

y el coste en términos económicos se estimó en un billón de libras esterlinas (1,45 billones de \$ EE.UU.). En el London Weather Centre la velocidad media del viento alcanzó los 23 ms^{-1} . El período de retorno de los vientos más fuertes durante la tormenta se estimó en 200 años o más en todos los lugares al sureste de la línea que va de la isla de Wight a Great Yarmouth. Esta depresión produjo también considerables daños en el noroeste de FRANCIA, HOLANDA y sureste de NORUEGA donde una marea de temporal y las prolongadas y fuertes lluvias causaron importantes inundaciones y los vientos destruyeron muchos barcos y arrancaron árboles en las cercanías de Oslo. Las pérdidas se estimaron en 600 millones de coronas noruegas (800 millones de \$ EE.UU.). La escorrentía tiene un período de retorno de más de 100 años.

Al mismo tiempo, ISRAEL y LÍBANO experimentaban violentas y prolongadas tormentas con granizo, que en Líbano alcanzó un espesor de 40 cm en algunos lugares y en Israel produjo pedriscos del tamaño de un huevo de gallina. Algunas personas fueron fulminadas por rayos. Los daños fueron muy grandes, y en Líbano se estimaron en 432,5 millones de libras (5 millones de \$ EE.UU.).

EL EXPERIMENTO FRONTS-87 Y EL PROYECTO DE LA DINAMICA FRONTAL A MESOSCALA

Por S. A. CLOUGH¹
y J. TESTUD²

Entre octubre de 1987 y enero de 1988 grupos de investigación de Francia, la República Federal de Alemania y el Reino Unido tomaron parte en el experimento de campo FRONTS-87, el mayor proyecto de este tipo llevado a cabo en Europa hasta la fecha. El experimento estaba dirigido fundamentalmente al estudio de los frentes fríos activos que se aproximaron al Canal de la Mancha desde el Atlántico, utilizándose todos los sistemas de observación a mesoscala disponibles.

El experimento de campo fue la etapa principal de recopilación de datos de los programas de investigación de la mesoscala a largo plazo tanto para Francia como para el Reino Unido, en particular del último proyecto de la dinámica frontal a mesoscala (MFDP). Dentro de una serie de reuniones en los dos países se puso en evidencia que un experimento basado en colaboración internacional sería muy beneficioso al tener juntos a algunos de los muchos grupos europeos que trabajan en este campo. La amplia gama de escalas, desde la escala sinóptica hasta descender a la turbulencia y a los procesos microfísicos exigirá evidentemente una gama de recursos y pericias de una amplitud correspondiente a la que es difícil acceder en un solo país.

Tanto los grupos experimentales como teóricos están estrechamente implicados en el proyecto, siendo el objetivo primordial proporcionar observaciones a mesoscala capaces de probar algunas de las teorías recientes de la estructura frontal. Un enfoque para el FRONTS-87 lo proporcionaban los objetivos científicos del MFDP que eran:

- Obtener una comprensión dinámica mejorada de las interpretaciones a las escalas sinóptica, mesoscala y muy pequeña con los sistemas que contienen a los frentes fríos, en especial los activos.

¹ Meteorological Office del Reino Unido, Bracknell.

² Centre de recherches de l'environnement terrestre et planétaire (CNET/CNRS), Issy-les-Moulineaux, Francia.

- Adquirir conjuntos de datos a mesoescala y utilizarlos en el posterior desarrollo de modelos numéricos y en la parametrización de los mismos.
- Describir la estructura y la evolución de las configuraciones a mesoescala en las citadas situaciones, dentro del contexto sinóptico total, y deducir modelos conceptuales válidos en la predicción a muy corto plazo (0-12 h.).

Los preparativos para el experimento comenzaron en 1985 y se publicaron una serie

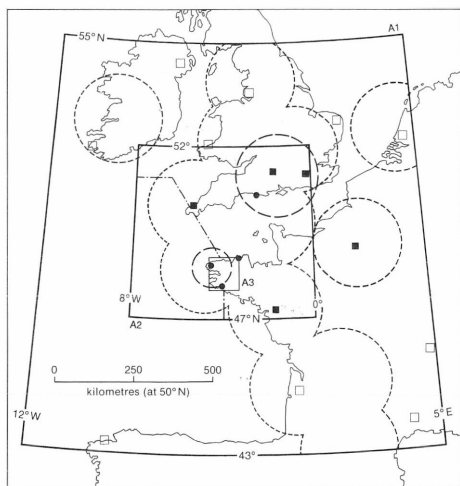


Figura 1. - La zona completa del experimento con los emplazamientos principales de medida y la cobertura, mostrando el límite de cobertura de la red de radar meteorológico (---), límite de la cobertura del radar especial (—), límite aproximado al noreste de las operaciones con aeronaves (-.-.-), estaciones de radiosondeo que informan a intervalos de seis horas (□), de tres horas (■) y de 90 minutos (•).

de informes conjuntos describiendo en detalle la organización, los objetivos y los progresos (hay ejemplares disponibles en la British Meteorological Office). Se convino en un formato normalizado de los datos para el archivo de la mayoría de las observaciones y, posteriormente, todos los datos estarán disponibles solicitándolos a los administradores de datos de *La Météorologie nationale* en París o de la Meteorological Office en Bracknell.

El experimento de campo

La principal intención del experimento era medir la estructura, desde las escalas grandes a escalas sucesivamente más pequeñas, cuando los sistemas frontales penetraran en las zonas experimentales reticuladas que se muestran en la *Figura 1*. Primero, se lanzó una distribución de 30 a 50 radiosondas con paracaídas sobre el mar en una zona de 500 kilómetros en cuadro o mayor, a continuación se realizaron observaciones intensivas desde aeronaves y desde tierra, a medida que el frente frío se aproximaba a una zona intensamente instrumentada en torno del radar Doppler dual Ronsard en Bretaña (Francia). Las operaciones estaban dirigidas desde un centro de campo situado en el aeropuerto de Brest, en consulta con el Centro del proyecto del Reino Unido en Bracknell.

Se definieron tres regiones en las que operar dentro de las 36 horas de los Períodos de Observación Intensiva (POI). Se mantuvieron los radiosondeos de forma regular cada seis horas en toda la zona exterior (A1), cada tres horas en la zona interior (A2), mientras que un cierto tipo de sistemas especiales de observación se situaron en la zona central (A3), llamada *Zone d'instrumentation privilégiée* (ZIP). Algunas de las observaciones en la zona ZIP se activaron durante los POI, mientras que se llevaron a cabo medidas desde aeronaves

durante períodos de seis a nueve horas de forma intensiva, para describir la estructura a pequeña escala y la microfísica de la precipitación durante el paso del frente.

Las principales instalaciones de campo están descritas en la *Tabla 1*. El equipo de experimentación en la zona ZIP comprendía:

- Los dos radares Doppler Ronsard de banda-C. Separados 20 km y operados en conjunto en modo Coplan, estos radares proporcionaban la velocidad radial y las medidas de reflectividad que pueden utilizarse para reconstituir el campo tridimensional de la velocidad en la precipitación, con una resolución de 400 m en la horizontal y de 200 m en la vertical.
- El radar Doppler Rabelais de 8,6 mm. Utilizado en los modos VAD o vertical, su gran sensibilidad permite la ampliación de los estudios radáricos a las nubes con poca o ninguna precipitación.
- Tres estaciones adicionales de radiosondeos instaladas con una separación de 80 km, cada una de ellas capaz de producir un sondeo cada 90 minutos.
- Tres perfiladores de viento y sódares Doppler triples, uno en cada uno de los lugares de las estaciones de radiosondeo anteriores. Los sódares proporcionaban medidas continuas de las componentes horizontal y vertical del viento y de la turbulencia hasta 500 m, mientras que los radares perfiladores VHF proporcionaban las mismas observaciones desde 1 500 m a 15 km. Un perfilador adicional UHF situado en Brest proporcionó la cobertura intermedia desde 500 m hasta 5 km.
- Una red de nueve estaciones de observación en superficie en la zona del radar Coplan para proporcionar medidas convencionales en su emplazamiento cada 150 segundos.

Con esta gran variedad de sistemas de observación junto con las medidas de turbulencia desde aeronave y las de microfísica de las nubes, fue posible la descripción muy completa y detallada de un conjunto de frentes.

Fue necesaria mucha preparación logística en la semana anterior a cada POI y se diseñó un sistema de niveles de alerta para toma de decisiones en función de las predicciones disponibles. Esto era necesario para el despliegue del personal y los equipos, pero más particularmente para obtener un espacio libre en el control de tráfico aéreo para el lanzamiento de los radiosondas con paracaídas desde los aviones Lockheed C-130 de la British Meteorological Office. Los radiosondas con paracaídas necesitan que una amplia banda del espacio aéreo por debajo de los C-130 (que vuelan normalmente a 6 000-8 000 m) tiene que estar totalmente despejada durante las cinco a seis horas de duración del sondeo. Para el éxito del experimento fue fundamental una estrecha relación entre los experimentadores, las aeronaves, la Marina francesa y el control del tráfico aéreo. Asimismo, las autoridades implicadas cooperaron extremadamente bien y se lograron, en los ocho POI, seis despliegues completos de radiosondas con paracaídas, en los dos restantes, uno fue abortado por problemas en los aviones y otro prohibido a causa de falta de espacio.

Entre 24 y 36 horas antes de la llegada prevista de un frente, los acuerdos con el control de tráfico aéreo estaban concluidos y se iniciaban las operaciones fundamentales de radiosondeos a gran escala y del radar VHF. Doce horas antes del paso esperado del frente, el control del experimento se devolvía al Administrador de campo y coordinador de aeronaves en Brest. El centro de control estaba en estrecha comunicación con los predictores de Bracknell y París y la información de la predicción inmediata estaba disponible en los radares Ronsard y el sistema *Météotel*. La zona ZIP para las operaciones de sondeos y de los aviones estaba dirigida desde allí.

El programa para las aeronaves comprendía tres fases, comenzando con el vuelo de

Tabla I – Instalaciones especiales de observación

<i>Tipo</i>	<i>Plataforma</i>	<i>Zona</i>
Sondeos aerológicos	Radiosondeos cada seis horas	A1
	Radiosondeos cada tres horas	A2
	Radiosondeos cada noventa minutos	A3
	Radiosondas con paracaídas desde los C-130	Sobre el mar
Perfiles continuos de viento	Radares vhf de 1 500-15 000 m (3)	A3
	Radares vhf de 500-5 000 m (1)	A3 (Brest)
	Sodar Doppler de 0-500 m	A3
Observaciones radar	Doppler dual Ronsard	A3
	Doppler de 8-mm Rabelais	A3
	Dual de polarización 10 cm	A2 (Chilbolton, R.U.)
	Lidar cirrus	A1 (Aberystwyth, R.U.)
Observaciones en superficie	Ocho estaciones a mesoscala	A3
	Tres estaciones con microbarógrafo	A2 (Dorset, R.U.)
Observaciones desde avión	Dornier 128: turbulencia (Universidad de Hanover)	A2
	Fairchild Merlin: turbulencia y microfísica	A2/A3
	Dornier 228: turbulencia y viento en superficie (DFVLR)	A2
	Lockheed C-130: turbulencia y microfísica	A1/A3
	Globos cautivos: turbulencia de la capa límite	A2 (Scilly Is., R.U.)

los Lockheed C-130 para el lanzamiento de los radiosondas con paracaídas unas nueve horas antes del paso del frente. Cuando los C-130 abandonaban la zona próxima a Brest, los aviones Fairchild Merlin franceses y los Dornier-128 de la República Federal de Alemania realizaban la segunda fase: medidas de la turbulencia en la capa límite y de microfísica a través y detrás del frente, y después los Merlin y los C-130 despegaban de nuevo para la fase final: un conjunto de recorridos microfísicos dirigidos desde tierra utilizando las observaciones del radar Doppler.

Los casos observados

Las primeras observaciones fueron revisadas en un cursillo práctico de los participan-

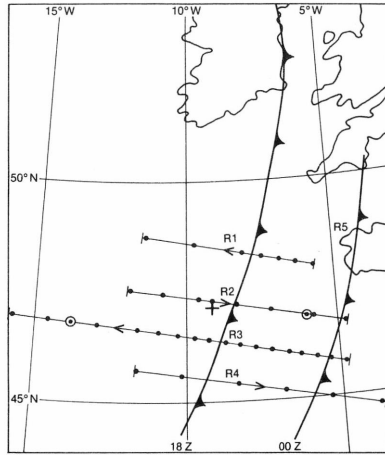
Pies de las figuras de las páginas siguientes

Figura 2.— La zona de observaciones de radiosondas con paracaídas en el octavo POI (12/13 de enero de 1988) mostrando las posiciones previstas del frente en la superficie. Los recorridos de los radiosondas con paracaídas se efectuaron a lo largo de R1 a R4, mientras que R5 indica la línea de los recorridos microfísicos. ● = posiciones de los sondeos satisfactorios; ⊙ = sondeos sin datos de viento.

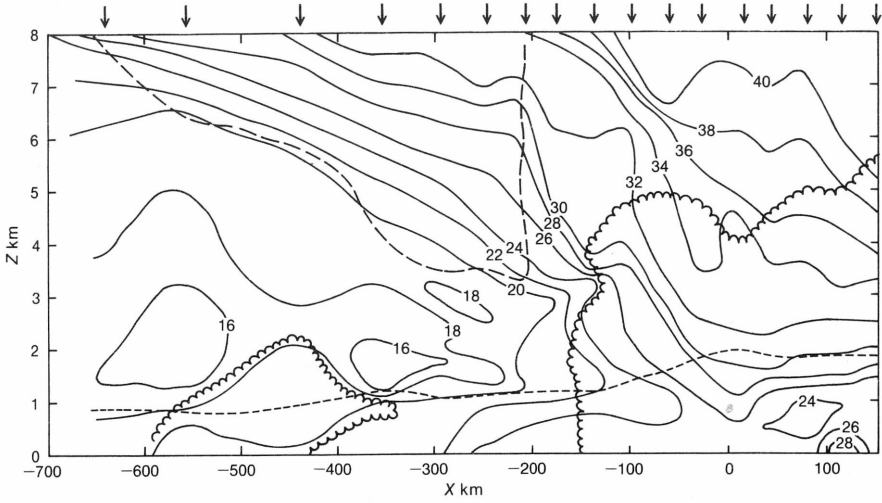
Figura 3.— Sección transversal vertical de la temperatura potencial equivalente (C) basada en los datos en tiempo real de los radiosondas con paracaídas durante el octavo POI (aprox. a las 20-21 h TU del 12 de enero de 1988). Las flechas indican las posiciones de las sondas. Isolíneas de humedad relativa: ~ = 90%; -- = 20%.

Figura 4.— Sección transversal vertical de la componente de la velocidad relativa respecto al frente a lo largo del frente (ms^{-1}). Se supone que el frente tiene una orientación de 38° y una velocidad de $3,5 \text{ ms}^{-1}$.

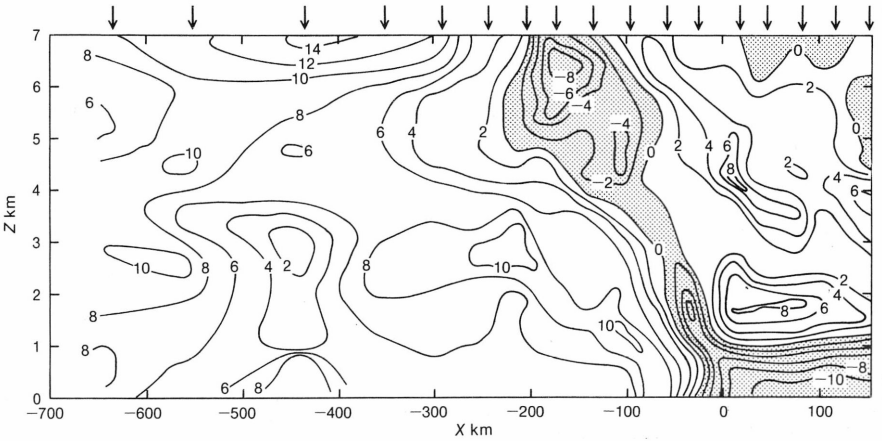
Figura 5.— (a) Reflectividad del radar observada por el Ronsard-1 a las 0011 TU del día 13 de enero de 1988. Los círculos indican intervalos de distancias de 25 km y de 50 km. La elevación es menor de 1° . (b) Campo de la velocidad radial correspondiente a (a). La velocidad es positiva hacia el radar.



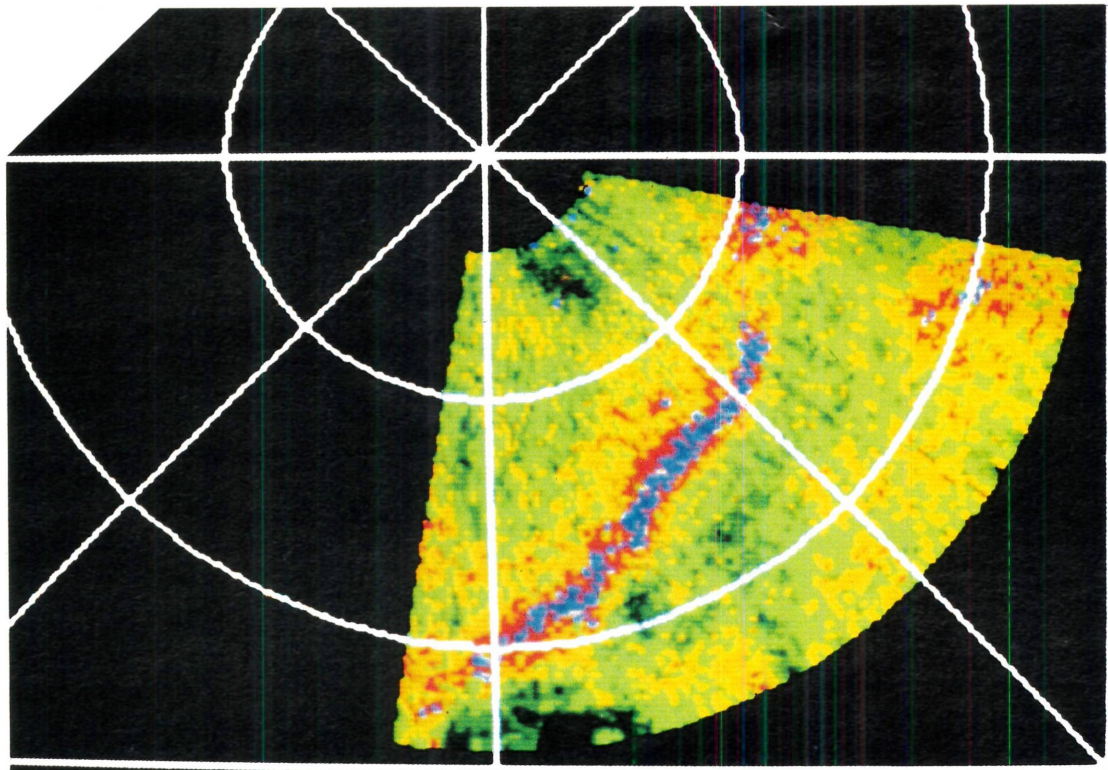
2



3



4



0 20 30 45 55 70 88

FRONTS 07 (R2)

12-01-88

COPLAN

MODE: 2, 2
CUD : 4
FC : 2
DIST: 61
RHOZ: 10
DN : 25

PLAN: 1

FRONTS 07 (B2)

12-01-88

COPLAN

MODE: 2, 2

CLD: 4

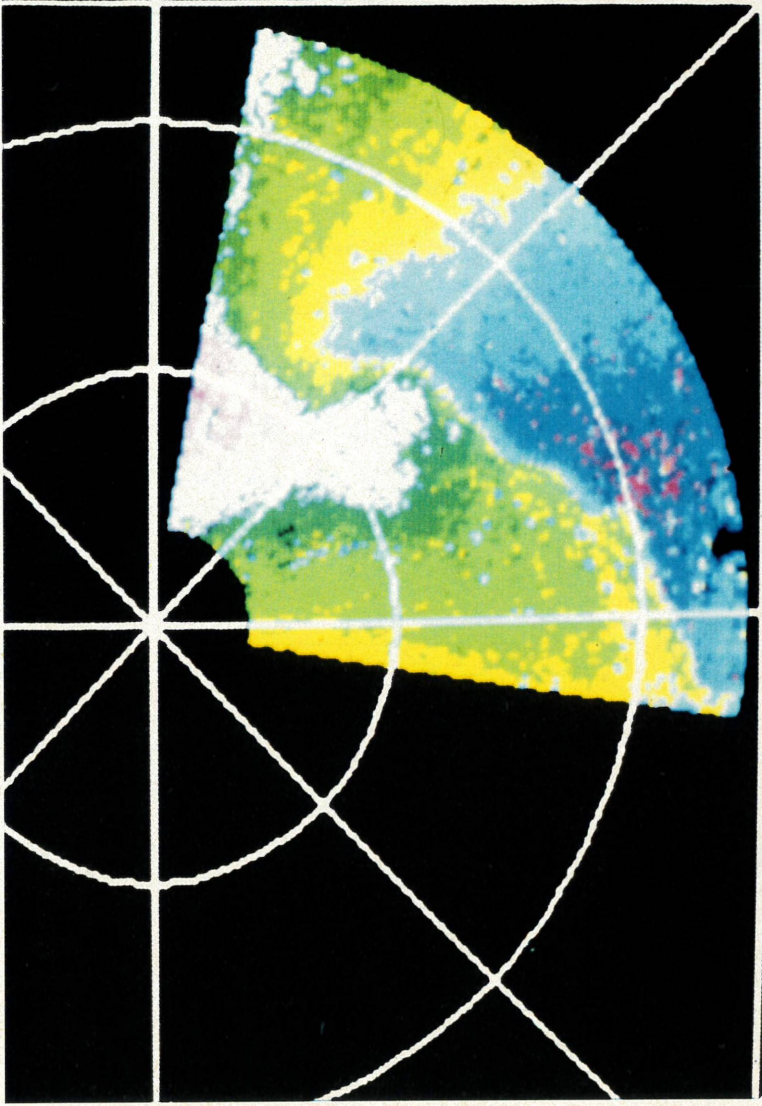
FC: 2

DIST: 64

RHOZ: 10

DN: 25

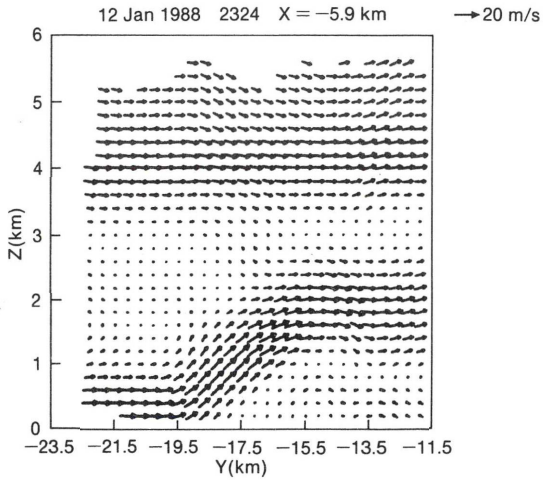
PLAN: 1



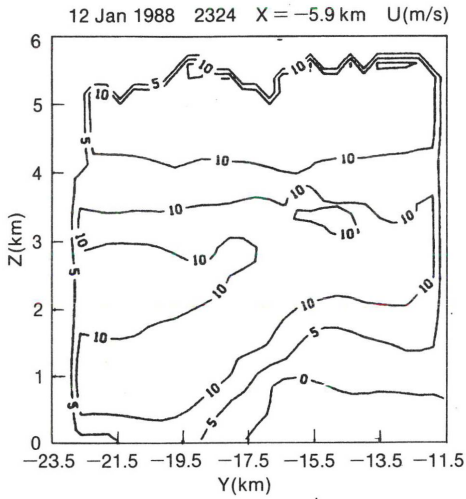
← 20 m/s

-20

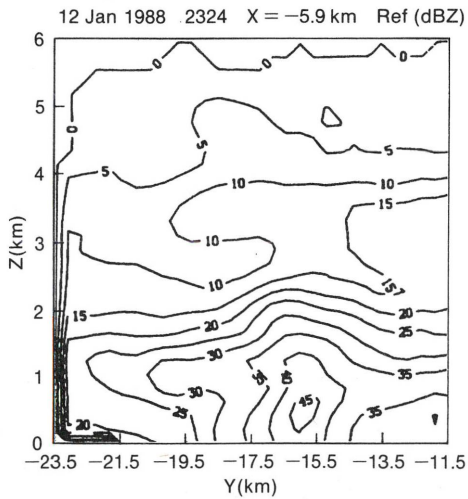
6 a



6 b



6 c



tes, en febrero de 1988, y señalaron un conjunto de prioridades para los datos en los distintos casos. Las prioridades se determinaron de acuerdo con la adecuación de los conjuntos complementarios de observaciones para el estudio de distintos temas definidos en los primeros informes de proyecto. Estos temas se extendían a muchas escalas de interés, desde la influencia de las configuraciones de la vorticidad potencial a gran escala sobre la estructura frontal, pasando por fenómenos tales como la línea de convección (la estrecha e intensa banda de precipitación en algunos frentes fríos), hasta el crecimiento y los efectos de las partículas de precipitación.

Idealmente, los objetivos principales de los experimentos iban dirigidos a la cola inclinada cuasibidimensional de los frentes fríos activos que se asemejan al clásico modelo "noruego". Debía evitarse en lo posible los centros de bajas presiones activos cercanos a la zona central. Esta restricción se consideró necesaria para permitir los estudios dinámicos razonablemente rigurosos utilizando las observaciones. En la práctica, se observó en los frentes una compleja gama de comportamiento según las diferentes corrientes de aire y en diferentes estados de evolución. Por distintas razones (tales como las perturbaciones ordinarias menores o mayores o el movimiento a través de configuraciones de presión permanentes a gran escala) se hizo con frecuencia evidente que los frentes se estaban transformando en su paso a través de la zona. También, casi todos los sistemas mostraron signos de frentes múltiples con regiones complejas que enlazaban los frentes en la superficie con los frentes en altura; algunas de estas estructuras eran muy probablemente debidas a la cálida superficie del mar en esta época del año.

A través de la zona del radar central pasaron líneas de convección bien definidas en el segundo y octavo de los POI, el 11 de noviembre de 1987 y el 12 de enero de 1988, respectivamente; este último caso en particular se ha propuesto como un caso prioritario para todos los experimentadores. Muchos de los esfuerzos iniciales se enfocaron también sobre los estudios dinámicos de un frente observado en el séptimo POI (9 de enero de 1988), que ofreció muestras evidentes de una estructura bidimensional a gran escala. El tercer POI, el 19 de noviembre de 1987, también fue muy interesante; a pesar de una debilitación de la precipitación al alcanzar el frente la zona ZIP, se obtuvieron buenas medidas de la capa límite a partir de los globos cautivos y de otras fuentes y se encontró un aire marcadamente seco tras la superficie frontal.

Resultados preliminares

Echaremos una ojeada a algunas de las observaciones obtenidas de los radiosondas con paracaídas y de radar Doppler dual Ronsard durante el octavo POI (12 de enero de 1988). La *Figura 2* muestra la configuración experimental de la zona de los radiosondas con paracaídas, en la que un frente con alineación norte-sur fue seguido continuamente a través de la zona experimental con perturbaciones ondulatorias pequeñas. En este experimento se utilizaron 40 sondas; las más cercanas estaban espaciadas unos 30 km a lo largo del recorrido y por dos a cuatro minutos de tiempo.

En la *Figura 3* se presenta una sección transversal preliminar mostrando la temperatura potencial equivalente y la humedad relativa deducidas de los datos originales de los sondeos en vuelo para el tercer recorrido. En sí, la superficie de transición no está bien marcada por las variables termodinámicas, estando erosionada en los niveles bajos por el mar relativamente cálido; la transición principal en las componentes de la velocidad está muy

Figura 6.— Secciones transversales del frente deducidas del análisis del radar Doppler dual Ronsard a las 2324 TU del 12 de enero de 1988. El origen de coordenadas es el punto medio de la línea base del radar y el eje positivo de las y está a 303° (el aire frío a la derecha). La velocidad de movimiento del frente en ese momento se tomó como 6 ms^{-1} . Para más aclaraciones, véase el texto.

por delante de ésta, cerca del kilómetro 0 del diagrama. Hay una estructura interesante en la troposfera media que sólo se pone de manifiesto en los sondeos de los radiosondas con paracaídas con alta resolución. Entre 3 000 y 6 000 m es evidente una región potencialmente inestable a 100-200 km detrás de la superficie frontal, mostrándose la fuente probable de la banda de precipitación posfrontal más importante en el último radar y en las observaciones microfísicas.

La *Figura 4* muestra la sección transversal del frente de las componentes de la velocidad en un sistema de referencia que se mueve con el frente en superficie. Se pone en evidencia una circulación compleja, que se refleja en la distribución de la humedad y en la configuración de la nubosidad deducida de las imágenes satelitarias. Además de la circulación principal, en la parte posterior de la superficie del frente, se evidenciaron fuertes corrientes hacia delante tanto por delante como por detrás del frente. Para el conjunto de los recorridos las configuraciones no eran, sin embargo, bidimensionales y se necesitarán muchos esfuerzos y análisis de modelización para interpretar completamente las estructuras descubiertas.

La *Figura 5*, en color, muestra la velocidad radial y las configuraciones de la reflectividad deducidas de uno de los radares Ronsard tres horas después (alrededor de las 0011 TU) cuando el frente pasaba al interior de la zona ZIP. En este momento de su evolución la línea de convección exhibía una estructura segmentada, teniendo cada segmento unos 40 km de largo (*Figura 5b*). Se reconoce una marcada cizalladura en la velocidad radial a lo largo de la línea de alta reflectividad que marcan tanto la línea de convección como la superficie frontal. También puede verse con claridad, en la separación entre los segmentos, la huella de un vórtice a mesoscala en el campo de la velocidad radial.

La *Figura 6* describe el campo tridimensional del viento deducido de una secuencia Coplan de dos radares Ronsard. Comprende un conjunto de secciones verticales perpendiculares al frente mostrando (a) la corriente transversal al frente relativa al mismo (b) la velocidad a lo largo del frente, y (c) la reflectividad radárica. Obsérvese la convergencia a niveles bajos y la succión ascendente a 2 000 m en (a), justamente delante del núcleo de alta reflectividad de (c). La zona de fuerte cizalladura en la velocidad a lo largo del frente que aparece en (b) está probablemente asociada con la zona frontal.

Conclusiones

Ahora está completa la fase de campo del experimento, habiéndose recopilado una de las más completas y detalladas observaciones de frentes fríos realizadas hasta la fecha. Ahora se está dedicando un gran esfuerzo al control de calidad, al proceso y al análisis de los datos, así como al desarrollo de modelos para la asimilación de las observaciones transformándolas en predicciones o para comprobar hipótesis que consideren las características observadas.

Ya se han puesto de evidencia en las observaciones algunas características sugerentes de los procesos que influyen en la frontogénesis y en la formación de la banda de lluvia, pero a largo plazo el archivo resultante demostrará ser también una base de datos importante para la evaluación y comprobación de los modelos de predicción y de las redes de observación. Los avances conseguidos hasta el momento demuestran claramente la pujanza potencial de este tipo de colaboraciones en la meteorología de la mesoscala.

REFERENCIA

BROWNING, K.A.; HOSKINS, B.J.; JONAS, P.R., y THORPE, A.J. (1986): European collaboration on dynamic atmospheric fronts. *Nature* **322**, pp. 114-115.