turbulencia altos (Fig. 5), lo que corresponde a una mayor capacidad difusiva de la baja atmósfera. Sin embargo, los valores más altos de PM10 no aparecen con vientos mínimos, sino alrededor de 2 m s^{-1} (Fig. 6).

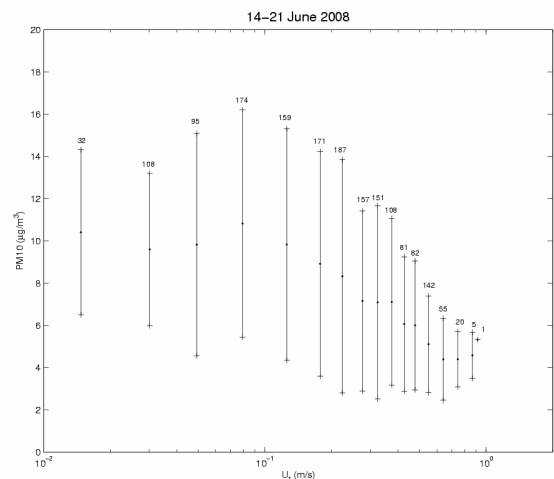


Fig. 5.- PM10 vs. Velocidad de fricción. Las barras verticales indican la desviación típica. Sobre las mismas se muestran el número de pares de puntos por intervalo de velocidad de fricción utilizado.

Los resultados son similares para PM2.5 y PM1 (no se muestran). En la Fig. 7 se puede apreciar la correspondencia entre las variaciones en las propiedades turbulentas y las concentraciones de PM2.5. Los máximos valores de PM2.5 se alcanzan con valores bajos de los parámetros turbulentos

(velocidad de fricción y energía cinética turbulenta). La evolución de la noche del 18-19 de junio (Fig. 7 inferior) muestra los valores tan pequeños de los parámetros turbulentos como consecuencia de la alta estabilidad presente, y como la concentración de partículas de radio inferior a $2.5 \mu\text{m}$ va subiendo a lo largo de la noche debido a la muy débil intensidad de la mezcla turbulenta.

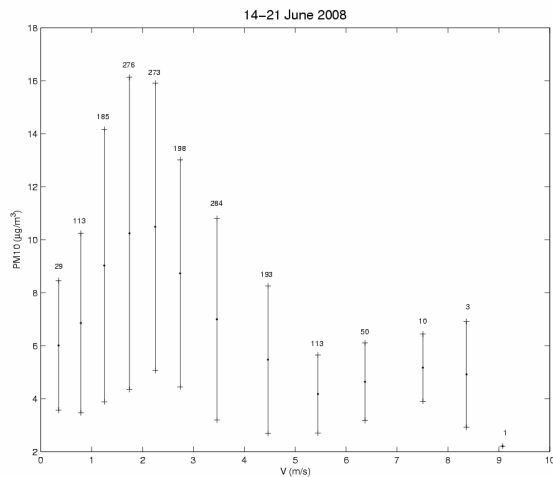


Fig. 6.- PM10 vs. Velocidad del viento a 1.5m. La información de las barras verticales es similar a la de la Fig. 5.

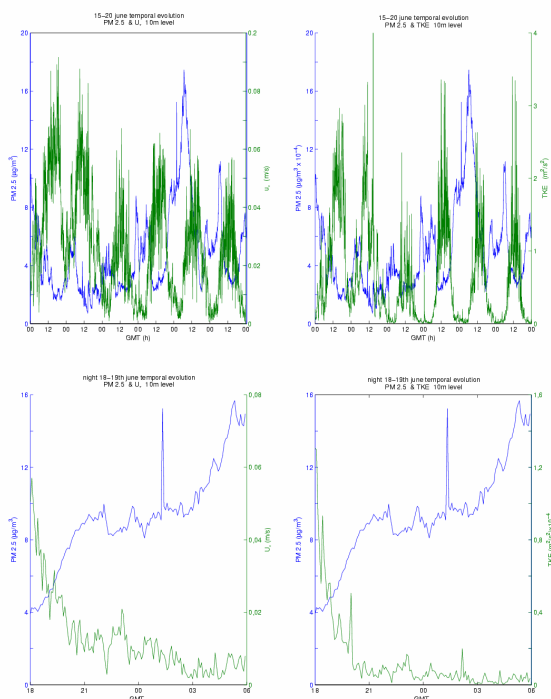


Fig. 7.- Arriba: Evolución de PM2.5, velocidad de fricción y energía cinética turbulenta para el periodo 15-20 de junio. Abajo: lo mismo para la noche del 18-19 junio.

Para desarrollar este apartado hemos elegido por un lado la noche del 15-16 de junio, caracterizada principalmente por una NBL cuasi-neutral, gobernada por vientos moderados. Los valores de la humedad relativa (cercanos al 100% desde las 2200GMT en adelante) ayudan a evitar el desarrollo tanto del enfriamiento superficial como de una capa estable (Figs. 1d y 1a). Los microbarómetros no detectaron estructuras coherentes y se midieron valores en general bajos de PM comparados con periodos nocturnos de mayor estabilidad. Por otro lado, la noche del 18-19 de junio (Fig. 8) presenta valores supercríticos del número de Richardson (Fig. 1c). Los sondeos con globo cautivo detectaron una inversión térmica superficial hasta una altura de 200m. Esta alta estabilidad produce unos valores altos de PM, especialmente al final de la noche.

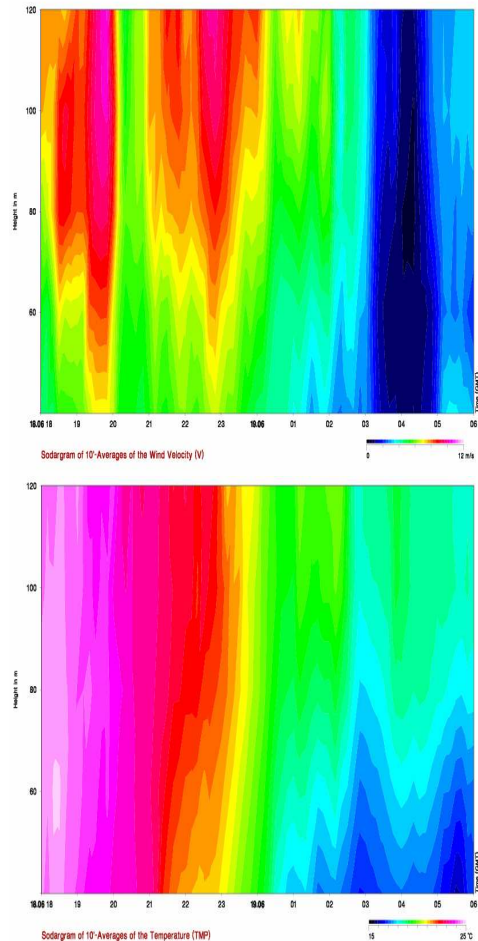


Fig. 8.- Estructura vertical de la velocidad del viento (arriba) y de la temperatura (abajo) obtenidas del RASS-SODAR para la noche del 18-19 de junio (1800 a 0600 GMT)

Los registros de diferentes variables (presión, temperatura, viento, PM) muestran un comportamiento oscilatorio a lo largo de la noche. Esto lleva a la detección de diferentes estructuras

3.2 Comparación de dos noches diferentes

coherentes (Fig. 9) mediante el análisis espectral (*wavelet*).

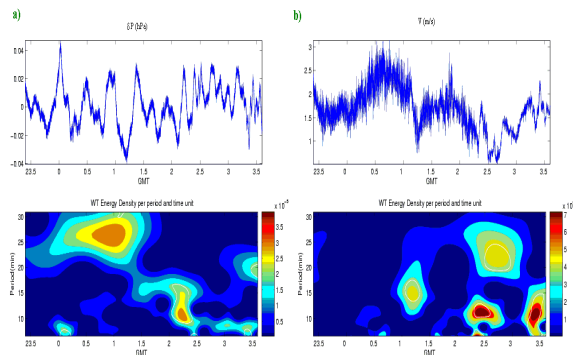


Fig. 9.- Espectro *wavelet* a lo largo de la noche del 18-19 de junio para diferentes variables: a) presión; b) velocidad del viento (sónico).

Las mismas estructuras son detectadas tanto por los microbarómetros en superficie como los instalados en la torre (50 y 100m) (Fig. 9a), lo cual es un indicativo de que estas perturbaciones son generadas por encima de los 100m. Estas estructuras se encuentran durante periodos con gran estabilidad nocturna. Sin embargo, no todas estas estructuras aparecen en los registros de la velocidad del viento, lo que es un indicativo de las interacciones no lineales entre la presión y el viento a lo largo de la noche. Se han encontrado también diferentes estructuras (no se muestran) en las *wavelets* aplicadas a las series de partículas grandes (PM10-PM2.5), medianas (PM2.5-PM1) y pequeñas (PM1).

4.- RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado algunos resultados iniciales de la campaña CIBA2008, mostrando la evolución de variables medias y parámetros de estabilidad y turbulentos para ocho días consecutivos. Los resultados más destacados se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se han encontrado dos periodos diferentes, uno controlado por vientos moderados, cierto grado de inestabilidad con chubascos intermitentes, lo que produjo una NLB cuasi-neutral o de débil estabilidad, y otro periodo con estabilidad moderada a fuerte, en el que se desarrollaron importantes inversiones de temperatura en superficie, que eran erosionados de manera intermitente por estallidos de turbulencia.
- Un ejemplo de noche cuasi-neutral es la del 15-16 de junio, con vientos moderados que mantuvieron un cierto nivel de turbulencia, donde se observó la importancia de altos valores de humedad relativa, que producía

condensación y controlaba el enfriamiento y la estabilidad superficial.

- Por el contrario, un ejemplo de NBL con estabilidad importante es la noche del 18-19 de junio, con vientos débiles, altos números de Richardson, turbulencia intermitente y estructuras coherentes que están presentes en los diferentes registros de presión, viento o concentración de partículas materiales.
- Las concentraciones de partículas medidas a través de PM10, PM2.5 y PM1 son sensibles a la velocidad del viento, a la intensidad de la turbulencia y a las condiciones de estabilidad local, mostrando diferentes espectros *wavelet* para diferentes tamaños de partículas.

5. REFERENCIAS

- Arya, S.P.S. (1999): *Air pollution meteorology and dispersion*, Oxford University Press. 310pp.
- Conangla, L., Cuxart, J. & Soler, M.R. (2008). On the turbulence in the upper part of the lowlevel jet: an experimental and numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.*, 118, 379-400.
- Cuxart, J., C. Yagüe., G. Morales, E. Terradellas., J. Orbe, J. Calvo, A. Fernández, M.R. Soler, C. Infante, P. Buenestado, A. Espinalt, H.E. Joergensen, J.M. Rees, J. Vilà, J.M. Redondo, I.R. Cantalapiedra, & Conangla, L. (2000): "Stable atmospheric boundary layer experiment in Spain (SABLES 98): A report". *Boundary-Layer Meteorol.*, 96, 337-370.
- Grachev, A.A., Fairall, CH.W., Persson, P.O.G., Andreas, E.L. & Guest, P.S. (2005). Stable boundary-layer scaling regimes: The SHEBA data. *Boundary-Layer Meteorol.*, 116, 201-235.
- Nappo, C. J. (2002). *An introduction to atmospheric gravity waves*, Academic Press, California, 276 pp.
- Poulos, G.S., Blumen, W., Fritts, D.C., Lundquist, J.K., Sun, J., Burns, S.P., Nappo, C., Banta, R. , Newsom, R., Cuxart, J., Terradellas, E., Balsley, B. & Jensen, N. (2002). CASES-99: A Comprehensive Investigation of the Stable Nocturnal Boundary Layer. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 555-581.
- Roach, W.T., Brown, R., Caughey, S.J. , Garland, J.A. & Readings, C.J. (1976). The physics of radiation fog I – a field study. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 313-333.

San José, R., Casanova, J.L., Vilorio, R.E. & Casanova, J. (1985). Evaluation of the turbulent parameters of the unstable surface Boundary layer outside Businger's range. *Atmos. Environ.*, 19, 1555-1561.

Stull, R.B., (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 666 pp.

Terradellas, E., Ferreres, E. & Soler, M.R. (2008). Analysis of Turbulence in Fog Episodes. *Adv. Sci. Res.*, 2, 31-34.

Viana, S., Terradellas, E., Yagüe, C. & Maqueda, G. (2008): Analysis of the different regimes of atmospheric turbulence observed during a single night. *Nuovo Cimento C*, 31, 723 -742.

Viana, S., C. Yagüe & G. Maqueda (2009): Propagation and effects of a mesoscale gravity-wave over a weakly-stratified stable boundary layer during SABLES2006 field campaign. *Boundary-Layer Meteorol.*, 133, 165-188.

Welch, R.M. & Welicki, B.A. (1986). The stratocumulus nature of fog. *J. Appl. Meteorol.*, 25, 101-111.

Yagüe C., Viana, S., Maqueda, M., Lazcano, M.F., Morales, G & Rees, J.M. (2007). A study on the nocturnal atmospheric boundary layer: SABLES2006. *Física de la Tierra*, 19, 37-53.

Available from
<http://revistas.ucm.es/fis/02144557/articulos/FITE0707110037A.PDF>

Zhou, B. & Ferrier, B.S. (2008). Asymptotic Analysis of Equilibrium in Radiation Fog. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 1704-1722.

AGRADECIMIENTOS

* Proyectos CGL2006-12474-C03-03 y CGL2009-12797-C03-03 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

* Grupos de Investigación (Micrometeorología y Variabilidad Climática: 910437) financiados por el Banco Santander y la Universidad Complutense de Madrid (Financiación Grupos UCM-BSCH GR58/08).

* Prof. José-Luis Casanova (Director del CIBA) y Profª. Mª Luisa Sánchez (Universidad de Valladolid) por facilitarnos la realización de la campaña y la cesión de los datos del RASS-SODAR. También agradecemos al Dr. Javier Peláez (Técnico del

CIBA) su estimable ayuda durante la campaña CIBA2008.