

# TRAMONTANA, OBSERVACIONES PYREX Y DIAGNÓSTICO

J. Campins

A. Jansá

(C.M.T. de Baleares)

## RESUMEN

*Este trabajo pretende avanzar en el conocimiento de la tramontana a través del análisis de las observaciones PYREX y de un análisis cinemático de las aceleraciones dadas por dos versiones del modelo LAM-INM (0.91 y 0.455). A partir de ello se han caracterizado dos tipos diferentes de tramontana. Por otro lado se ha establecido que la gran intensidad de la tramontana tiene su causa en el bloqueo orográfico de los Pirineos. El flujo acelerado por dicho bloqueo es a su vez girado en sentido anticiclónico debido fundamentalmente a la aceleración de Coriolis. La presencia e intensidad de una baja en el Mediterráneo influye sobre ambos efectos.*

### 1. La tramontana: introducción.

Una primera visión de la estructura horizontal de la tramontana puede extraerse de la climatología. Existen numerosos trabajos sobre el régimen de vientos en el Mediterráneo (*Reiter, 1975; González y Marchionini, 1991*), de los cuales y para el caso de la tramontana pueden extraerse las siguientes características:

- a) máximo de viento en el borde oriental de los Pirineos, y a la salida del Golfo de León;
- b) marcada línea de cizalladura siguiendo aproximadamente el meridiano que pasa por el Cabo de Creus, y
- c) extensión del máximo de viento alcanzando Baleares, aunque de menor intensidad.

Una imagen de satélite tomada en una situación de tramontana (Jansá, 1987) confirma lo descrito.

En cuanto a la estructura vertical tan sólo disponemos de una estadística de viento en altura realizada mediante globos piloto en Menorca durante situaciones de tramontana (*J.M. Jansá, 1933*). En ella se observa un máximo de viento a una altura de 1.000 metros.

### 2. Estructura tridimensional de la tramontana.

El experimento PYREX (*Bougeault y otros, 1990*) permitió obtener una amplia base de datos para el estudio de los efectos dinámicos inducidos por los Pirineos sobre la circulación atmosférica. Entre los objetivos del experimento se encontraba

la documentación de los vientos locales generados por dichas interacciones orográficas, y entre ellos la tramontana. En total se recogieron 10 situaciones (POI: Período de observación intensiva), 5 de las cuales en situación del Norte (1, 6, 8, 9 y 10). En este apartado se presentan análisis de observaciones tomadas durante algunas de estas situaciones. A partir de ellos podremos conocer mejor la estructura tridimensional y la evolución temporal de la tramontana.

**2.1. Globos a nivel constante.**

Durante el experimento PYREX se lanzaron un total de 26 globos a nivel constante con el objetivo de determinar la estructura térmica y dinámica de la tramontana. Éstos se lanzaron desde dos puntos distintos: Port la Nouvelle y Cabo de Creus. Del análisis de las trayectorias de los mismos se deducen dos situaciones diferentes (Figura 1):

- (a) Trayectoria del NW: POI 1, 6, 9 (14 y 15) y 10 (30); y
- (b) Trayectoria del N: POI 8, 9 (16) y 10 (29).

B. Benech y E. Koffi (comunicación personal) han realizado un análisis de dichos globos con el objeto de estudiar las características térmicas y dinámicas de la tramontana. De ellos destaca el máximo de viento alcanzado entre los 50 y 100 km respecto del punto de lanzamiento y el giro progresivo del viento de NW a N ó NE, si bien la amplitud de ambas variaciones depende del globo considerado.

**2.2. Sondeos.**

Para conocer la estructura tridimensional de la tramontana, se analizaron los sondeos efectuados en Port la Nouvelle y los realizados por el avión Piper Aztec en niveles bajos durante el POI 9. De los primeros (Figura 2) se deduce la existencia de una capa de inversión a una altura aproximada de 1.200 metros, y por debajo de ella una capa de máximo de viento. La dirección es del NW y la intensidad varía entre 20 y 30 ms<sup>-1</sup>. De los sondeos realizados por el avión se observa la misma estructura, aunque en el vuelo P23 el sondeo se realice al W de la línea de cizalladura, y por tanto los vientos por debajo de la inversión sean débiles.

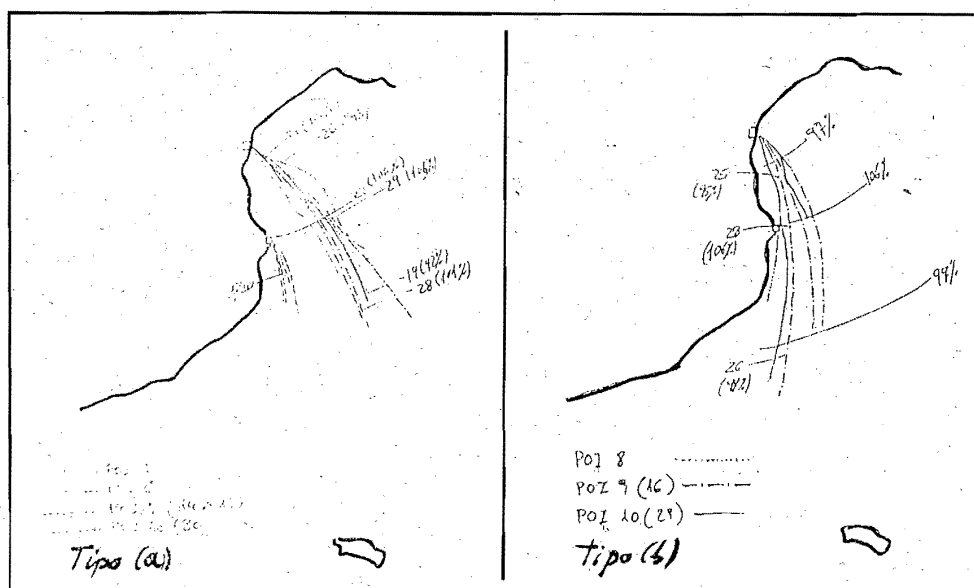


Figura 1.- Trayectorias de los globos en situaciones de Norte, con las velocidades sobre la media (%) (A. Jansá, 1991)

COMUNICACIÓN E6

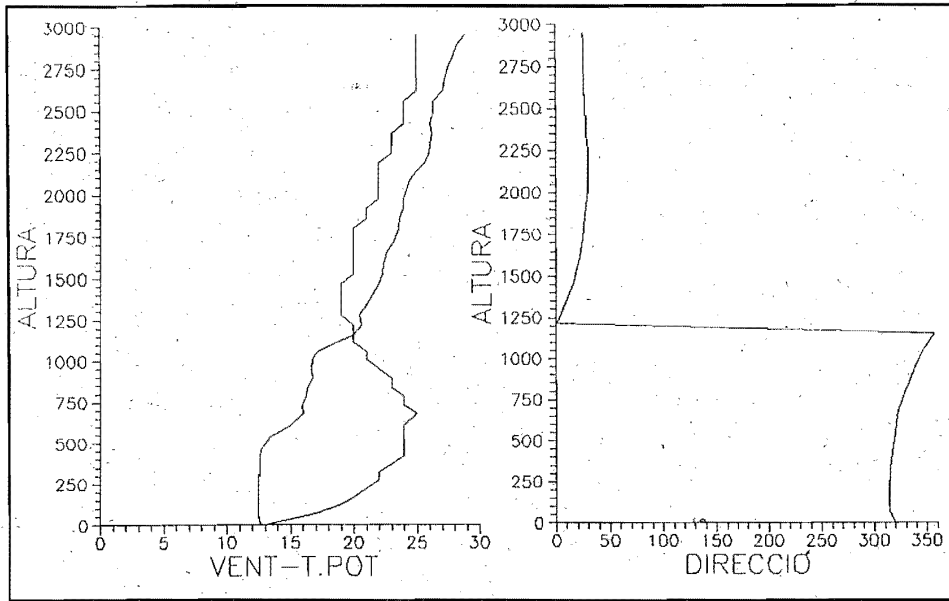


Figura 2.- Sondeo de Port la Nouvelle, 16-NOV-90 a las 12Z (POI 9)

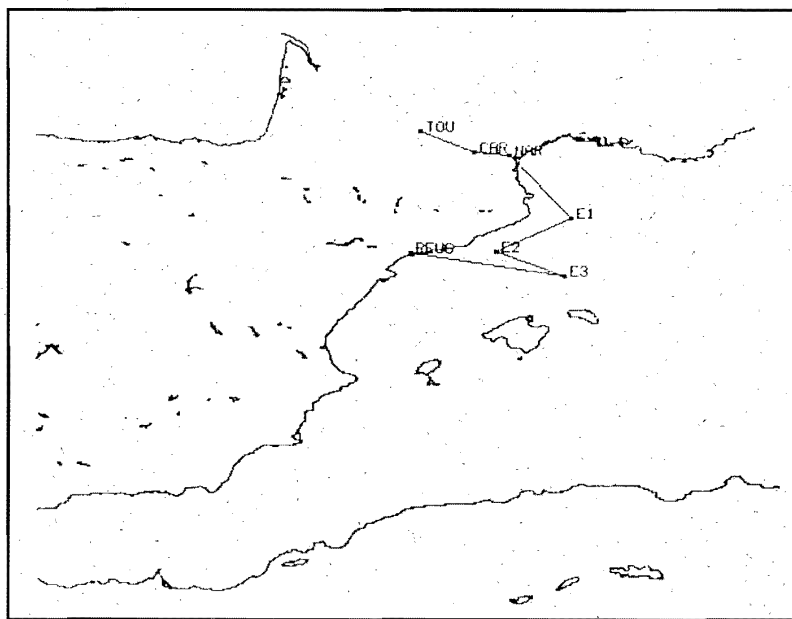


Figura 3.- Trayectoria del avión 'Piper Aztec' durante el POI 9. (Plan de vuelo E)

2.3. Aviones.

Los resultados aquí presentados proceden del vuelo realizado durante el POI 9 (P25, el 16 de noviembre del 90). El plan de vuelo realizado fue el E (Figura 3), distinguiendo los tramos Toulouse-E<sub>1</sub>, E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub>, E<sub>2</sub>-E<sub>3</sub> (en 3 niveles de presión) y E<sub>3</sub>-Reus.

De este vuelo puede destacarse el aumento progresivo de la intensidad del viento, alcanzando un máximo en torno al punto E<sub>1</sub>. También es significativa la caída brusca del viento en el tramo E<sub>1</sub>-E<sub>2</sub> (Fig. 4), que identifica la línea de cizalla. Para el P23 ésta se encuentra más cerca del punto E<sub>1</sub>, mientras que para el P25 se encuentra cerca del E<sub>2</sub>.

2.4. Drag.

El experimento PYREX proporcionó una serie continua de medidas de *drag* a través de una línea transversal a los Pirineos con valores medidos cada 10 minutos (A. Genovés y otros, 1992). Con el objeto de esclarecer la hipótesis formulada en la que se apunta a la interacción entre el flujo del N y los Pirineos como causa generadora de la tramontana, se ha correlacionado la serie de *drag* con la de viento en diferentes estaciones. Concretamente se hizo con las estaciones de Perpignan y Mahón. Para ello se tomaron todos los valores disponibles de viento en esas estaciones (valores aproximados cada 3 horas) junto con los valores simultáneos de *drag*. Se tomó la

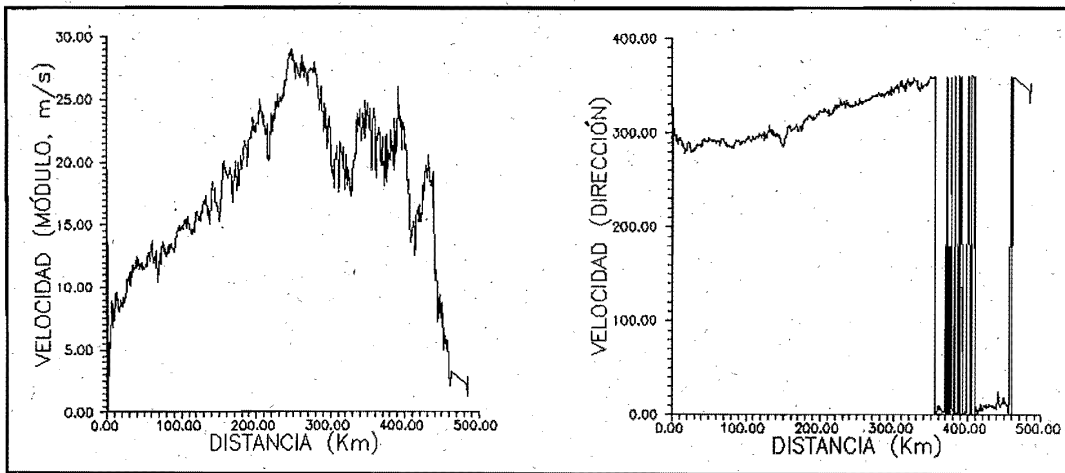


Figura 4.- Tramo Toulouse-E<sub>2</sub> del avión 'Piper Aztec' (POI 9, día 16)

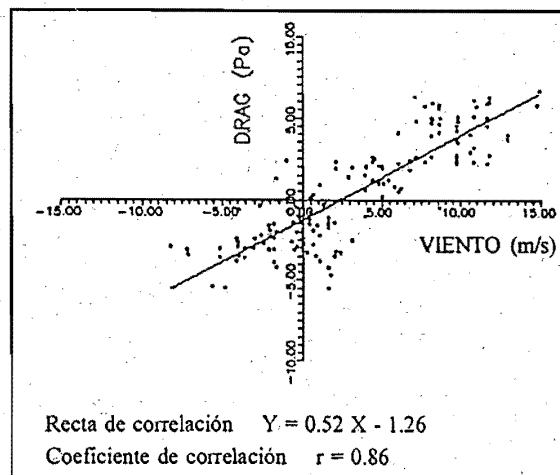


Figura 5.- Correlación entre 'drag' y viento en Perpignan

proyección del viento en la dirección NW para Perpignan y N para Mahón, puesto que son éstas las direcciones que toma la tramontana en ambos observatorios. Con ambas series se realizó una correlación lineal tanto para situaciones de Norte como de Sur. La correlación con Perpignan es muy buena, con un coeficiente de correlación de 0,86. En cambio la correlación con Mahón disminuye mucho, con un coeficiente de 0,57 (ver la Fig. 5).

### 3. Diagnóstico dinámico.

El paso siguiente de este estudio es intentar determinar el por qué de las características principales observadas. La versión experimental (0.455) del modelo LAM-INM mejora mucho a la versión operativa (0.91) en el caso de la tramontana (*García-Moya y otros, 1992*), por lo que el análisis comparativo de ambas versiones entre sí, y de éstas con las observaciones, nos puede dar información acerca de la contribución de los diferentes términos de la ecuación del movimiento a la aceleración.

El cálculo de la aceleración del viento, así como la contribución de los diferentes términos a la misma (gradiente de presión, Coriolis y rozamiento) se ha realizado en el nivel de presión constante de 1.000 mb.

Para ello se parte de la ecuación aproximada del movimiento en coordenadas de presión:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla\Phi - f\vec{k} \times \vec{V} + \vec{R} \quad [1]$$

siendo  $\vec{R}$  el rozamiento.

Se hacen las siguientes hipótesis:

- (1) Estacionariedad:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0$$

- (2) Advección vertical nula:

$$w \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} = 0$$

Ambas hipótesis son aceptables una vez se ha desarrollado la tramontana, puesto que durante este período el viento alcanza un valor máximo que se mantiene un cierto tiempo, y dentro de la capa baja existe un máximo de viento que da una variación del viento con la altura aproximadamente nula.

$$\vec{a} = \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = u \nabla \cdot \vec{V} + v \nabla \cdot \vec{V} = -\nabla\Phi - f\vec{k} \times \vec{V} + \vec{R} \quad [2]$$

con  $\vec{V}$  el viento horizontal.

Para este estudio se han calculado los vectores aceleración, gradiente de presión, aceleración de Coriolis y rozamiento, así como la componente tangencial y normal de los mismos. Si proyectamos sobre el vector tangente, tenemos:

$$a_t = \vec{t} \cdot \vec{a} = \vec{t} \cdot [-\nabla\Phi - f\vec{k} \times \vec{V} + \vec{R}] \quad [3]$$

$$PAV = PPV + PROZ$$

$$\text{con: } PAV = a_t ; PPV = \vec{t} \cdot [-\nabla\Phi] ; PROZ = \vec{t} \cdot \vec{R}$$

Por otro lado, si proyectamos sobre el vector normal a la velocidad (girado 90° a la izquierda), obtenemos:

$$PAN = PPN + C + ROZN \quad [4]$$

$$a_n = \vec{n} \cdot \vec{a} = \vec{n} \cdot [-\nabla\Phi - f\vec{k} \times \vec{V} + \vec{R}]$$

$$PAN = \vec{n} \cdot \vec{a} ; PPN = \vec{n} \cdot [-\nabla\Phi] ; C = -fV ; ROZN = \vec{n} \cdot \vec{R}$$

Del modelo LAM-INM en ambas versiones tenemos campos en el nivel de 1.000 mb del campo de viento horizontal ( $u, v$ ), geopotencial ( $z$ ) y temperatura ( $T$ ). Con estos campos y a través de un programa McBasic calculamos los vectores aceleración así como las proyecciones sobre la velocidad (acel. tangencial) y el vector normal (acel. normal).

A continuación se comparan las aceleraciones obtenidas con las dos versiones del modelo LAM-INM para integraciones de los POI 1 y 9. La comparación de los campos de geopotencial y viento en ambas versiones no se trata aquí puesto que forma parte de un estudio más amplio realizado por el Servicio de Predicción Numérica, y publicado como Nota Técnica núm. 21 de dicho Servicio y núm. 2 del Grupo Español PYREX (*García-Moya y otros, 1992*).

#### 3.1. Componentes tangenciales.

##### 3.1.1. Aceleración tangencial (PAV).

En la versión operativa 0.91 las aceleraciones son siempre positivas en casi toda la zona considerada, aunque débiles ( $< 2 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ ), con un máximo más o menos localizado en el Golfo de León de alrededor de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ . En esta versión

el viento empieza a decelerar a la altura de las Baleares, pero de una forma poco intensa.

La versión 0.455 localiza mucho más de aceleración en el Golfo de León a la vez que lo intensifica, dando un máximo de  $10 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ . Por otro lado, el flujo una vez acelerado en el Golfo empieza a decelerar, en ocasiones de forma intensa. Esto produce un fuerte gradiente de esa magnitud, separando una zona de mucho viento de otra con poco viento.

### 3.1.2. Aceleración tangencial debida al gradiente de presión (PPV).

La versión 0.91 presenta un gradiente bórico positivo, y por tanto favorable al movimiento, en toda la zona. El máximo está concentrado sobre los Pirineos, con valores de entre 10 y  $20 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ .

En cambio en la versión 0.455 el máximo de los Pirineos es más intenso, de alrededor de  $30 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ . El resto es normalmente favorable al movimiento, con valores no excesivamente grandes. También cabe señalar que a diferencia de la versión 0.91, presenta algunas zonas con valores negativos, es decir, zonas con viento dirigido hacia las altas presiones.

### 3.1.3. Aceleración tangencial del rozamiento (PROZ).

La versión de baja resolución, al tener aceleraciones (PAV) bajas, reproduce casi exactamente el campo PPV (aunque de signo contrario, y algo menor). Por tanto, valores de PROZ negativos en toda la zona, con valores menores (mayores en módulo) sobre tierra.

Cabe significar la existencia de dos pequeñas zonas sobre el mar con valores de PROZ positivos, aunque de valor muy pequeño.

La versión de alta resolución también sitúa los valores menores sobre tierra y los mayores sobre el mar. Sobre el mar los valores son básicamente negativos y pequeños, aunque también existen zonas con valores positivos (estas zonas coinciden con las de la otra versión, pero son mayores y algo más intensas).

Las zonas de valor PROZ positivo pueden ser debidas a los términos de estacionariedad y advección vertical despreciados, o bien al hecho

de que exista un transporte de momento turbulento desde niveles superiores al nivel de 1.000 mb (o de todos ellos a la vez). Este punto aún no está claro por no conocer la contribución de los términos despreciados.

## 3.2. Componentes normales.

Los valores de aceleración normal positivos corresponden a circulación ciclónica y los negativos a anticiclónica.

### 3.2.1. Aceleración normal (PAN).

De ambas versiones destacan dos cosas: un mínimo ligado al giro anticiclónico a la salida del Golfo de León y un máximo ligado al giro ciclónico de la baja de Génova. El primer aspecto lo reproduce débilmente la versión 0.91 ( $10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ ); en cambio la versión 0.455 lo reproduce mucho mejor, con valores muy superiores ( $10 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ ). Dicho giro viene ligado al bloqueo producido por los Pirineos y a la aceleración de Coriolis, por lo que la versión 0.455 con orografía más realista reproduce. En cuanto al segundo aspecto no existen grandes diferencias entre ambas versiones. Posiblemente el cambio de resolución no afecte tanto a los aspectos sinópticos como es la baja de Génova.

### 3.2.2. Aceleración normal debida al gradiente de presión (PPN).

Todos los valores de PPN, salvo para la versión 0.455 y en una pequeña zona al N de los Pirineos, son negativos, como corresponde al flujo bórico. La estructura general en ambas versiones coincide, aunque son algo más intensos para la versión 0.455. Los valores normales están entre  $-10$  y  $-20 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-2}$ .

### 3.2.3. Aceleración de Coriolis (C).

En la zona de estudio el parámetro de Coriolis prácticamente no varía, siendo aproximadamente  $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ . Por tanto el campo de aceleraciones de Coriolis coincide con el de isotacas. La versión 0.455 reproduce mucho mejor el viento que la versión 0.91 (véase la Nota Técnica del Servicio de Predicción Numérica, núm. 21), y por tanto lo mismo ocurre con la aceleración de Coriolis.

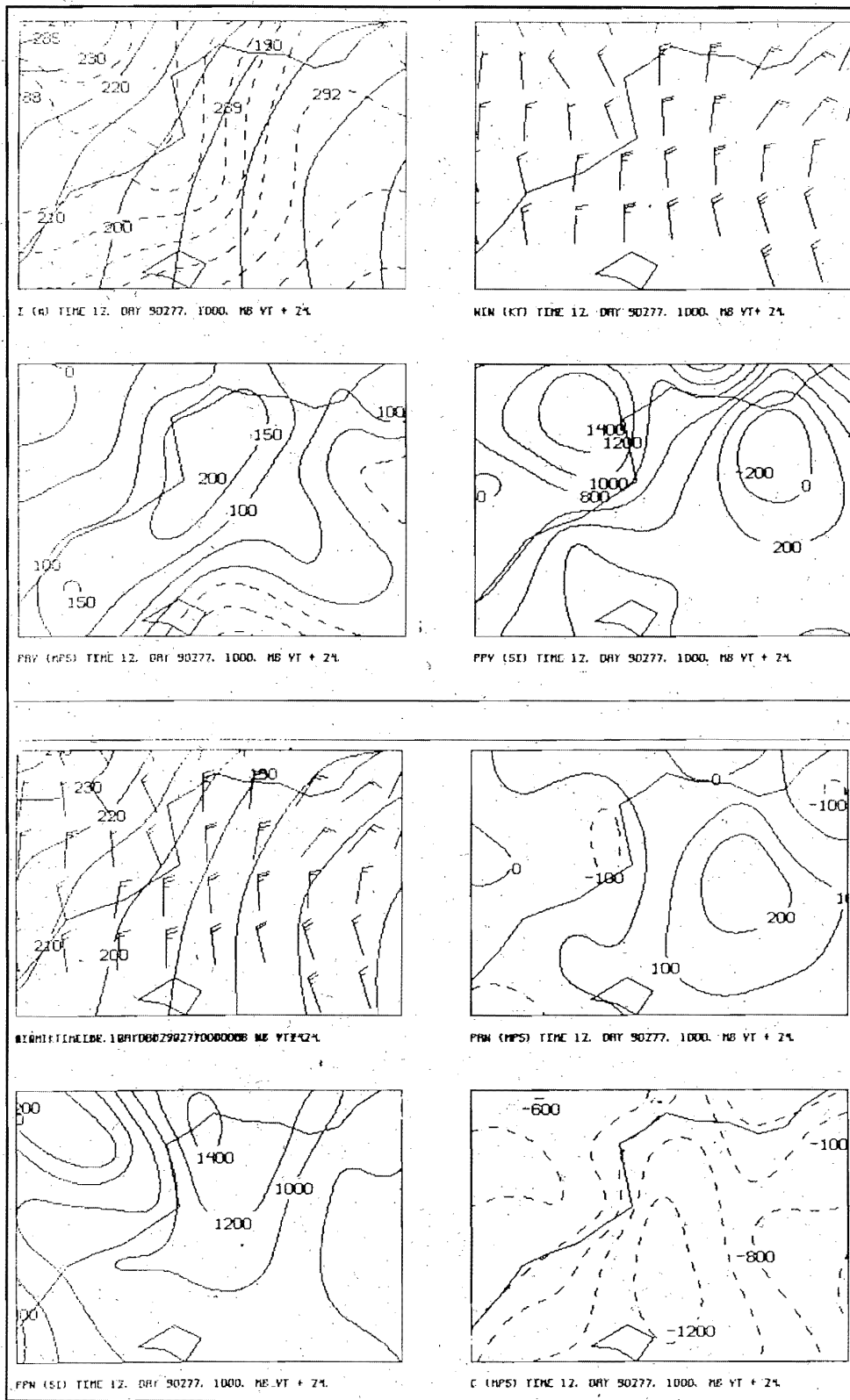


Figura 6.- Modelo LAM-INM, versión 0.91, geopotencial, viento y aceleraciones en 1.000 mb

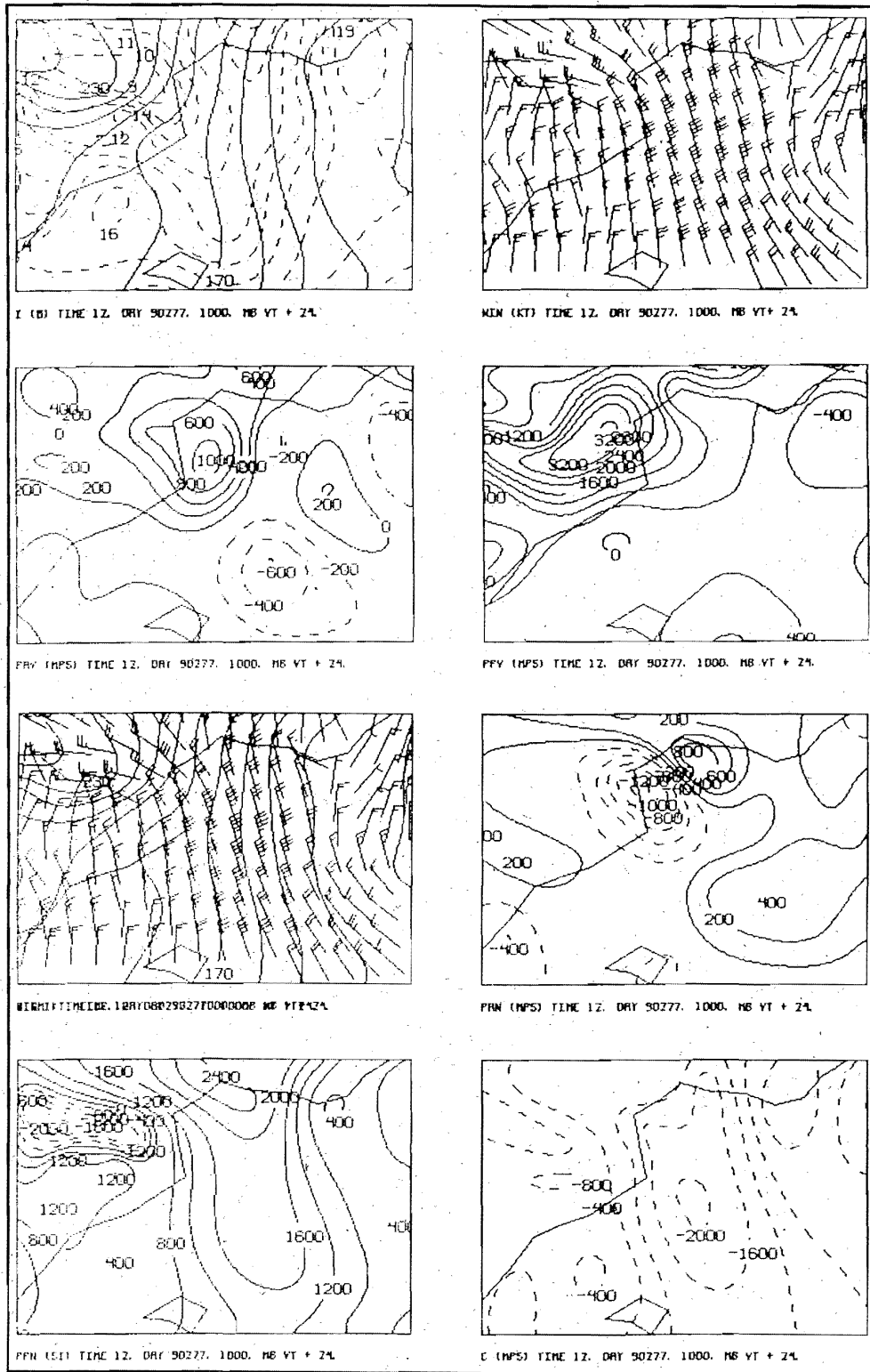


Figura 7.- Modelo LAM-INM, versión 0.455, geopotencial, viento y aceleraciones en 1.000 mb



### 3.2.4. Aceleración normal debida al rozamiento (ROZN).

Este campo está calculado a partir de los otros tres. Al igual que ocurre con la aceleración normal debida al gradiente de presión, ambas versiones coinciden en los rasgos generales con valores muy pequeños en ambos casos.

#### Conclusiones.

Del análisis de los resultados destacamos las siguientes conclusiones:

(1) La tramontana tiene la estructura vertical de un máximo de viento por debajo de una inversión térmica. La dirección de dicho máximo es NW en la salida al Golfo de León, para ir girando anticiclónicamente hasta N ó NE (según la situación). La estructura horizontal presenta un máximo de viento a una distancia de entre 50 y 100 km de la costa francesa y una abrupta línea de cizalladura siguiendo aproximadamente el meridiano que pasa por el Cabo de Creus. La posición y orientación de la línea de cizalladura depende de la dirección del máximo de viento, presentando ambas aproximadamente la misma orientación. Por otro lado al W de la línea de cizalladura y protegida de los Pirineos se observa una pequeña alta, con vientos poco intensos.

(2) El máximo de aceleración situado a la salida del Golfo de León, relacionado con el fuerte gradiente bórico de los Pirineos, explica el máximo de viento que se produce en esta zona. Por tanto, la intensidad de la tramontana está ligada con el bloqueo orográfico de los Pirineos.

(3) A la salida del Golfo de León se produce un giro anticiclónico del viento producto, fundamentalmente, de la aceleración de Coriolis que es muy intensa al coincidir con el máximo de viento.

(4) El viento, una vez acelerado en el Golfo de León, se extiende hacia el Sur fundamentalmente por inercia. Si en su camino encuentra un gradiente bórico favorable, permite que la tramontana llegue tan fuerte hasta el Norte de Baleares, detectándose un máximo relativo. Este gradiente favorable, y por tanto el máximo de viento, está relacionado con la posición y extensión de la depresión mediterránea que normalmente se acompaña a estas situaciones.

#### Referencias.

Bougeault, P. (1990). *Momentum budget over the Pyrénées: the PYREX experiment. Bulletin of American Meteorological Society, vol. 71, no. 6. June 1990.*

García-Moya, J.A. y otros (1992). *Experimentos numéricos sobre situaciones PYREX usando diferentes versiones del LAM. Servicio de Predicción Numérica. Nota Técnica núm. 21.*

Genovés, A. y otros (1992). *Dipolo orográfico. Consideraciones a partir de observaciones PYREX. En este libro.*

González, E.; Marchionini, J. (1991). *Étude du système mistral-tramontane en Méditerranée. École Nationale de la Météorologie. Rapport de stage d'approfondissement.*

Jansá, A. (1987). *Distribution of the mistral. A satellite observation. Meteorology and Atmospheric Physics, 36. pp. 201-214.*

Jansá, J.M. (1933). *Contribución al estudio de la tramontana en Menorca. Servicio Meteorológico Español. Serie A, núm. 13.*

Reiter, E.R. (1975). *Handbook for forecasters in the Mediterranean. Part 1: General description of the meteorological processes. Environmental Prediction Research Facility (ENVPREDRSCHFAC).*