

INTRODUCCIÓN

Motivación

El interés por el conocimiento de la capa fronteriza atmosférica reside en el hecho de que es la porción de la atmósfera en la que se desarrolla la vida de la mayoría de los seres vivos y es, también, donde se realizan gran parte de las actividades humanas.

La capa fronteriza atmosférica representa una pequeña fracción de la atmósfera, comprende, aproximadamente, el primer kilómetro de la atmósfera. Los procesos de pequeña escala que en ella ocurren son provechosos para muchas de las actividades humanas y, además, son importantes para la existencia y supervivencia de la vida en la tierra.

No se trata sólo por la necesidad de oxígeno, que se concentra en esta capa, sino también porque el aire en esta capa está en continuo movimiento turbulento causando un eficiente intercambio de calor sensible y de calor latente, de momento y de masa entre la superficie terrestre y la atmósfera, y, por tanto, moderando el microclima próximo al suelo. En este sentido, cabe destacar que la atmósfera recibe, virtualmente, todo su contenido en agua a través de los intercambios turbulentos cerca del suelo. Por otra parte, la evaporación del agua retenida en el suelo y del agua de los lagos, mares y océanos no es sólo significativa en el balance y en el ciclo hidrológico, sino que el calor latente de evaporación que interviene es una de las componentes más importantes del balance de energía superficial.

Junto al vapor de agua hay otros intercambios importantes de masa dentro de la capa fronteriza atmosférica incluyendo una diversidad de gases y partículas. Así, por ejemplo, la turbulencia es muy importante en el intercambio de CO₂ entre las plantas y la atmósfera. La capacidad de mezcla turbulenta de la capa fronteriza determina en gran medida la calidad del aire. Así mismo, la turbulencia ayuda al esparcimiento del polen, y es el vehículo de transmisión de las partículas de suciedad y sales marinas que en la baja atmósfera podrán transformarse en núcleos de condensación, ingrediente esencial en los procesos de condensación y precipitación en la atmósfera.

La transferencia de momento entre la tierra y la atmósfera es también un factor primordial. Es, esencialmente, un proceso de sentido único, en el que la tierra es la fuente del momento atmosférico (relativo a la tierra). La tierra ejerce resistencia de fricción a los movimientos atmosféricos y los desacelera. El movimiento del aire cerca de la superficie es equivalente a la fuerza de arrastre superficial. Un ejemplo común lo encontramos en la marcada desaceleración que sufren los vientos superficiales que van de mar a tierra.

Los procesos de intercambio turbulento en la capa fronteriza atmosférica influyen en la evolución del tiempo atmosférico local.

La rama de la meteorología que se centra en estudiar estos procesos de intercambio entre la atmósfera y la tierra se denomina micrometeorología. Uno de los objetivos principales que persigue esta ciencia es estudiar y entender el flujo turbulento, que sigue siendo uno de los problemas analíticamente irresolubles de la física clásica.

Algunas posibles áreas de las aplicaciones de la micrometeorología son la *Meteorología de los contaminantes atmosféricos*, que estudia el transporte y la difusión de los contaminantes atmosféricos, la deposición atmosférica y la predicción de la calidad del aire local y regional; la *Meteorología mesoescalar*, que analiza la capa fronteriza urbana, la isla de calor, la brisa y los vientos de drenaje; la *Meteorología agrícola y forestal*, que centra su interés en la predicción de la temperatura superficial, la evapotranspiración, el balance de radiación de la cobertura vegetal, el intercambio de CO₂, el comportamiento de la temperatura, la humedad y el viento en la envolvente vegetal, la erosión del suelo y los efectos que produce la lluvia ácida y otros contaminantes en la vegetación; la *Planificación urbana*, que estudia la predicción de la niebla, las necesidades de calor y de frío en las ciudades y las medidas de control de contaminantes.

Objetivos

Esta memoria recoge una parte del trabajo realizado en los últimos años por el grupo de micrometeorología del *Departament d'Astronomia i Meteorologia* de la *Universitat de Barcelona*, siendo su objetivo general contribuir a mejorar la comprensión y el conocimiento de la estructura térmica y dinámica de la capa superficial atmosférica, mediante el tratamiento y el análisis de los datos proporcionados por diversos instrumentos de exploración.

Se trata pues de un trabajo basado principalmente en la experimentación y centrado especialmente en el procesado de datos y en el análisis observacional de diferentes fenómenos micrometeorológicos acaecidos en la capa superficial atmosférica. Para ello, se ha utilizado instrumentación variada, desplegada en distintas campañas experimentales de carácter nacional e internacional, y se han desarrollado diferentes métodos numéricos y estadísticos para el tratamiento de los datos.

Este carácter experimental es la principal virtud del trabajo que se expone y, a su vez, la mayor limitación. La exploración de un sistema abierto, con trabajos de campo, conlleva grandes dificultades: encontrar el área experimental, diseñar la campaña experimental, instrumentarla con el mejor material posible según los recursos disponibles, mantener los equipos en condiciones adecuadas, recoger la mayor información posible y procesar los datos obtenidos es una labor difícil y no siempre recompensada desde el punto de vista científico.

Son muchas las campañas experimentales que se han organizado, diseñado y en las que ha participado el grupo de micrometeorología. Las tres más relevantes para la elaboración de esta memoria son las llevadas a cabo en Vilaseca (Tarragona), Valladolid y Kansas (Estados Unidos).

Para caracterizar la capa superficial atmosférica, a escala local, inicialmente, se ha analizado el comportamiento de las principales variables meteorológicas. Con este objetivo, el grupo de micrometeorología en colaboración con el *Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya*, desde hace más de una década, han llevado a cabo múltiples proyectos de exploración de la capa fronteriza atmosférica, con la intención de conocer y controlar la calidad del aire. Para ello, se instaló, entre otros instrumentos, una torre meteorológica en la localidad de Vilaseca en 1995. Desde entonces el grupo de micrometeorología ha sido el responsable de procesar e investigar los resultados extraídos de los diferentes instrumentos ubicados en la torre. De entre los diferentes estudios realizados con los datos de Vilaseca destaca la microclimatología realizada para conocer las condiciones atmosféricas medias de la zona y la elaboración de un modelo de pronóstico de los principales parámetros turbulentos (Buenestado y Soler, 1998). Estos a su vez han sido implementados en un modelo de dispersión de contaminantes, (Soler et al., 1998; Hinojosa, 2001).

En micrometeorología, uno de los principales problemas, con difícil resolución, es el llamado problema de indeterminación de las ecuaciones del movimiento. Resumidamente, este problema se basa en la imposibilidad de resolver las ecuaciones del movimiento, debido a que el número de variables es superior al número de ecuaciones que definen el movimiento del aire. Existen diferentes métodos para encontrar una solución aproximada al problema. Siendo la teoría de semejanza de Monin-Obukhov el método más conocido y utilizado, hasta el momento, en la capa superficial atmosférica. Con la intención de analizar y elaborar, en su caso, nuevas parametrizaciones de las funciones adimensionales de la ley de semejanza de Monin-Obukhov (Buenestado et al., 1999b) entre otros objetivos (Cuxart et al., 2000), el grupo de micrometeorología conjuntamente con el Instituto Nacional de Meteorología, el Laboratorio Nacional de Risoe (Dinamarca) y el *Departament de Física de la Universitat Politècnica de Catalunya* organizaron una campaña experimental en Valladolid durante el mes de septiembre de 1998.

En Valladolid, se estudió la capa fronteriza atmosférica diurna pero especialmente la nocturna, por la problemática que esta capa presenta. La caracterización de la capa límite nocturna es un proceso difícil y delicado, debido a la existencia de turbulencia intermitente, a la presencia de chorros de capa baja, también intermitentemente, con la consecuente generación de turbulencia local, la formación de vientos locales y la generación de ondas. En este trabajo se ha dedicado especial atención a analizar los diferentes regímenes nocturnos sobre suelo homogéneo y a evaluar la intermitencia de la turbulencia (Buenestado et al., 1999c).

Paralelamente, y fundamentados en Leahey et al. (1994, 1995), a partir de la campaña experimental organizada en Valladolid nos planteamos el problema de la indeterminación para los estadísticos turbulentos (Buenestado y Soler, 1999), elementos fundamentales en los modelos de contaminación.

Posteriormente, y continuando con el estudio de la capa estable nocturna, el grupo de micrometeorología colaboró y participó en una campaña experimental realizada en Kansas durante el mes de octubre de 1999. La participación del grupo de micrometeorología centró su interés en la exploración de los fenómenos que ocurren en la capa superficial nocturna sobre una superficie ligeramente inclinada. El objetivo era estudiar la generación y la destrucción del flujo de drenaje (Soler et al., 2002), la generación de turbulencia intermitente y la detección de ondas de Kelvin-Helmholtz (Conangla et al., 2001; Buenestado, 2003).

Estructura de la memoria

Esta memoria se ha dividido en 7 capítulos, donde se exponen los principales estudios realizados para conseguir el objetivo deseado, que es profundizar, mediante el análisis experimental, en el estudio del comportamiento térmico y dinámico de la capa superficial atmosférica.

En el primer capítulo se exponen los elementos necesarios y fundamentales para situar al lector en el ámbito de la capa superficial atmosférica. Se presentan la estructura de la capa fronteriza atmosférica, las características turbulentas del aire y las ecuaciones del movimiento. Además, se exponen las teorías semiempíricas que suavizan el problema de la indeterminación y que permiten definir los principales parámetros para el estudio de la capa fronteriza atmosférica.

El segundo capítulo describe la instrumentación y los recursos necesarios para la exploración de la baja atmósfera, enfatizando los utilizados por el grupo de micrometeorología en las diferentes campañas experimentales y tratando el problema de la adquisición y el almacenamiento de los datos obtenidos durante los trabajos de campo.

El tercer capítulo presenta el procesado de los datos, mostrando las diferentes herramientas matemáticas y estadísticas utilizadas para resolver los diversos problemas surgidos en el transcurso de este trabajo.

En el cuarto capítulo se estudia la microclimatología de la capa superficial atmosférica desarrollada en Vilaseca, analizando la evolución temporal de las distintas variables exploradas (valor medio) así como la evolución estacional de los perfiles de viento y temperatura.

En el quinto capítulo se aborda el problema de la indeterminación desde dos puntos de vista diferentes. Por un lado, basándonos en la teoría de semejanza, se presentan nuevas parametrizaciones para los valores medios de las principales variables atmosféricas y, por otra parte, se parametrizan los estadísticos turbulentos a partir del módulo del viento y el gradiente térmico.

En el sexto capítulo se estudia la capa superficial nocturna, caracterizando los regímenes estables y analizando diferentes fenómenos que en ella tienen lugar, tales como la intermitencia de la turbulencia, el flujo de drenaje y las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz.

Finalmente, el séptimo y último capítulo recoge las conclusiones más importantes obtenidas en el trabajo de experimentación de la capa superficial atmosférica y se expone la línea de investigación futura.