

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE EXPLORACIÓN DE LA CAPA SUPERFICIAL ATMOSFÉRICA

En este capítulo exponemos los recursos necesarios para la realización de campañas experimentales en la capa límite atmosférica, enfatizando sobre aquellos que hemos utilizado en nuestra experimentación de la capa superficial atmosférica, con vistas a cumplir con los objetivos planteados en este trabajo.

2.1 Introducción

En la actualidad, la mayor parte del conocimiento que se tiene de la capa fronteriza atmosférica procede de las medidas. La mayoría obtenidas en distintas campañas experimentales, algunas en el laboratorio y otras mediante simulaciones numéricas. Aunque existen diferentes fuentes de datos, en micrometeorología, las teorías y las parametrizaciones sólo son valoradas y aceptadas si describen comportamientos observados en la capa fronteriza.

Por esta razón, en las últimas décadas, varios experimentos de campo importantes han proporcionado nuevo conocimiento sobre la capa superficial atmosférica. Empezando por la campaña experimental realizada en Great Plains, EE.UU., en 1953, el experimento de Wangara, Australia, en 1967, la campaña experimental en Kansas, EE.UU., en 1968, el experimento de Minesota, EE.UU., en 1973 y el experimento de Koorin, Australia, en 1974. Pasando por la Antártica, en la estación Halley IV, con dos intensas campañas realizadas en 1986 y en 1991, entre otros muchos experimentos realizados en diferentes localizaciones de todo el planeta. Hasta llegar a las dos campañas experimentales, en las que el grupo de micrometeorología ha participado, una en Valladolid en 1998 (Cuxart et al., 2000; sección 5.1) y otra en Kansas en 1999 (Poulos et al., 2002; sección 6.4).

Además de estas campañas experimentales, las observaciones de la capa fronteriza han sido complementadas por medidas realizadas con torres meteorológicas, durante largos períodos de tiempo, como por ejemplo las instaladas en Boulder, EE.UU., y en Cabauw, Holanda. En nuestro caso, hemos trabajado con los datos de la torre meteorológica de Vilaseca durante cuatro años (Soler et al., 1995, 1996, 1997, 1998; Hinojosa, 2001; sección 4.2).

Para medir las variables meteorológicas, en la experimentación de la capa límite atmosférica, se necesitan tres componentes principales: un sensor, un digitalizador y un *data logger*. La mayoría de los sensores son dispositivos que cambian sus características físicas en función de las variaciones de la variable medida. Así, virtualmente, todos los sensores son analógicos por naturaleza, suministrando una señal de salida que varía continuamente dependiendo de la variación continua de las condiciones meteorológicas. Esta señal de salida debe ser muestreada para producir un registro digital discreto usando un digitalizador o convertidor analógico/digital. La serie resultante de datos discretos debe ser almacenada, fundamentalmente, en discos magnéticos. Otras componentes esenciales para desarrollar las campañas experimentales son las plataformas que soportan los instrumentos, la calibración de los sensores y los dispositivos de visualización de datos.

A continuación se especifican los tipos de medidas y de sensores y las plataformas disponibles para evaluar la capa límite atmosférica, sin profundizar, ahora, en las

características técnicas de la instrumentación, y centrándonos en la obtención de datos de temperatura y viento en la capa superficial atmosférica.

2.2 Medidas

Las variables de mayor interés en la capa superficial son la velocidad y la dirección del viento, la temperatura, la humedad, la energía radiante y los flujos de momento, de calor y de masa. Los datos de la capa fronteriza se dividen en dos categorías, aquellos obtenidos del valor medio de las variables con sensores que operan en baja frecuencia y aquellos que miden la turbulencia con sensores de respuesta rápida que operan en alta frecuencia. Aunque, muchos de los sensores de alta frecuencia se pueden utilizar para calcular valores medios, pero no todos.

Si se dispone de sensores adecuados para la medida de las fluctuaciones de la velocidad del viento y los escalares, se pueden calcular los flujos de los remolinos directamente como el producto de sus componentes fluctuantes (por ejemplo $\overline{u'w'}$, $\overline{\theta'w'}$).

Si sólo se necesitan valores medios, se usan instrumentos de baja frecuencia, menos caros y más duraderos. Además, basándose en los perfiles de las variables medias se pueden calcular indirectamente los flujos y la energía turbulenta. Así, si sólo se dispone de los gradientes de los valores medios, entonces los flujos se deducen de las relaciones de Monin y Obukhov sobre una superficie llana homogénea. (Este último aspecto se estudia en el quinto capítulo).

2.3 Sensores

Los sensores que se utilizan para medir las variables de la capa superficial en los experimentos se dividen en dos categorías: los sensores de medida directa (en la localización del sensor), ubicados en mástiles, torres, globos cautivos, globos libres o aviones, y los sensores remotos con base en el suelo o montados sobre plataformas móviles, que infieren las propiedades de la atmósfera basándose en el cambio que sufre la señal enviada por ellos al atravesarla.

Por una parte, los sensores directos, ubicados en un punto, son los instrumentos elegidos tradicionalmente para estudiar la capa fronteriza, siendo los únicos capaces de conseguir la precisión y la resolución necesaria para el trabajo cuantitativo. Por otra parte, los sensores remotos tienen la ventaja de aumentar el rango y la capacidad de inspección espacial, pero la restricción de un rango mínimo y la resolución espacial limita su utilidad para las medidas de la capa superficial atmosférica. Sin embargo, usando una combinación de los dos tipos de sensores se consigue una descripción más completa del medio que con los dos por separado.

En nuestro caso, los instrumentos utilizados, para la realización del presente trabajo, son, principalmente, de medida directa, ubicados sobre mástiles o torres meteorológicas, y, en algunos casos, complementados con las medidas obtenidas con globos cautivos, sodar y lidar.

A continuación se exponen, brevemente, sus características principales. En la sección 2.3.1 tratamos la instrumentación directa y en la sección 2.3.2 describimos algunos aspectos de la instrumentación remota.

2.3.1 Sensores de medida directa

La instrumentación requerida para medir las propiedades medias y fluctuantes del aire cerca del suelo es distinta. Los sensores para medir las propiedades de promediado

temporal del flujo necesitan un alto grado de precisión absoluta y estabilidad a largo plazo, para que puedan suministrar buenos promedios sobre periodos de 5 minutos o más. Los sensores que miden las propiedades turbulentas del flujo necesitan una frecuencia de respuesta lo bastante amplia como para poder cubrir todas las escalas de los remolinos que contribuyen al proceso, pero la precisión necesaria sólo es relativa con respecto a cualquier media arbitraria de trabajo. La mayoría de las campañas utilizan una mezcla de sensores de medias y de fluctuaciones, dependiendo del presupuesto y los objetivos planteados.

Las ventajas de los sensores directos son la sensibilidad, la precisión y la sencillez, mientras que las desventajas incluyen la modificación del flujo por el sensor o su plataforma, el hecho de dar, potencialmente, un valor puntual irrepresentable y la necesidad de una posición física del sensor en la parte de la capa límite donde se realiza la medida.

2.3.1.1 Sensores para medidas de perfiles

- **Sensores de viento medio**

Los anemómetros de cazoleta, los anemómetros de hélice y las veletas son los dispositivos más utilizados para medir los perfiles de viento. Son duros, fiables y relativamente baratos. Dependen de partes móviles que llegan al equilibrio dinámico con el flujo, por eso sus tiempos de respuesta son demasiado grandes para medir fluctuaciones turbulentas. Pero son adecuados para medir perfiles medios. Para asegurar la precisión en las medidas son esenciales las calibraciones periódicas y los chequeos de intercomparación.

Las cazoletas y las veletas giran en un eje vertical. La ventaja es que aceptan vientos de cualquier dirección, ubicadas sobre el brazo de un mástil, sólo la dirección marcada por el mástil sería desfavorable. Las cazoletas tienden a sobreestimar la velocidad del viento debido a su respuesta no lineal y por su sensibilidad parcial a la componente vertical del viento.

Los anemómetros de hélice no sobreestiman, pero sólo operan cuando apuntan directamente en la dirección del viento. Por eso, lo ideal es añadir una veleta al sensor de hélice. Éste es el tipo de sensor que mayoritariamente hemos empleado en nuestras campañas experimentales para medir los perfiles de viento en la capa superficial.

El espaciado vertical óptimo para las medidas de los perfiles de viento depende de la aplicación específica. A una altura de $z \leq 50$ metros, donde el perfil del viento es casi logarítmico, se usa frecuentemente un espaciado vertical que doble la altura (por ejemplo 1, 2, 4, 8, 16, 32 metros). Por encima de los 50 metros se prefiere un espaciado fijo porque el perfil del viento no es tan sensible a la presencia del suelo. Para aplicaciones en las que sólo se dispone de una observación del viento la *World Meteorological Organization* recomienda la altura de 10 metros.

- **Sensores de temperatura media**

Los sensores de temperatura que más se utilizan para medir los gradientes verticales son los termómetros de resistencia de platino, las termocúpulas, los termistores y los termómetros de cuarzo. Con calibraciones cuidadosas y especial atención al diseño, pueden alcanzar precisiones del orden de 0.05°C y resoluciones de 0.01°C . En nuestros experimentos hemos empleado, siempre, termistores y, alguna vez, termocúpulas para medir los perfiles de temperatura en la capa superficial atmosférica.

2.3.1.2 Sensores para medidas de turbulencia

En la capa superficial los remolinos turbulentos son relativamente pequeños y de vida corta, necesitando sensores de respuesta superiores a los utilizados en la capa de mezcla convectiva. Por la noche, la turbulencia es más débil, necesitando sensores sensibles que tengan una buena proporción entre la señal y el ruido. Los sensores son pequeños y delicados para alcanzar la respuesta rápida y son vulnerables al daño de los insectos y la precipitación. Los instrumentos de respuesta rápida son, generalmente, más costosos de mantener y requieren equipos *data logger* más caros. Los *data logger* deben poder almacenar datos en alta frecuencia y poder acumular un gran volumen de éstos.

Los sensores de medida de las fluctuaciones de la turbulencia son útiles, principalmente, para estimar los flujos, la energía cinética turbulenta y los momentos de orden superior. Son instrumentos complejos, delicados y caros.

- **Sensores de fluctuaciones de velocidad**

El anemómetro de alambre caliente es el sensor usado tradicionalmente en los trabajos de turbulencia. Es adecuado para los estudios de laboratorio y túneles de viento, donde las dimensiones del sensor tienen que ser pequeñas (del orden del milímetro) y la respuesta alta en frecuencia (del orden de 10kHz). Por el contrario, para medir los flujos de la capa fronteriza, la excelente frecuencia de respuesta del anemómetro de alambre caliente no es adecuada por tres inconvenientes: susceptibilidad para cambiar de calibración, fragilidad y estrecho ángulo de aceptación del viento. Las escalas espaciales de interés en la capa fronteriza atmosférica oscilan entre 1 metro y 1 kilómetro y, a veces, son necesarias medidas continuas durante periodos de días a meses. En tales aplicaciones, el anemómetro sónico es el instrumento preferido.

Los anemómetros sónicos miden la velocidad del viento por la percepción del efecto del viento entre tiempos de tránsito de pulsos acústicos viajando en direcciones opuestas cruzadas dentro de un camino conocido. Los anemómetros sónicos pueden ser de pulso o de onda continua. Los primeros miden diferencias de tiempos de tránsito directamente para computar la componente del viento a lo largo del camino, mientras que los segundos miden las diferencias de fase que se traducen en diferencias de tiempo. Ambas medidas se relacionan directamente con la velocidad del viento. En nuestras campañas experimentales hemos utilizado únicamente anemómetros sónicos de pulso.

El alto coste de los anemómetros sónicos, sin embargo, ha obligado a buscar opciones más simples y menos caras tales como los anemómetros dinámicos. Los anemómetros dinámicos miden la velocidad del viento percibiendo la presión o la fuerza de arrastre en un punto del flujo. Responden a las fluctuaciones del viento más lentamente que los anemómetros sónicos, pero más rápidamente que los tipos rotativos.

- **Sensores de fluctuaciones de temperatura**

Los termómetros de resistencia de platino, las termocúpulas, los termistores y los termómetros sónicos se usan para medir las fluctuaciones de la temperatura. El termistor y la termocúpula perciben las partículas que no pueden hacerse menores que la sonda de alambre de platino, por eso tienden a respuestas menores y no son aceptables para medir flujos cerca del suelo. Todos los tipos se exponen al aire libre sin protección a la radiación. En consecuencia, son vulnerables al viento, la lluvia y a las partículas.

En nuestras campañas experimentales hemos utilizado principalmente termómetros sónicos y en algún caso también un termómetro de resistencia de platino.

2.3.2 Sensores remotos para la capa fronteriza

La experimentación con sensores de exploración remota en la capa fronteriza ha ido aumentando durante la última década. Su rango es superior a las medidas en torre, pero su precisión y resolución espacial en la turbulencia son inferiores, Hinojosa (2001). Actualmente, los nuevos sensores remotos, con rangos mínimos más pequeños y de mejor resolución, empiezan a estar disponibles para las aplicaciones de la capa fronteriza.

Los parámetros tales como los flujos de calor y de momento pueden deducirse indirectamente de las señales retrodifundidas por la atmósfera. En muchas aplicaciones estos instrumentos ofrecen una amplia cobertura espacial en forma de perfiles de viento y de temperatura; para representaciones tiempo-altura muestran la evolución de dichas variables y obtienen la estructura de la inversión térmica, las ondas de gravedad, las capas de inversión elevadas y la altura de la capa límite estable nocturna.

Los sensores remotos miden las ondas que se generan en, o se modifican por, la atmósfera en localizaciones distantes al sensor. Estas ondas se propagan por la generación o modificación apuntando hacia el sensor. Así, los sensores remotos se clasifican en tres categorías, dependiendo del tipo de señal que utilizan: sodar, radar y lidar, acrónimos de sonido, radio y luz, que operan dentro de su rango frecuencial correspondiente.

Los sensores remotos activos generan sus propias ondas (sonido, luz, microondas) y tienen componentes transmisoras y receptoras. Los sensores remotos pasivos sólo tienen componentes receptoras y miden las ondas generadas por la tierra (infrarrojo y microonda), la atmósfera (infrarrojo) o el sol (visible).

Las ventajas de este tipo de sensores incluyen el hecho de que pueden explorar rápidamente un gran volumen, área o columna de atmósfera mientras permanecen estáticos en el suelo o ubicados convenientemente en un avión. Las desventajas de los sensores remotos incluyen sus tamaños (grandes antenas o receptores), coste y complejidad, incapacidad para medir ciertas características de la capa fronteriza, su pequeña señal frente a la proporción de ruido necesita promediar sobre volúmenes relativamente grandes (no es posible la medida puntual) y el hecho de que las ondas pueden ser modificadas cuando se propagan hacia el sensor.

En algunas de nuestras campañas experimentales hemos empleado el sodar (Cuxart et al., 2000; Hinojosa, 2001) o el lidar (Poulos et al., 2002) para medir algunas variables micrometeorológicas y evaluar el comportamiento temporal de la estructura de la baja atmósfera.

2.4 Plataformas

En micrometeorología se utilizan plataformas tales como torres meteorológicas, globos sonda y aviones, que son complejos y caros, pero pueden soportar o conducir múltiples instrumentos.

2.4.1 Medidas en torre meteorológica

Las torres meteorológicas son unas estructuras metálicas que se alzan de forma permanente. Las torres facilitan el estudio continuo de la capa superficial atmosférica, y si sus dimensiones y la instrumentación lo permiten se pueden utilizar para el análisis de la capa fronteriza nocturna y la transición noche-día. Algunos ejemplos que se pueden citar, por su importancia mundial, incluyen la de Cabauw, Holanda, de 213 metros o la de Boulder, en Colorado, EE.UU., de 300 metros.

Como la torre es muy grande distorsiona el flujo cercano a ella y a sotavento. Por esta razón, estas torres poseen unos brazos que proyectan horizontalmente fuera de la influencia de la estructura a los sensores que están montados encima. En cada altura, normalmente, se incluyen 2 o 3 brazos en diferentes direcciones, de manera que siempre se tiene alguno a favor del viento.

La recogida de los datos y cualquier facilidad informática para tratarlos se acostumbra a realizar cerca de la torre, en una pequeña cabina.

En las campañas experimentales se acostumbra a utilizar mástiles, si no hay ninguna torre en el área experimental o para complementar las medidas de ésta. Con la intención de no perturbar las medidas, el mástil se erige como una estructura vertical que frecuentemente es un simple tubo de metal con brazos para evitar aún más su influencia.

La altura del mástil puede llegar a los 10 metros. Por la limitación de altura, se utilizan, principalmente, en el estudio de la capa superficial. Como los perfiles de temperatura y viento varían de forma logarítmica con la altura, la colocación de los sensores responde normalmente a la misma escala. Estos mástiles son fácilmente transportables, se montan siguiendo el programa de campo y se desmontan cuando el experimento acaba. Los datos se recogen en la base del mástil con un *data logger* o similar.

2.4.2 Medidas con globos y aviones

Extender las medidas efectuadas cerca del suelo no es una tarea fácil. Para medir las variables que interesan por encima de las torres limitadas en altura se utilizan aviones, globos cautivos y libres instrumentados con sensores. Pero sus medidas no son del todo comparables con las registradas sobre plataformas fijas. Para suprimir las imprecisiones se instalan en un mismo globo o avión sensores a diferentes alturas.

Un globo cautivo es un globo aerodinámico de plástico inflado con helio que está sujeto con un cable a tierra y mediante un mecanismo (motor) se le puede elevar y recoger con una velocidad constante y regulable. La sonda se coloca a corta distancia, con la precaución de que no se enrolle con la línea que le enlaza a tierra. El globo puede permanecer en una altura determinada el tiempo conveniente y, tanto parado como ascendiendo o descendiendo, transmite las medidas, generalmente, a través de ondas de radio a un sistema de almacenamiento que se dispone en la superficie. Aunque los cables, especiales, pueden tener una longitud de entre 1 y 2 kilómetros, las condiciones del viento restringen muchas veces esta altura a un kilómetro. El globo cautivo es más fácilmente transportable que una torre y se puede utilizar durante mucho tiempo en una campaña experimental, pero está limitado, obviamente, a vientos no superiores a 9m/s y también necesita un mínimo de personal al cargo.

El globo sonda es un globo expansible con una sonda y un equipo transmisor adjunto que proporciona medidas de temperatura, humedad y presión. También los hay que poseen información del módulo y de la dirección del viento mediante un sistema de posicionamiento. Si las condiciones meteorológicas lo permiten e inflando poco el globo se puede conseguir que éste se eleve lentamente, de manera que se obtengan datos en muchas alturas interiores de la capa fronteriza. Aunque el globo y el equipo medidor no son muy caros, el coste de un programa experimental puede resultar sorprendentemente elevado si se efectúan lanzamientos frecuentemente. Estos globos se elevan hasta que revientan y entonces los equipos proveídos de un paracaídas pueden ser recuperados en algunas ocasiones.

El globo sonda ofrece una buena aproximación a una torre alta: este tipo de medida es relativamente insensible a las fluctuaciones turbulentas del viento, porque oscila lateralmente. La oscilación, aunque sea ligera, presenta sobreestimaciones de las medidas de viento ($\sim 10\%$) y varianzas ($\sim 30\%$) sin afectar a la velocidad vertical, la

temperatura y los flujos de momento y de calor (Haugen et al., 1975). La sonda de la turbulencia tiene que ser diseñada para mantener la verticalidad y orientación del viento.

Se han utilizado una gran variedad de aeronaves como plataformas instrumentales para el estudio de la capa límite atmosférica. Los sensores típicos se colocan en unos brazos especiales para que las medidas se perturben poco, corrigiéndolas posteriormente. El tamaño del avión permite transportar toda la infraestructura informática y al equipo científico, que así puede observar los datos en tiempo real y planificar mejor el experimento.

Los aviones instrumentados miden la distribución espacio-temporal de las variables que difieren de las medidas temporales obtenidas de sensores de un globo sonda. El avión en sí mismo, sin embargo, responde a los movimientos turbulentos y esta contaminación debe ser estimada con precisión y eliminarla de los datos. Los sensores se montan en el frontal del avión para registrar las medidas de viento, de temperatura y de humedad. Estos sensores tienen que responder más rápidamente a las fluctuaciones que en los globos y en las torres.

En nuestras campañas experimentales hemos empleado tanto globos cautivos como globos sonda (Cuxart et al., 2000; Hinojosa, 2001; Poulos et al., 2002).

2.4.3 Sistema de almacenamiento de datos

Para una buena exploración de la capa superficial atmosférica es primordial utilizar sensores conforme al estudio que se pretende realizar. Por extensión, además, es imprescindible almacenar los datos suministrados por los sensores en las condiciones más fiables posibles.

En el caso de sensores de alta frecuencia, el almacenamiento de los datos es complejo. La exploración fina requiere una recolección muy precisa, evitando la generación de discontinuidades o huecos entre los datos, para que el muestreo se mantenga constante en frecuencia durante todo el periodo de exploración.

En las diferentes campañas realizadas, en estos últimos años por el grupo de micrometeorología, se ha ido adquiriendo una gran experiencia en el diseño de sistemas de almacenamiento de datos, aumentado el conocimiento y la destreza necesaria para almacenar los datos con una mayor fiabilidad.

Inicialmente el sistema de almacenamiento se restringía a una recolección informática de las medidas mediante un ordenador limitado a las características del sistema. El sensor estaba comunicado directamente con una computadora, que recogía y grababa los datos al mismo tiempo. Las dificultades para la multitarea del ordenador impedían que el sistema recogiera la totalidad de los datos. Imposibilitando el almacenamiento continuo de la serie meteorológica, presentando huecos en la serie y, en el peor de los casos, modificando la frecuencia de muestreo.

Para suavizar el problema, se incorporó al sistema un *data logger*, interviniendo, a veces, como un paso intermedio en la comunicación del sensor con el ordenador. De esta forma mejoraba el muestreo. Pero persistía el problema del almacenamiento continuo de los datos debido a la limitación de la capacidad en la memoria del *data logger*.

Posteriormente se optó por incluir en el ordenador una tarjeta de comunicación de alta frecuencia. Esta tarjeta especializada garantiza la continuidad de la serie y el muestreo constante, pero delimita el número de sensores conectados a ella.

En la actualidad, el sistema más fiable y completo de nuestra experimentación lo compone un *data logger* con una ampliación de memoria, adaptado a un ordenador portátil con tarjeta de comunicaciones, Figura 2.1. Que garantiza la continuidad de la serie, la comunicación con un gran número de sensores y el muestreo constante de alta frecuencia.

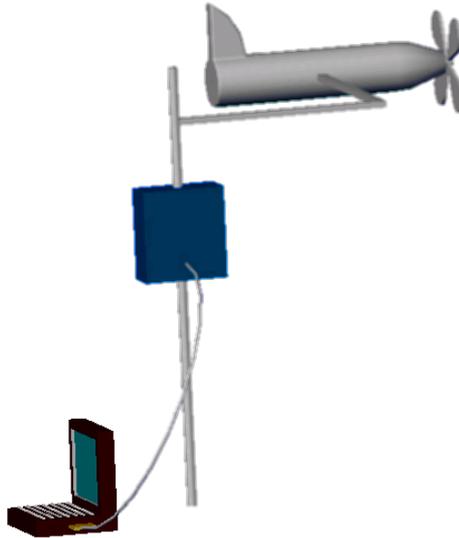


Figura 2.1 Ejemplo de sistema de adquisición y almacenamiento de datos que hemos utilizado en las campañas experimentales. Los sensores se comunican con un *data logger* y éste a su vez con un ordenador portátil que recoge los datos mediante una tarjeta de comunicaciones.