

DESCRIPCION METEOROLOGICA Y FORONOMICA DE LA AVENIDA DEL RIO EBRO ENTRE EL 20 DE DICIEMBRE DE 1960 Y EL 4 DE ENERO DE 1961

Por ANTONIO LOPEZ BUSTOS

Ingeniero de Caminos

y ANGEL REIJA GARRIDO

Ingeniero de Caminos y Meteorólogo

Basados en los mapas de superficie y altura del Servicio Meteorológico Nacional, se hace una descripción tridimensional de la situación meteorológica diaria en el período en estudio. Se describe seguidamente la avenida en la zona en consideración, obteniéndose de la comparación de ambas algunas conclusiones, que se exponen al final. Se hace una estimación del volumen total de agua precipitada, así como de la importancia relativa de la fusión de nieve en la avenida.

Para el estudio de la evolución de la situación atmosférica durante este período, hemos utilizado el material facilitado por el Servicio Meteorológico Nacional, que comprende una serie de mapas sinópticos, y la colección de Boletines diarios que edita el mencionado servicio. Deseamos agradecer públicamente al Servicio Meteorológico Nacional las facilidades que nos han sido dadas para la obtención de los datos necesarios.

Los mapas utilizados han sido los de superficie, 850 mb., 500 mb. y 300 mb. a horas sinópticas de 00,00 y 12,00 TMG.

El Boletín diario del Servicio Meteorológico Nacional nos ha suministrado los datos de lluvias de las estaciones más importantes, los sondeos termodinámicos de la atmósfera en Zaragoza y los mapas de variación de temperatura en superficie.

Los datos pluviométricos, aunque insuficientes, nos han servido para el trazado de mapas de isoyetas diarios, utilizando las estaciones de la cuenca en estudio y sus proximidades. Basados en ellos y mediante suma gráfica, limitada el área en estudio, se han trazado las isoyetas acumuladas. Estas han sido comprobadas mediante cuadros acumulativos de precipitaciones en estaciones interiores a la cuenca.

Los datos de aforos proceden del correspondiente Servicio de la Confederación Hidrográfica del Ebro.

Descripción de la situación meteorológica diaria.

En el día 18, una extensa depresión con varios núcleos se extendía desde Islandia al Norte de África, cubriendo parte del Atlántico y toda la Europa Continental y había claros indicios para la formación de un vórtice sobre Azores.

Día 19. — En este día, la corriente de chorro que venía del Norte se bifurcó frente a Islandia en dos ramales: uno, de poca energía, dirigido a las Azores para reforzar el vórtice allí formado, y otro, más intenso, con dirección hacia Inglaterra, asociado este último con un frente frío que venía a unirse con la incipiente onda formada sobre el archipiélago antes citado.

La gota fría continental está bordeada por un chorro regional que la ha empujado hacia el Norte.

Las precipitaciones, por el momento, son bastante débiles, afectando solamente a Guipúzcoa y Pirineo Occidental.

En el transcurso del día 19, el chorro principal se desglosa en dos, ambos del Norte y bien definidos: uno se dirige a Azores y el otro, independiente ya, bordea las Islas Británicas: el chorro regional que bordea la gota fría continental es cada vez más débil.

El vórtice de Azores, a última hora se está transformando en una gota fría con debilitamiento y posterior desaparición de los frentes.

Las temperaturas al nivel de 850 mb. permanecen ligeramente superiores a cero grados en el área en estudio. Durante el día se ha notado variación de temperatura en tierra.

El sondeo de Zaragoza a 00,00 TMG, indica una masa inestable con bastante humedad en capas altas, que en el transcurso del día va estabilizándose al ser sustituida por aire más cálido. La inversión que se aprecia en el sondeo entre 700 y 800 mb. se corresponde con el paso de un frente secundario. En el sondeo de 12,00 TMG, la inversión va en disminución.

Día 20. — A 00,00 horas TMG el ramal N-S del chorro se ha desplazado a la derecha y pasa por la costa Occidental de Islandia, girando luego hacia el

Este, pasando próximo a la costa Cantábrica y dirigiéndose hacia los Países Bajos.

La borrasca de Azores, ya con características de gota fría, se ha movido hacia el Sur. Los frentes asociados han desaparecido.

A la izquierda de la corriente de chorro principal se está profundizando una borrasca bien definida con tendencia a moverse hacia el Sur. A las 12,00 horas TMG la borrasca de Azores está entre estas islas y las de Madera, y la borrasca de la izquierda de la corriente de chorro principal está centrada sobre Francia.

El chorro se ha movido más hacia el Sur, pasando paralelo y próximo a los Pirineos por el valle del Ebro.

Las temperaturas a 850 mb. son ligeramente superiores a 0° en la zona en consideración.

El chorro meridional tiene una gran energía, estando situado el máximo sobre el Mediterráneo. La curvatura en las isohipsas de 500 mb. es moderada, y la $\frac{\partial v}{\partial n}$ o cizalladura horizontal de la corriente parece importante, indicando que la situación está evolucionando hacia una gran actividad.

Un sistema frontal está penetrando por Galicia a las 00,00 horas TMG y el frente frío cruza el país en 24 horas, mientras una nueva irrupción fría llega a la costa Cantábrica a mediodía.

Las precipitaciones fueron moderadas en este día.

El sondeo del día 20 a las 11,00 horas con la inversión entre 400 y 500 mb. confirma en altura el paso del primer frente frío.

La penetración de aire frío del Norte está haciendo descender las temperaturas en superficie. Se observan en el mapa de variaciones de temperatura descensos de 3° en 24 horas.

Día 21. — La gota fría de Azores-Madera se ha desplazado hacia las islas Canarias y tiende a ser completamente absorbida. La borrasca continental está centrada aproximadamente sobre París con el surco (en 500 mb.) dirigido hacia el Norte de Africa.

El chorro se ha movido hacia el Sur y va desde Islandia a Guipúzcoa, valle del Ebro y Mediterráneo, con un máximo de 100 nudos a 9 000 m., situado sobre la cuenca baja del Ebro.

No se observa ningún vestigio de frentes.

Por el barco K (45° N., 15° W.) hacia el cabo de San Vicente discurre otra corriente de chorro importante.

Las temperaturas a 850 mb. son ligeramente inferiores a cero en la zona en consideración. En superficie, las temperaturas permanecen estacionarias.

La masa de aire sobre el Ebro es muy húmeda. Las curvas de estado del sondeo son casi coincidentes y siguen la adiabática húmeda.

Las precipitaciones en este día 21 son muy inten-

sas. Según datos del Boletín diario, en Sondica se recogieron 50 litros por m.².

Día 22. — En el día 22 el chorro que estaba situado sobre el Ebro se ha desplazado hacia el Norte de Africa, y el que discurría desde el barco K al Cabo de San Vicente se ha movido hacia el Este apuntando hacia las Azores y bifurcándose, presentando otro ramal que se dirige al Golfo de Vizcaya.

Se ha reforzado el anticiclón del Atlántico y un frente frío, que alcanza la costa a las 00,00 horas, se mueve muy rápidamente hacia el interior en el transcurso del día, cruzando la Península, arrastrado por un intenso viento del Norte.

El máximo de viento en la corriente, que a las 00,00 horas tiene un valor de 120 nudos a 10 000 metros situado sobre el Canal de la Mancha, se desplaza hacia el Golfo de Vizcaya y cuenca alta del Ebro perdiendo intensidad.

El surco de 500 mb. se inclina hacia Lisboa. La borrasca está situada al NW de los Alpes.

Las temperaturas son a 850 mb. inferiores a cero grados y no hay apenas variación de temperaturas en superficie respecto al día anterior.

La masa aérea sobre Zaragoza, según datos del sondeo, continúa siendo húmeda e inestable.

Las precipitaciones continúan siendo intensas, llegando en la zona en consideración a valor de 45 l./m.².

El anticiclón atlántico progresa ligeramente hacia el continente.

Día 23. — El chorro del Norte pasa por el área en estudio con un máximo de unos 95 nudos a 10 000 metros de altura sobre dicha zona y se desplaza en el transcurso del día hacia el Pirineo Occidental.

El sistema frontal que llega por el Atlántico, avanza a gran velocidad sobre el mar Cantábrico y la corriente de chorro atlántica se está organizando con mayor intensidad.

Las temperaturas siguen siendo a 850 mb. inferiores a cero grados (de -2 a -4°).

El sondeo termodinámico indica la misma masa de aire que el día anterior.

Las precipitaciones, aunque más débiles que el día anterior continúan siendo considerables, obedeciendo principalmente al estancamiento de la masa nubosa que alcanza las sierras de Andía y Urbasa.

Día 24. — La corriente de chorro Atlántica se dirige de Norte a Sur, y a la izquierda de ella, sobre el Cantábrico, se observa una depresión con movimiento rápido hacia el Sur.

El frente frío cruza rápidamente la Península formando un ángulo superior a 45° con la corriente de chorro, por lo que manifiesta poca actividad.

Aun cuando no se dispone de mapas de vorticalidad, parece observarse la existencia de alguna divergencia en superficie sobre el área en estudio compensada con convergencia a 500 mb. Como resultado, las precipitaciones disminuyen y son casi exclusivamente de

carácter orográfico. El mecanismo de convergencia-divergencia es de poca intensidad.

Las temperaturas han subido algo y son a 850 mb. aproximadamente de cero grados en esta zona, bajando ligeramente a las 12,00 horas TMG.

El sondeo termodinámico de Zaragoza de las 00,00 horas refleja el paso del frente frío, y en el de las 12,00 horas se observa una entrada de aire frío en altura que llega hasta los 450 mb.

Día 25. — La corriente de chorro bordea la depresión que se ha desplazado profundamente hacia el Sur y está situada al Norte de África.

Se observa una invasión del anticiclón atlántico con la loma orientada desde Azores hacia los Pirineos (en 500 mb.), con la consiguiente convergencia a ese nivel.

Prosigue el estancamiento en la zona Norte y continúan las precipitaciones del orden de 16 l./m.² en la proximidad de la costa cantábrica.

Las temperaturas a 850 mb. son ligeramente superiores a cero grados. Las precipitaciones son relativamente calientes, lo que permite suponer una probable fusión de nieve.

El sondeo de las 12,00 horas TMG presenta dos inversiones: La inferior, acompañada de disminución de humedad, indica subsidencia, coincidiendo con la penetración de la zona anticiclónica. La superior, con un incremento de humedad, indica un paso de un frente cálido.

Día 26. — La circulación general de la atmósfera indica claramente situación del NW.

Un frente frío toca a la costa a las 12,00 horas.

La corriente de chorro gira al NE.

Aunque hay cizalladura horizontal del viento apreciable, es débil la curvatura, por lo que la divergencia a 500 mb. es moderada.

Continúa la situación de estancamiento y las lluvias presentan en la zona un máximo de unos 10 litros./m.².

Las temperaturas a 850 mb. continúan aumentando y varían entre 2 y 3° sobre cero.

Las lluvias dentro del sector cálido pueden producir fusión de nieve.

Los sondeos indican masa bastante húmeda y relativamente cálida.

Día 27. — Prosigue la situación del NW.

El chorro pasa por la costa francesa y se dirige hacia Dinamarca.

En el transcurso del día va descendiendo de latitud, pasando a las 12,00 horas más al Sur y próximo a la cordillera Cantábrica. La velocidad es casi uniforme en esa zona, estando en ella el máximo.

De nuevo aumentan las precipitaciones, observándose un máximo de 27 l./m.² en Fuenterrabía.

Las temperaturas a 850 mb. son próximas y algo inferiores a cero grados.

El sondeo termodinámico de las 12,00 horas pa-

rece indicar un estrato de aire frío de poco espesor coincidiendo con el paso del frente frío.

Día 28. — La situación sigue siendo del NW.

Entre las 00,00 y las 12,00 horas puede apreciarse un frente frío avanzando hacia la costa de Galicia, arrastrado por la corriente de chorro. Esta corriente discurre sobre la cuenca del Ebro, estando situado su máximo de viento alejado de la Península, sobre el Atlántico. Su valor es de 135 nudos a unos 8000 metros; en el transcurso del día se acerca bastante a la zona cantábrica.

Las temperaturas en el área en estudio son a 850 mb. ligeramente inferiores a cero grados.

Las precipitaciones en el Cantábrico son abundantes, teniendo un máximo de 37 l./m.² en Fuenterrabía. Parecen asimismo abundantes sobre la cuenca alta del Ebro, decreciendo rápidamente en el resto de dicha cuenca.

El sondeo de las 00,00 horas acusa el aumento de humedad en altura, debido al paso del frente cálido. El paso del frente frío es reflejado en el sondeo de las 12,00 horas al presentar éste una inversión a 800 mb.

Día 29. — Continúa la situación del NW. Los dos núcleos anticiclónicos, el de Azores y del Continente, marcan la trayectoria de los sistemas frontales que cruzan a través del valle del Ebro.

El eje de chorro se desplaza hacia los Pirineos, avanzando su máximo de viento hacia el Gran Sol.

Las temperaturas a 850 mb. son ligeramente inferiores a cero grados. No hay apenas cambios en tierra.

El frente frío ha cruzado ya la Península y está sobre el Mediterráneo. En el Atlántico un nuevo sistema frontal se acerca a España.

Las precipitaciones son en general mayores que el día anterior, teniendo un máximo de 45 l./m.² en Bilbao.

Según el sondeo termodinámico de las 00,00 horas, la masa de aire es bastante húmeda, casi coincidiendo la curva de estado con la adiabática saturada.

Posteriormente el aire va estabilizándose por arriba al aproximarse el frente cálido.

Se nota el efecto del calentamiento en la topografía de 500 mb. al aproximarse la loma al continente.

Día 30. — El chorro a las 00,00 horas cruza los Pirineos, teniendo localizado su máximo de viento al Norte de este sistema montañoso y próximo a él.

Un sistema frontal afecta a la zona entre 00,00 y 12,00 horas.

Las temperaturas a 850 mb. son inferiores a cero grados, estando a las 12,00 horas comprendidas entre 4 y 6° en la región considerada.

El valle del Ebro cae dentro del sector cálido. Las temperaturas aumentan bastante en superficie.

La loma caliente a 500 mb. ha progresado considerablemente hacia el Canal de la Mancha.

El chorro se desplaza hacia el E.

Las lluvias en este día son de tipo cálido y deben producir fusión de nieve. Su magnitud es superior a las del día anterior, llegando a 53 l./m.² en Fuenterrabía. Se observa coincidencia con la aproximación del máximo de viento en la corriente de chorro.

El aire continúa siendo húmedo a todos los niveles, según los sondeos.

Día 3r. — La corriente de chorro atraviesa Francia y se dirige a Túnez.

Presenta el máximo de viento 120 nudos a 8000 metros sobre el Atlántico, algo alejado de la costa francesa, y otro relativo sobre Francia de 100 nudos a 7700 metros, que se va reforzando en el transcurso del día.

En 500 mb. el surco Atlántico está próximo a la costa española, con una probable advección de vorticalidad bastante intensa, pues la curvatura está aumentando y la cizalladura horizontal del viento está también incrementándose.

Las temperaturas a 850 mb. son a cero horas de 4 a 6° sobre cero, disminuyendo a 12,00 horas, pero conservándose inferiores a cero grados. Esta variación de temperaturas puede explicar la aproximación del surco a 500 mb.

Las precipitaciones en la zona son más intensas que en el día anterior y de tipo cálido.

El frente frío permanece en posición casi estacionaria desde Lisboa a Cataluña.

La masa de aire sigue siendo húmeda en todas las alturas.

Día 1. — La corriente de chorro a las cero horas viene del NW., girando hacia el NE. y pasando paralela a la cordillera Cantábrica, próximo a ella y algo más al Norte. A las 12,00 horas se desplaza hacia el Sur y se bifurca sobre Galicia, dirigiéndose una rama a los Alpes, cruzando el valle del Ebro, y la otra hacia el Estrecho. El primer ramal tiene su máximo pasados los Pirineos, teniendo en la zona en estudio un mínimo de viento.

El surco de 500 mb. se hace más agudo, aumentando notablemente su velocidad de desplazamiento. Todo parece indicar que la advección de vorticalidad sobre la zona ha disminuído notablemente.

Las temperaturas a 850 mb. son superiores a cero grados.

Un frente frío cruza la zona produciendo precipitaciones escasas.

El sondeo indica masa húmeda, aunque algo más estable.

Día 2. — La corriente de chorro sigue desorganizándose. Un ramal tiene su máximo sobre los Alpes, otro chorro sobre el Canal de la Mancha presenta un máximo de 100 nudos a 8700 metros, y un tercer chorro regional cruza el golfo de Cádiz.

El surco en 500 mb. sigue progresando hacia el Este.

La situación de nuevo se hace del NW. y un nuevo sistema frontal afecta a la Península.

Aparece otro surco en 500 mb. en el Atlántico con tendencia a reforzarse por inyección de aire frío.

Las temperaturas a 850 mb. son inicialmente inferiores a cero grados, pero en el transcurso del día aumentan unos 6° al irse aproximando el frente cálido.

Las precipitaciones son preferentemente cálidas y moderadas.

El sondeo sigue indicando masa húmeda.

Día 3. — Continúa la situación del NW.

El chorro viene del NW. atravesando la costa francesa y dirigiéndose a París con un máximo de 130 nudos a 14600 metros sobre el barco K (45° N., 15° W.).

El surco en 500 mb. apenas existe.

En el transcurso del día el chorro desciende de latitud y a las 12,00 horas coincide casi con la costa Cantábrica, pasando el máximo muy rápidamente a lo largo de esta zona.

Las precipitaciones aumentan notablemente a lo largo de la costa y en la cuenca alta del Ebro, coincidiendo con la cizalladura del viento, a pesar de la escasa curvatura en 500 mb.

Las temperaturas en 850 mb. son ligeramente superiores a cero grados.

Los sondeos son los típicos de la situación del NW., curva de estado casi coincidente con la adiabática húmeda y curva de humedad próxima a ella.

Día 4. — Persiste la situación del NW.

El chorro desciende hacia el Ebro, pero el máximo de viento está alejado de la zona.

En 500 mb. la corriente es del NW. El surco parece ser bastante débil, indicando posiblemente alguna convergencia en altura.

Las precipitaciones son del orden de 6 a 8 l./m.². En la costa Cantábrica son algo mayores probablemente debido al efecto orográfico.

Las temperaturas a 850 mb. son próximas a cero grados.

La tendencia general de los vientos es a disminuir en todos los niveles y la situación del NW. desaparecerá en las próximas 24 horas al introducirse el anticiclón de las Azores sobre España y el centro de Europa.

Al Norte de él pasarán las borrascas Atlánticas por sus caminos típicos y la situación bajo estudio puede darse por concluída.

Descripción de la avenida de diciembre de 1960 y enero de 1961 (días 27 al 8).

La materialización de los fenómenos anteriores se refleja en los ríos de la cuenca de la forma que se manifiesta en las estaciones de aforos, cuyos corres-

pendientes datos de caudales en m.³/seg. se indican en cada uno de los días que comprende el estudio.

Las estaciones de aforo relacionadas con la crecida pueden dividirse en dos grupos. En el primero se incluyen las del Ebro en Mendavia, Ega en Andosilla, Arga en Peralta y Aragón en Caparroso, así como también el Segre en Lérida y Cinca en Fraga, todas ellas indicadas para analizar el origen de la avenida. En el grupo segundo se incluyen las estaciones del Ebro en Castejón, Zaragoza, Sástago, Fayón y Tortosa, propias ellas para analizar la avenida en sí misma.

Las estaciones del Segre en Lérida y Cinca en Fraga alcanzaron, en todo el período estudiado, máximos diarios respectivos de 194 y 95 m.³/seg., los días 10 de diciembre de 1960 y 2 de enero de 1961, a los que corresponden caudales específicos de 18 y 10 litros por segundo y Km.² de cuenca. Estas cifras confirman cómo los ríos de la cuenca del Segre quedaron al margen de la avenida. Para ello basta observar los máximos diarios y caudales específicos de las otras estaciones de aforos del llamado grupo primero en el cuadro 1.º:

CUADRO 1

ESTACION DE AFOROS	Km. ² de cuenca	Caudal máximo diario m. ³ /seg.	Día en que tuvo lugar	Caudal específico l/sg./Km. ²
Ebro en Mendavia . . .	12010,0	1.600	1- 1-61	133
Ega en Andosilla . . .	1 272,3	398	31-12-60	314
Arga en Peralta	2 872,7	547	31-12-60	190
Aragón en Caparroso . . .	5 504,5	1 080	31-12-60	196
Suma . . .	21 59,5			

Por no sobrecargar de números este estudio, no se han incluido datos de estaciones de aforos del Gállego y otros afluentes de menor importancia, pero puede decirse que, como el Segre, ellos no influyeron en la avenida. Las estaciones de Santa Eulalia y Ardisa, particularmente, tampoco acusaron caudales extraordinarios, todo por suerte para gran número de ribeños, ya que así se evitaron mayores daños en las correspondientes zonas de influencia.

Esta inhibición del Gállego y el Segre-Cinca, a pesar de tratarse de ríos pirenaicos con características similares a los productores de la avenida, no puede achacarse, como es natural, a fenómenos enteramente casuales, ya que las diferentes alturas, situación y orientación de los valles de cabecera hacen manifiestamente improbable la producción de una avenida general de la vertiente Norte del Ebro.

Por otra parte, el gran número de embalses del

sistema Segre hace aún más difícil la producción en él de una avenida destructora en el valle del Ebro inferior, y otro tanto va sucediendo en los demás afluentes a medida que se ponen en servicio nuevas obras de esta clase.

Una vez comprobado que la avenida ha tenido su origen en las cuencas vertientes a las estaciones de aforos de Mendavia, Andosilla, Peralta y Caparroso, cabe puntualizar sobre los caudales máximos instantáneos de dichas estaciones, que fueron los que se detallan en el cuadro número 2, así como las fechas y horas en que se presentaron:

CUADRO 2

ESTACION DE AFOROS	Caudal máximo instantáneo m. ³ /seg	Día en que tuvo lugar	Hora	Distancias a Castejón Km.
Ebro en Mendavia . . .	1 690	1-1-61	18 horas	71,8
Ega en Andosilla . . .	487	30-12-60	21 horas	43,0
Arga en Peralta	—	—	—	28,7
Aragón en Caparroso . . .	1 650	31-12-60	24 horas	38,1
Ebro en Castejón . . .	5 000	31-12-60	12 horas	0,0

Los datos de la estación del Arga en Peralta son incompletos a este respecto por carecer de limnógrafo.

Aunque catalogada en lo que llamamos "grupo segundo", hemos incluido aquí la estación del Ebro en Castejón, por ser el punto donde ya se totalizan los caudales de las anteriores, de aguas arriba, y referencia necesaria respecto a distancias recorridas, velocidad e integración de las ondas.

Se observa en primer lugar que en Andosilla, por presentarse la punta de la avenida a las veintinueve horas, el día del máximo caudal instantáneo fué el 30, en tanto que el de mayor media diaria lo fué el 31. Cosa parecida debió de suceder en Peralta, aunque sólo puede apuntarse por referencias indirectas, al no haber limnógrafo, como se ha dicho.

Como la punta de la avenida fué en Castejón a las doce horas del día 31, partiendo de Andosilla resulta una velocidad de traslación de la onda de 0,8 m./seg.; esta velocidad no puede atribuírsele en valor real por interferir con las ondas de Mendavia, Caparroso y la menos conocida de Peralta, en forma que no se precisa analizar para los propósitos de este estudio.

Puede afirmarse en todo caso que las ondas de Caparroso, y particularmente Mendavia, estuvieron defasadas sensiblemente de la resultante general de Castejón, lo cual aminoraría, sin duda, notablemente los caracteres destructores de la avenida.

Considerando el período substancial de las mayores aportaciones el comprendido entre los días 28 de diciembre y 3 de enero de 1961, hemos formado el cuadro número 3, donde se indica en cada estación de

referencia el volumen total circulado y la altura virtual de precipitación equivalente en l./m.²:

CUADRO 3

ESTACION DE AFOROS	Volumen aportado en la semana de 28-12-60 a 3-1-61 en Hm ³	Equivalente de precipitación virtual en l/m ²
Ebro, en Mendavia	628	52,0
Ega, en Andosilla	143	112,4
Arga, en Peralta	270	94,0
Aragón, en Caparroso	335	60,8
Ebro, en Castejón	1 490	59,4

La cuenca del Ebro en Castejón es de 25.194,1 kilómetros cuadrados, y la suma de las estaciones del cuadro es de 21 659,5 Km.². Así que existe una superficie intermedia no controlada en los aforos manejados, de 3 534,6 Km.².

La suma de las aportaciones de las cuatro primeras estaciones del cuadro número 3 es de 1 376 Hm.³ en los siete días, y faltan para completar Castejón, con 114 Hm.³, asignables a la cuenca no controlada, en la que resulta así una precipitación virtual equivalente a 32,3 l./m.².

Esta aportación de 114 Hm.³ es cifra, no obstante, que debe darse con reserva, debido a estar deducida como diferencia de magnitudes de orden sensiblemente superior, y, de interesar, sería necesario cotejarla con los datos de las estaciones de aforos de los afluentes intermedios, como serían el Cidacos y el Alhama. Por lo que al interés de la avenida se refiere, sólo cabe comentar que la distribución media de 32,3 l./m.² entrañará una gran irregularidad, pues, como es natural, las vecindades de las zonas más "húmedas" ha de elevar notablemente la cifra local a expensas de las superficies más alejadas, particularmente en la vertiente Sur.

En lo referente a lo que hemos llamado grupo segundo de estaciones, para analizar la avenida en sí, Castejón, Zaragoza, Sástago, Fayón y Tortosa, presentamos en la figura correspondiente un gráfico de caudales circulados en cada una desde el 27 de diciembre al 10 de enero para comparar el paso de la onda.

Si aislamos los siete días correspondientes al de máximo caudal, tomando los tres anteriores, el día de máximo y los tres siguientes, vemos que en esa semana pasaron por el Ebro aproximadamente unos 1 550 Hm.³ en cada estación de aforo: es decir, que las aportaciones intermedias de Castejón a Tortosa fueron despreciables al lado de esta masa de agua comparable a la capacidad de los mayores embalses españoles, y del orden del 8 por 100 de la suma de todos ellos.

Como es natural, se manifiesta particularmente en el tramo Castejón-Zaragoza cómo la punta de la onda se rebajó, disminuyendo la intensidad de la avenida y aumentando su duración.

Los ejes de abscisas, o tiempos, se han colocado a distancias proporcionales a las existentes entre cada estación de aforos a lo largo del río, para poner de manifiesto la velocidad de desplazamiento de la onda que se evidencia en la pendiente de la línea de trazo y punto. Esta velocidad fué de 0,69 m./seg. entre Castejón y Zaragoza, de 0,87 m./seg. entre Zaragoza y Sástago, de 2,20 m./seg. de Sástago a Fayón y de 1,03 m./seg. entre Fayón y Tortosa.

Hacemos notar que en el gráfico aparece dibujada de puntos la curva de Tortosa a partir de los 3 450 metros cúbicos/seg., caudal correspondiente a nivel de las aguas, de 7 m., leídos en la escala allí existente, que es toda su longitud actual, aunque va a alargarse; pero a poco más se produce el desbordamiento del río, agotándose la carrera del limnógrafo, al mismo tiempo que se inundan sus accesos. Todo ello significa que en la zona punteada los datos no reúnen la exactitud deseable. El nivel máximo alcanzado fué de 8.10 m. el día 5 de enero, según referencias directas en la instalación.

La velocidad de traslación de la onda en el tramo Fayón-Tortosa se ha deducido, pues, sin poder contar con la comprobación de la hora en que se produjo la punta de Tortosa con la exactitud dada por el limnógrafo correspondiente, como se hizo en los otros tramos.

Volumen de agua vertida.

Basándonos en los datos pluviométricos publicados en el Boletín Diario del Servicio Meteorológico Nacional, se han trazado mapas de isoyetas diarias y acumuladas.

Planimetradas las isoyetas del período total y hechos los cálculos correspondientes, resulta como valor del volumen de agua precipitada 4 775 Hm.³.

Esta cifra no contradice los 1 600 Hm.³ que antes medimos como volumen circulado por el Ebro en los siete días centrales de la avenida, y que se amplían a 3 800 Hm.³ si se consideran los veintidós días, del 23 de diciembre al 13 de enero, en que sensiblemente fué notorio el paso de la riada por Castejón, volúmenes estos últimos forzosamente influenciados por las aportaciones adicionales de causas ajenas a las que nos ocupan.

Importancia de la fusión de nieve en la avenida.

Aunque en el período en estudio ha habido ciertos días con características favorables para la fusión de nieve, todo parece indicar que el agua aportada, según

este proceso, no representa una parte considerable del total de la avenida.

Este fenómeno podría presentarse bajo los siguientes aspectos:

- Intercambio de calor con el aire.
- Intercambio de calor con el suelo.
- Efecto del vapor de agua en el aire.
- Lluvia caliente.
- Insolación.

El intercambio de calor con el suelo tiene un efecto pequeño una vez fundida la parte suficiente para saturar la capacidad del terreno de absorción de humedad.

La fusión por lluvia caliente representa un pequeño porcentaje del agua precipitada. Por ejemplo, un milímetro de agua a 9° C. fundiría solamente 0,12 milímetros, medidos en agua equivalente, de la cubierta de nieve (según ábaco de Wilson).

La experiencia en España parece indicarnos mayores valores que estos que da el ábaco, basado probablemente en datos en Estados Unidos. Tal vez al sumar los efectos térmico y mecánico nos resulte mucho mayor este último debido a nuestras características orográficas. No obstante, en nuestro caso, con una temperatura media de unos 5° para el agua precipitada, la fusión de nieve no parece importante con relación a la lluvia.

La fusión por insolación depende de la época del año y en estos meses de diciembre y enero es muy pequeña. Además, por este efecto puede producirse sublimación en lugar de fusión.

El intercambio de calor con el aire (principalmente el debido a turbulencia) es del mismo orden de magnitud que el debido a efecto del vapor de agua en el aire, según estudios hechos en Norteamérica.

Intentaremos evaluar la fusión de nieve al intercambiar calor con la masa aérea, sin buscar más aproximación que un simple orden de magnitud.

Supongamos el día 30 en que un sector cálido cubre la cuenca del Ebro.

La temperatura a 850 mb. (1 500 m. aproximadamente) es de unos 4° centígrados.

Consideramos que la capa de nieve comienza a la altitud de 900 m.

La zona en que el aire podría fundir la nieve se extendería desde los 900 m. hasta los 1 700 aproximadamente.

La temperatura media de la masa de aire en esa zona sería de unos 6°.

El dato de viento en el sondeo de Zaragoza a 850 mb., tomado en un período de unos diez días, nos da una fuerza media del viento de 30 nudos. Reducimos este dato a 20 nudos para evaluar el viento medio en la zona considerada para la fusión de nieve teniendo en cuenta las razones siguientes:

a) El nivel medio de la zona es inferior a los 1 500 metros, correspondientes aproximadamente a los 850 mb.

b) En general, el viento será menor que en la atmósfera libre, salvo algún caso especial de desfiladero o montaña sobrepasando ligeramente esa altitud.

Así, pues, consideramos un viento medio en la zona de 20 nudos.

Según la fórmula de Wilson, $M = c V_w (T_a - 32)$, en donde:

M es la cantidad de nieve fundida (en pulgadas).

C , una constante (0,004, en unidades inglesas).

V_w , la velocidad del viento, en nudos.

T_a , la temperatura del aire, en grados Fahrenheit.

Aplicada a nuestro caso, $M = 0,004 \times 12 \times 20 = 1$ pulgada ($M = 25$ mm. aproximadamente).

Si evaluamos ahora la zona en la que tiene lugar la fusión de nieve, en relación con la totalidad de la cuenca en un 5 por 100, tendríamos:

Lluvia media sobre la cuenca equivalente a la fusión de nieve = $\frac{25 \times 5}{100} = 1,25$ mm.

No representa parte importante de las precipitaciones en estos días.

Según parece, aun sumando todos los efectos causantes de fusión de nieve, la parte de la avenida correspondiente a este fenómeno probablemente no alcance el valor del 20 por 100 del total.

Factores fundamentales determinantes de las intensas precipitaciones.

Se puede, en general, considerar como causas fundamentales de las precipitaciones los tres fenómenos siguientes: frentes activos, advección de vorticalidad máxima y efecto orográfico.

Se ha destacado la importancia de la corriente de chorro, dada su gran influencia sobre los dos primeros fenómenos mencionados.

En efecto, puede afirmarse lo siguiente:

a) La mayor o menor actividad de los frentes está relacionada con la posición y características de la corriente de chorro.

b) Al ser la advección de vorticalidad una función de la curvatura de la corriente y de la cizalladura horizontal del viento, ha de estar íntimamente relacionada con el transporte de masa y cantidad de movimiento y presentará sus valores máximos en la zona en donde la atmósfera tiene su mayor energía, es decir, en las proximidades de la citada corriente.

Situación general atmosférica durante el período.

La situación atmosférica durante el período comprendido entre el día 19 de diciembre de 1960 y el 4 de enero de 1961 ofrece, en líneas generales, dos modelos meteorológicos claramente definidos:

Entre los días 19 de diciembre y 21 del mismo mes, ambos inclusive, situación del Norte.

Desde el día 21 de diciembre al 4 de enero, situación del NW.

Esta última situación finaliza al extenderse el anticiclón de las Azores sobre España y el centro de Europa.

La persistencia de estas situaciones fué: normal la del Norte, algo excesiva la del NW.

Esta impresión general, que bien podría haberse basado exclusivamente en el análisis de tierra, no justificaría las razones de tan anómalas precipitaciones. En otras muchas ocasiones aparecen estas situaciones con análoga persistencia y las precipitaciones no alcanzan valores tan grandes.

Ello nos demuestra la necesidad del estudio de la situación atmosférica en una manera tridimensional, teniendo muy en cuenta los diversos mapas de altura.

Según datos estadísticos anuales, en la zona del Atlántico próxima a Europa existen por esta época dos corrientes en chorro. Una viene del Océano y pasa al Norte y próxima al paralelo 50, atraviesa Inglaterra y se dirige al Norte de Suecia donde finaliza. La otra comienza en el Norte de Africa (ligeramente al Norte de Canarias) y se dirige a Túnez.

La magnitud de la velocidad del viento (valor medio) es mayor en la más meridional, pero esto no representa realmente los valores verdaderos, pues es debido a su menor movilidad, mientras que la otra oscila más en torno a su posición media, siendo sus valores diarios bastante mayores.

Así, pues, normalmente España no es afectada por ninguna de estas dos corrientes. El caso contrario se presenta en los casos siguientes:

a) La oscilación de la corriente de chorro más septentrional puede ser lo suficientemente grande para que ésta pase por el Norte de España. En este caso la velocidad de la corriente suele presentar sus valores normales, grandes en general.

b) La corriente antes citada se bifurca o rompe enlazando con la otra más meridional. Cuando esto ocurre la corriente atraviesa España de Norte a Sur y es en general más débil.

Hablando en términos generales, el tiempo en que tuvo lugar la avenida corresponde a un período en que la corriente de chorro pasa por España o próxima a la Península, bien como oscilación de la corriente más septentrional (como, por ejemplo, el día 3) o debido a la bifurcación o rotura de esta corriente para enlazar con la meridional, como ocurre del día 20 al 25.

De la consideración de las precipitaciones durante los días en estudio y sus probables causas se han establecido las conclusiones que a continuación exponemos:

Conclusiones.

1. Tanto en situaciones del N. como del NW., con frentes o sin frentes, hay que esperar un aumento de las precipitaciones por encima de lo normal en la cuenca alta del Ebro, si se cumplen las condiciones siguientes:

a) La corriente de chorro pasa por la zona o por sus proximidades.

b) Esta corriente tiene situado su máximo de viento próximo a la zona.

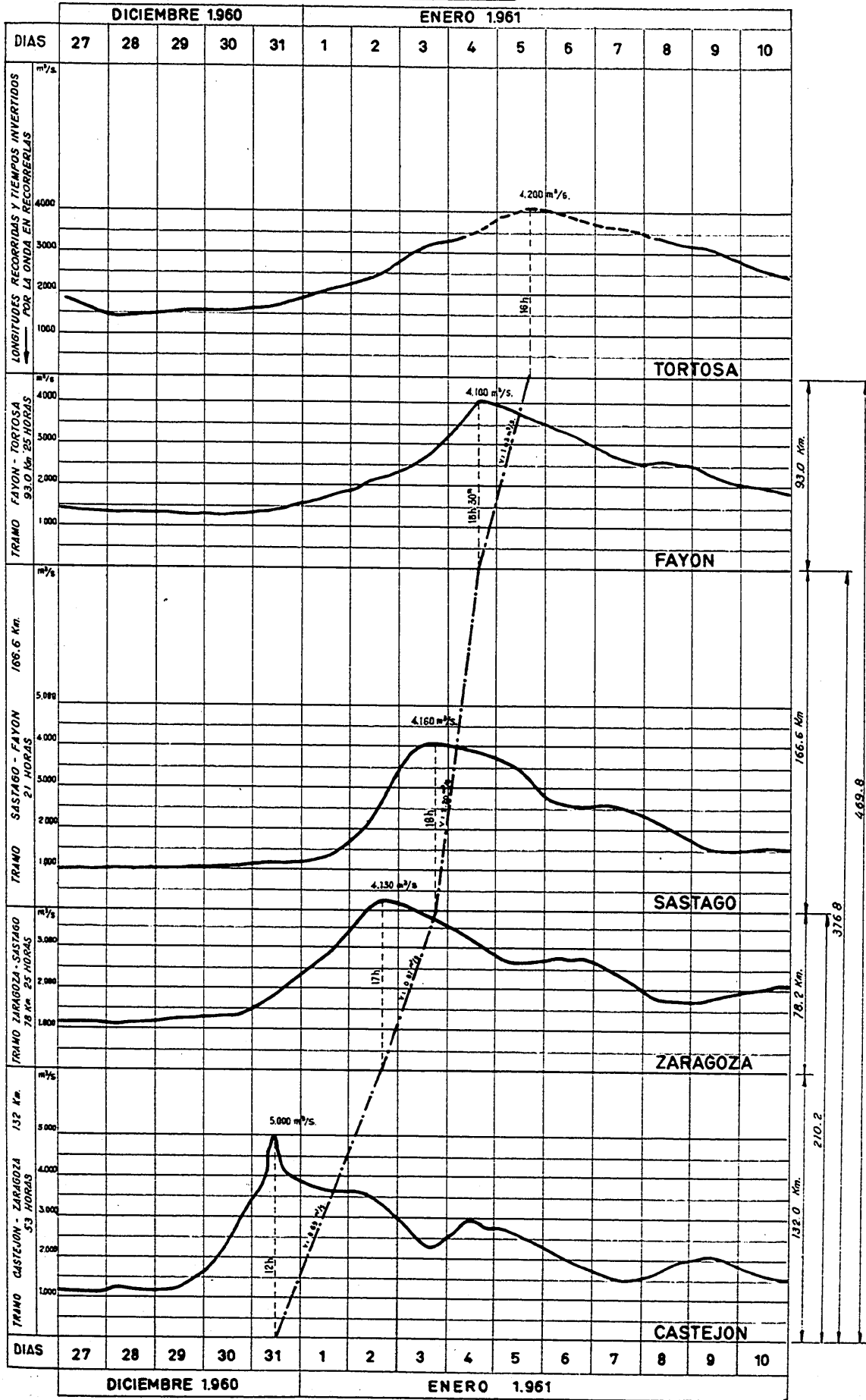
Si la persistencia de esta situación es suficiente, se producirá la avenida. (El estudio de esta última parte exigiría una serie estadística muy larga.)

2. Durante el paso de frentes, tanto en una como en otra situación, las precipitaciones serán de poca importancia si al nivel de la tropopausa y sobre el área en estudio existe una zona de vientos flojos con pequeña cizalladura horizontal.

3. En el período bajo estudio no se cree que la fusión de nieve haya representado una parte importante de la avenida, siendo el exceso de precipitación debido a causas de meteorología dinámica, el factor fundamental.

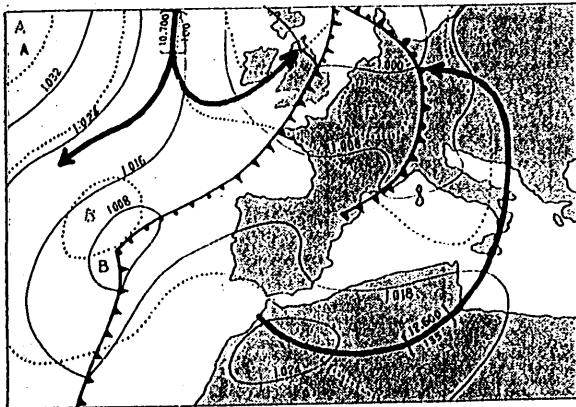
4. Los sondeos termodinámicos no revelan características especiales. Se trata simplemente de sondeos típicos correspondientes a las situaciones del N. y NW., curva de estado que en general sigue la adiabática húmeda y curva de humedad próxima a ella. Este gráfico es modificado por el paso de frentes.

AVENIDA DEL EBRO



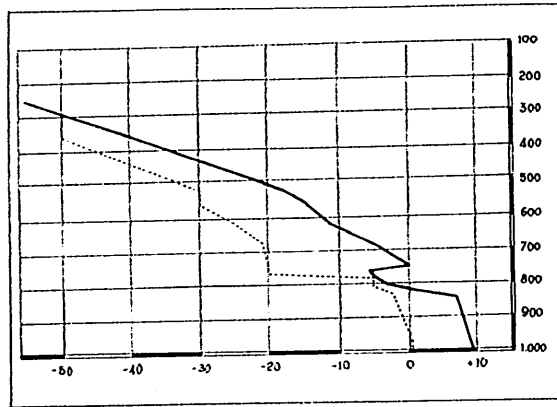
DIA 19

SITUACION METEOROLOGICA



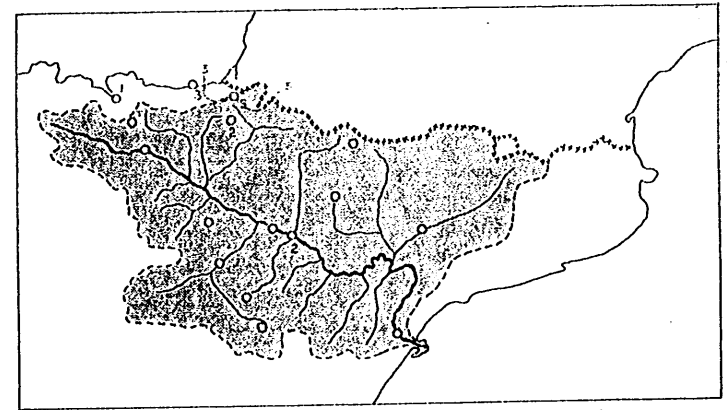
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA

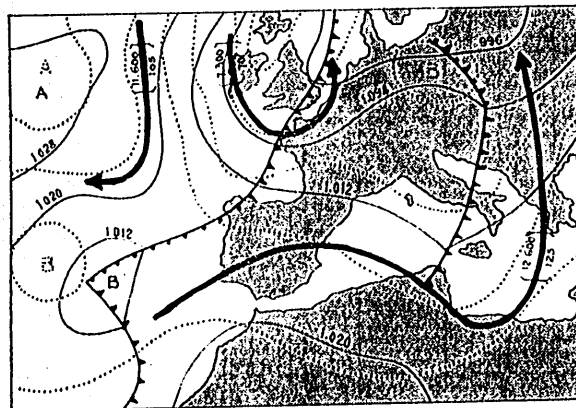


0 horas

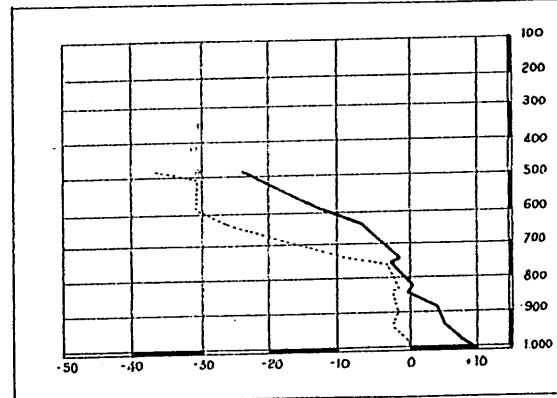
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



12 horas

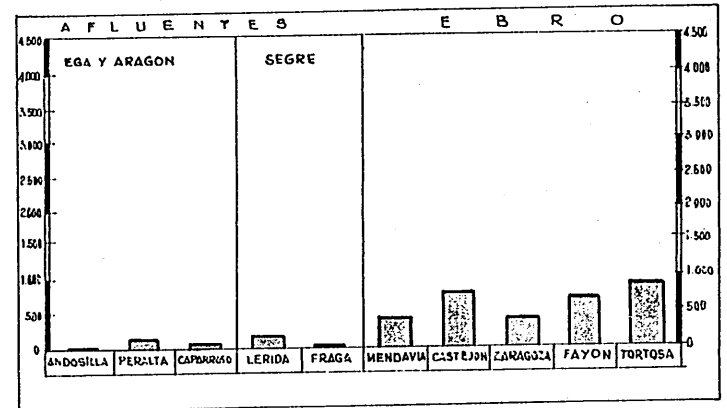
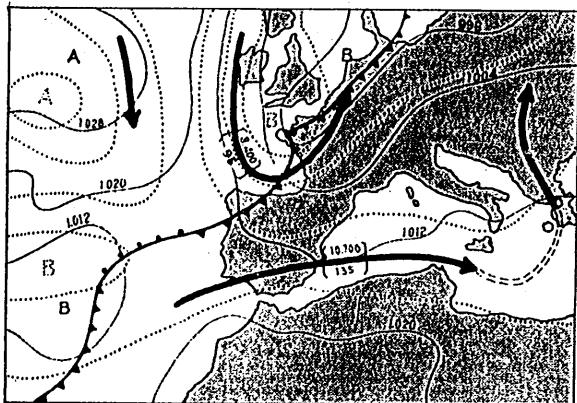


GRAFICO DE AFOROS

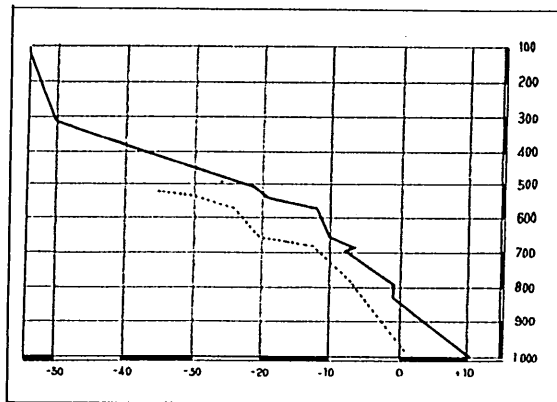
DIA 20

SITUACION METEOROLOGICA



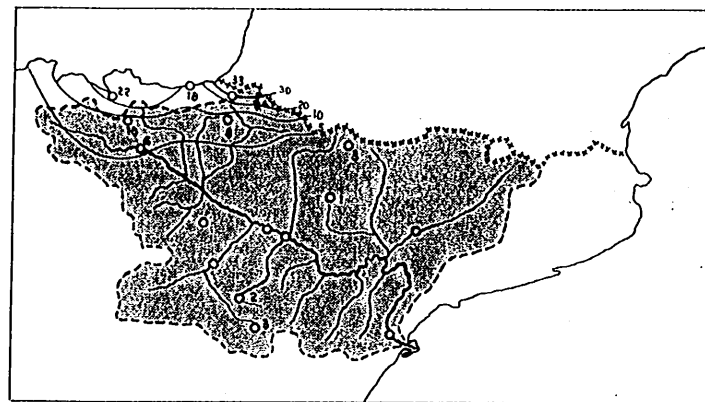
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA

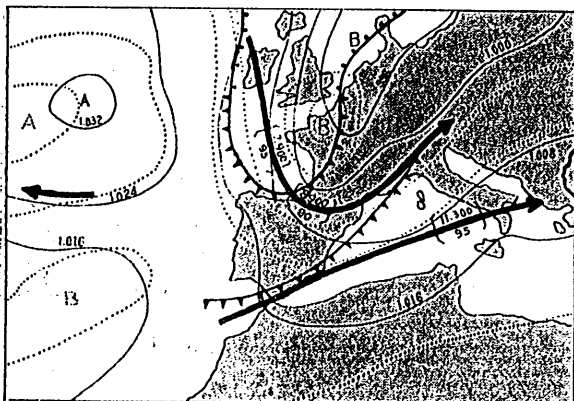


día 19 a las 23 horas

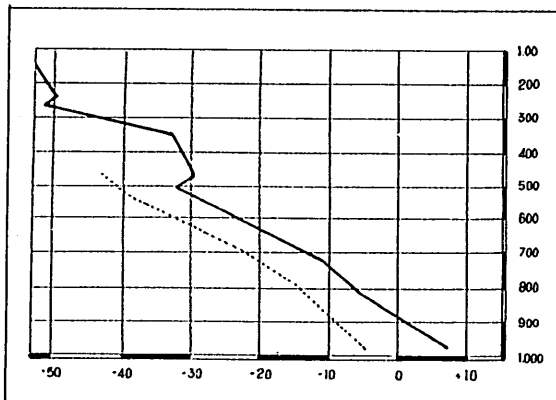
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



11 horas

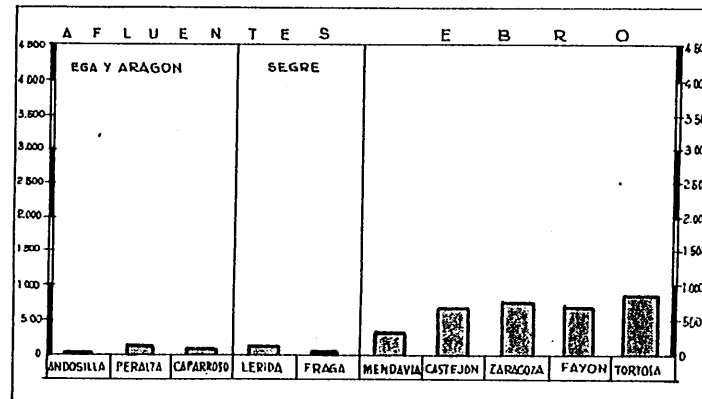


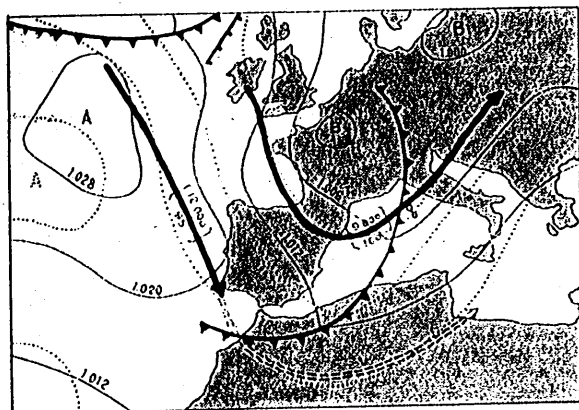
GRAFICO DE AFOROS

DIA 21

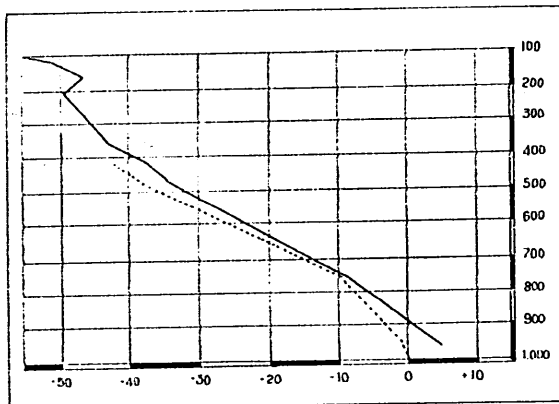
SITUACION METEOROLOGICA

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

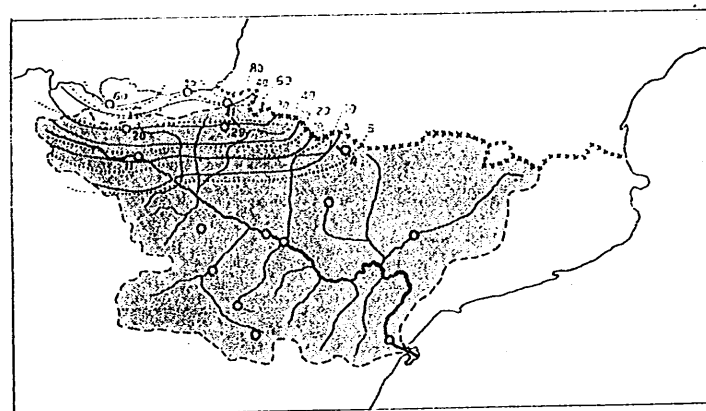
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



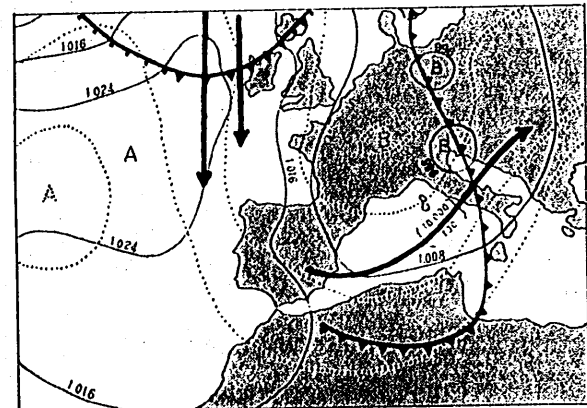
0 horas



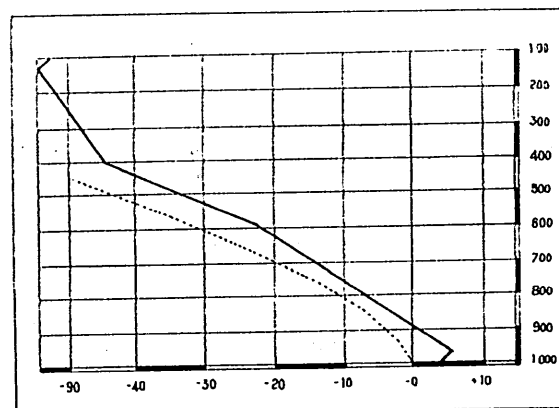
0 horas



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



12 horas

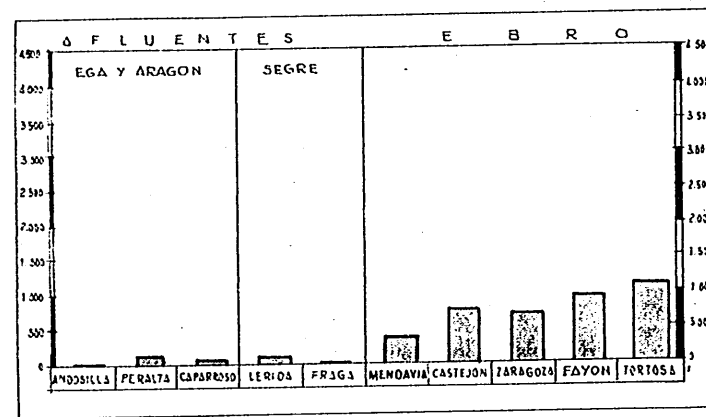
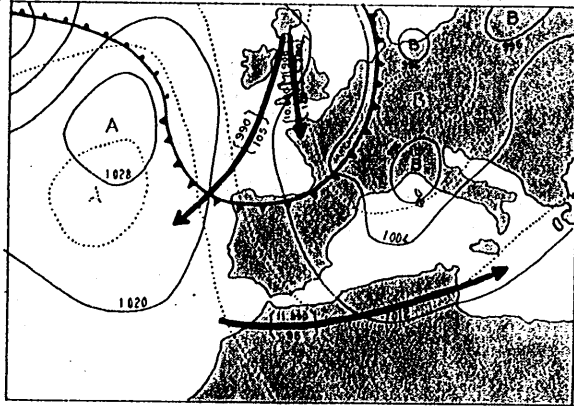


GRAFICO DE AFOROS

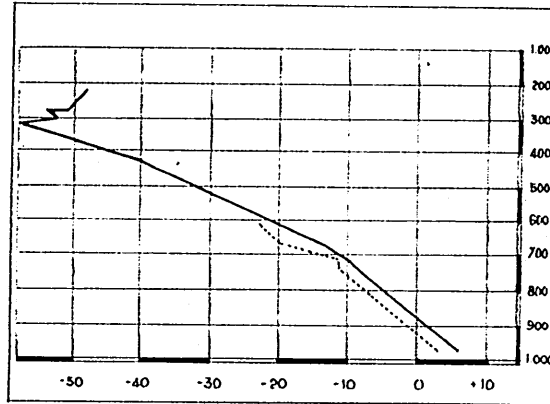
DIA 22

SITUACION METEOROLOGICA



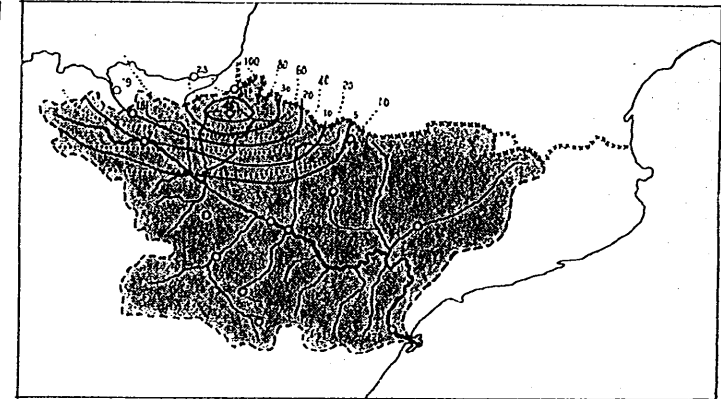
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA

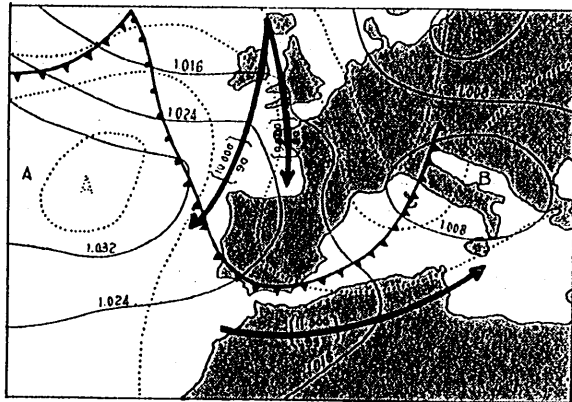


día 21 a los 23 horas

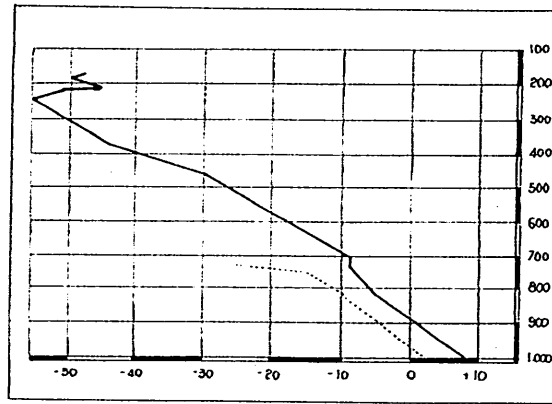
PRECIPITACION EN LA CUENCA DE EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



0 horas



11 horas

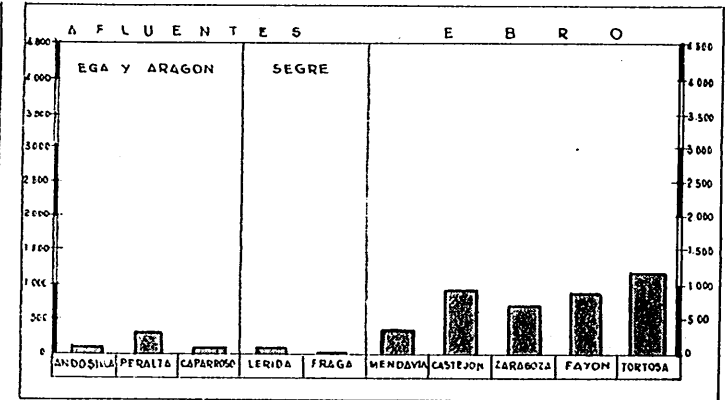


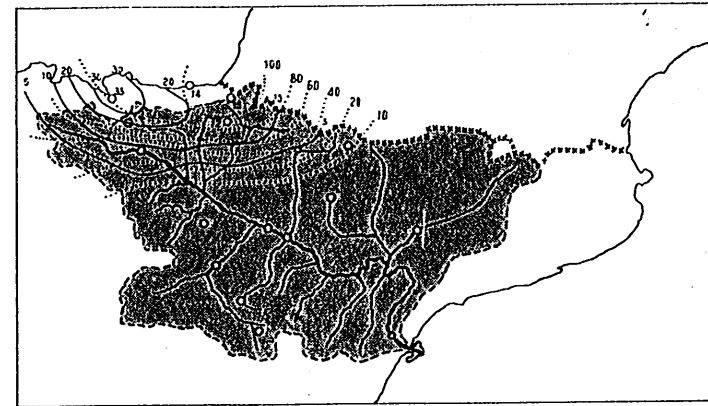
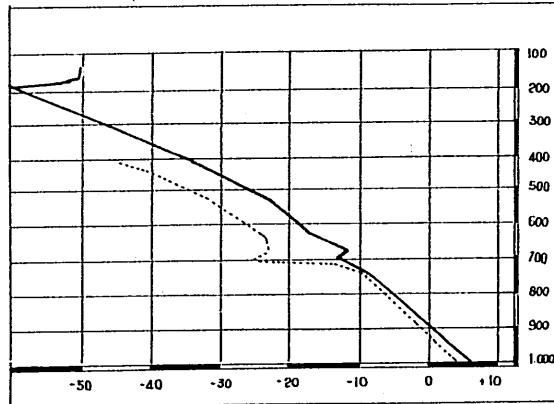
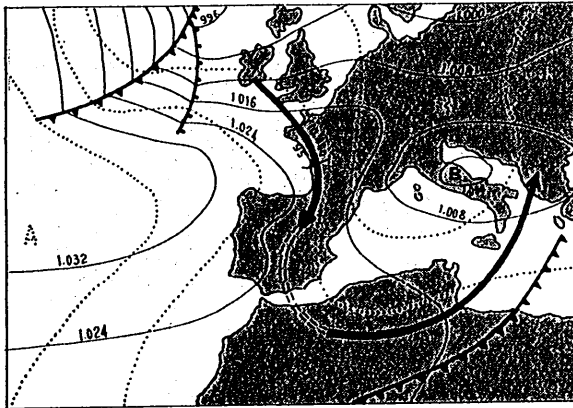
GRAFICO DE AFOROS

DIA 23

SITUACION METEOROLOGICA

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA

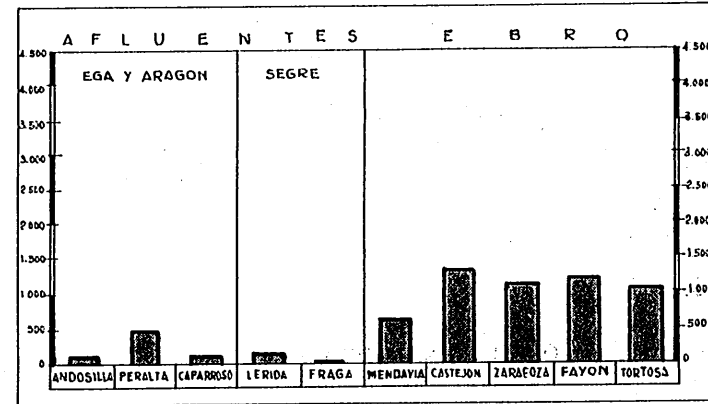
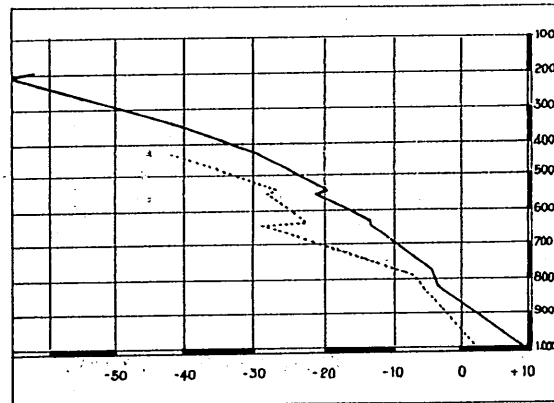
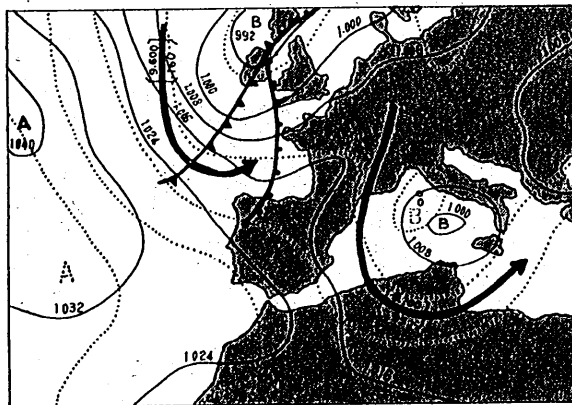
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



0 horas

0 horas

— Isoyetas diarias acumuladas



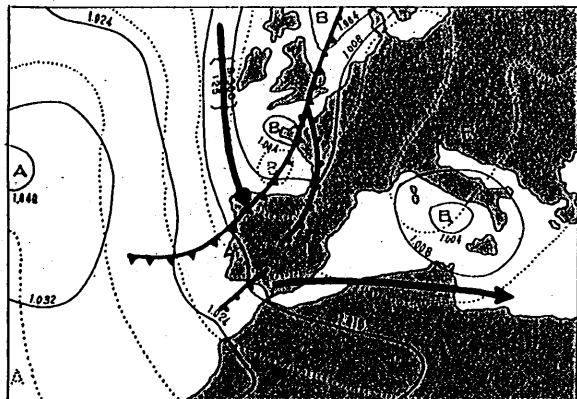
12 horas

12 horas

GRAFICO DE AFOROS

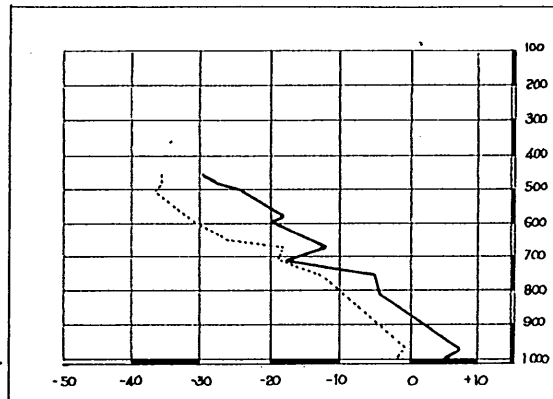
DIA 24

SITUACION METEOROLOGICA



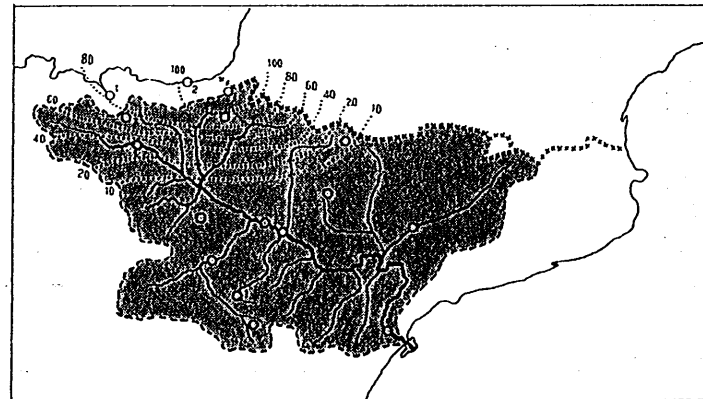
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA



0 horas

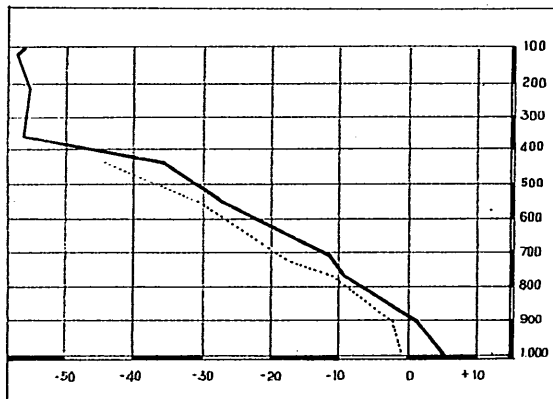
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



12 horas

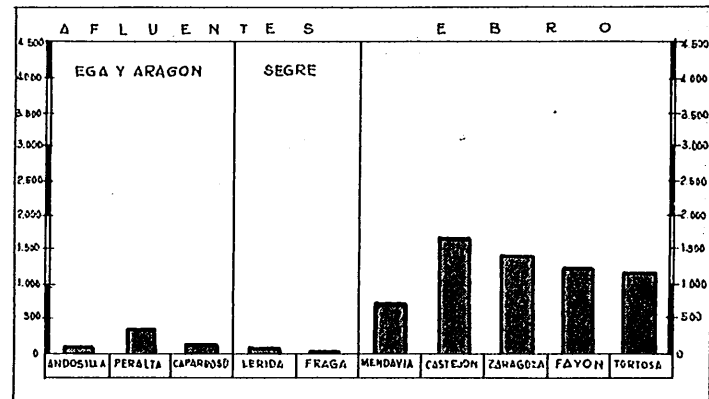
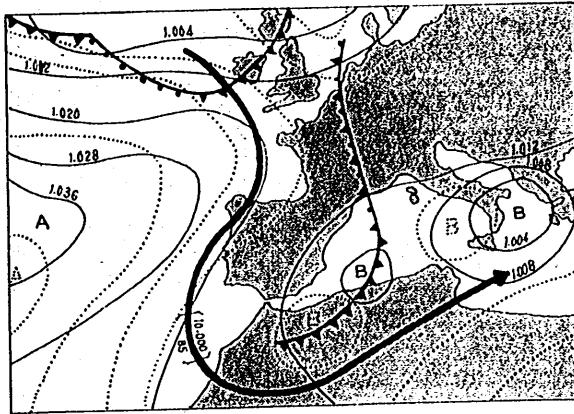


GRAFICO DE AFOROS

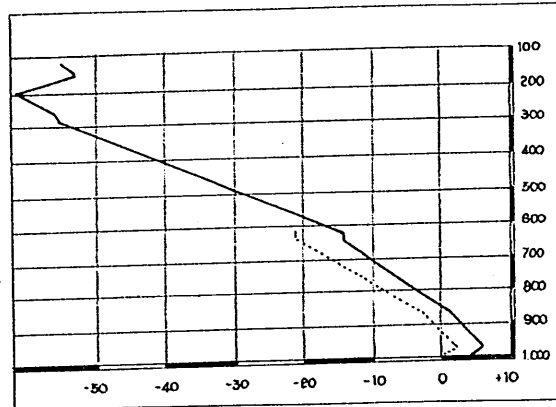
DIA 25

SITUACION METEOROLOGICA



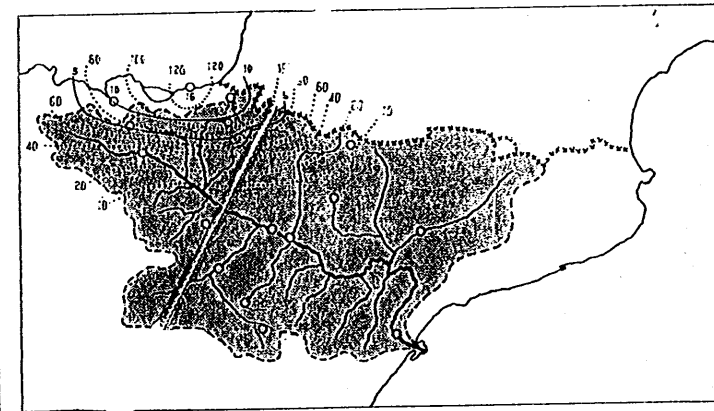
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA



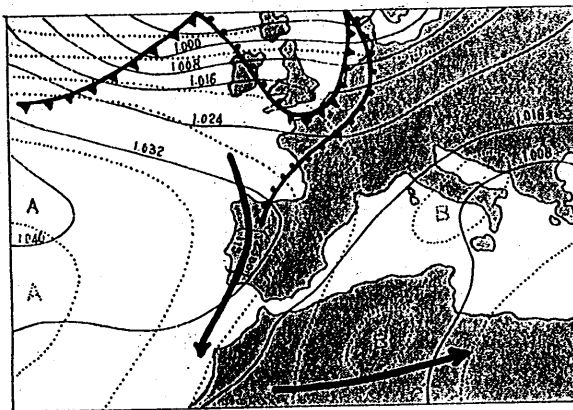
0 horas

PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO

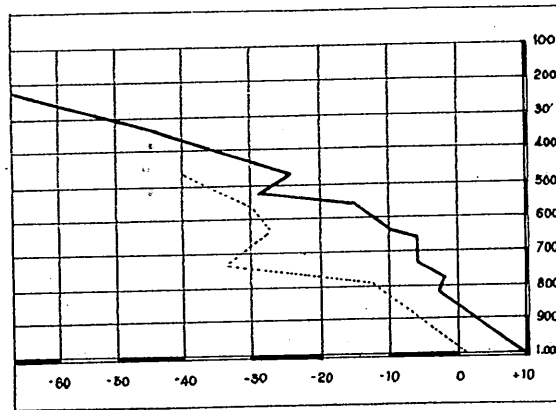


— Isoyetas diarias

..... acumuladas



12 horas



12 horas

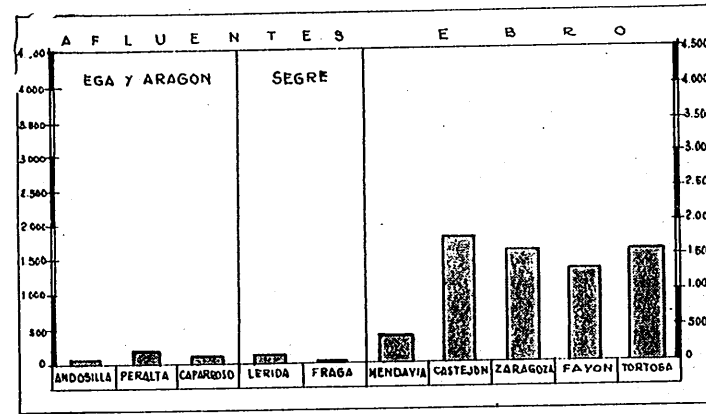
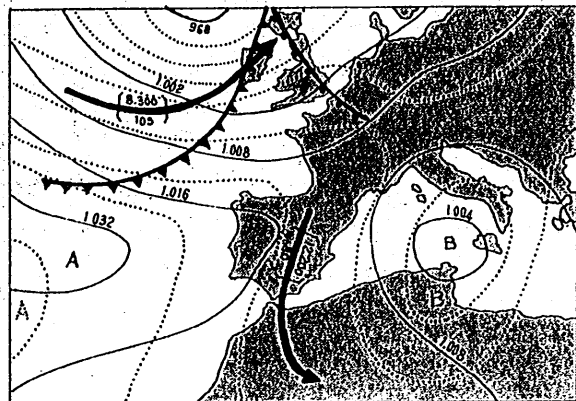


GRAFICO DE AFOROS

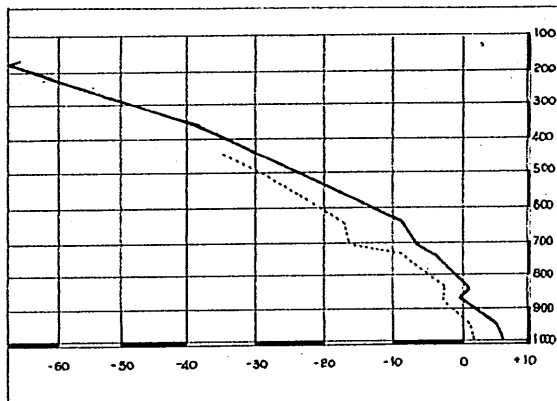
DIA 26

SITUACION METEOROLOGICA



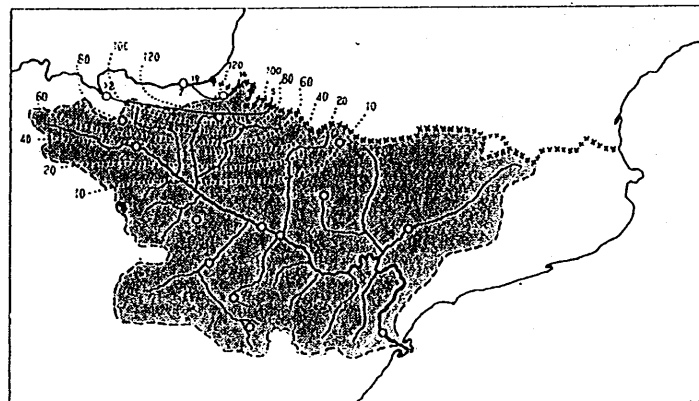
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

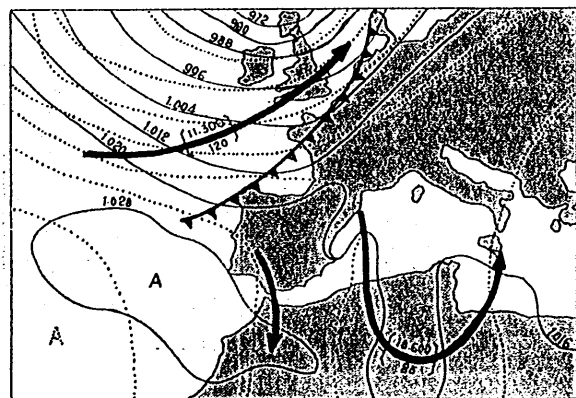


dia 25 a las 23 horas

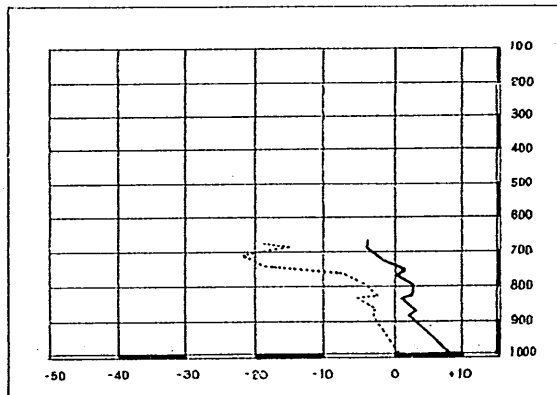
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



11 horas

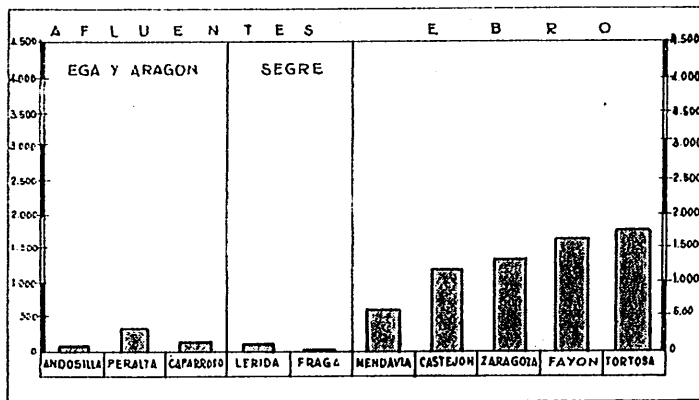


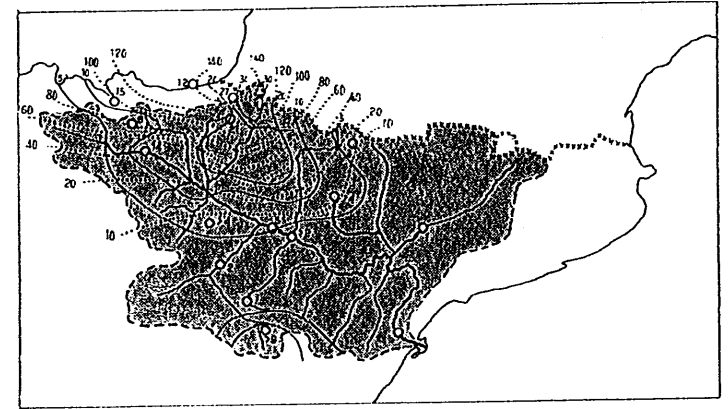
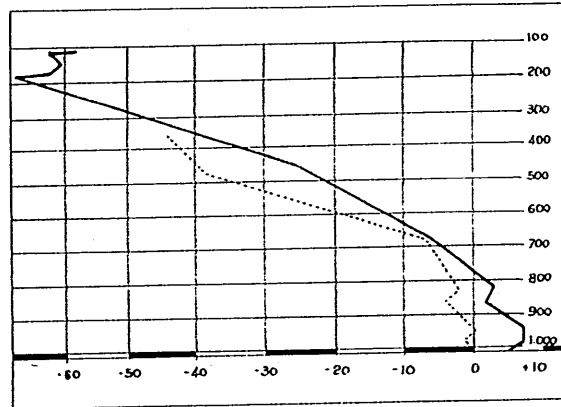
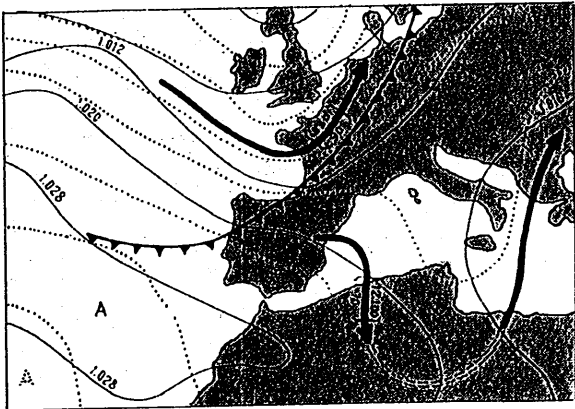
GRAFICO DE AFOROS

DIA 27

SITUACION METEOROLOGICA

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

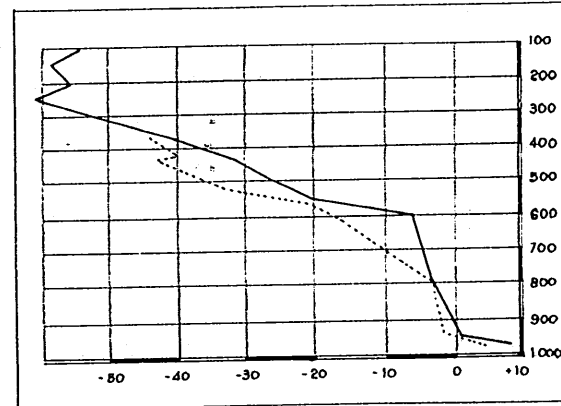
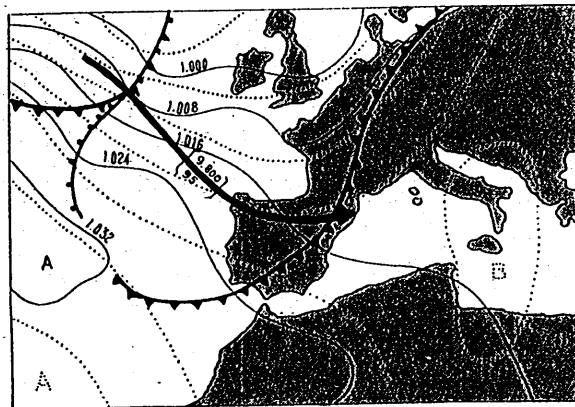
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



0 horas

0 horas

— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas

12 horas

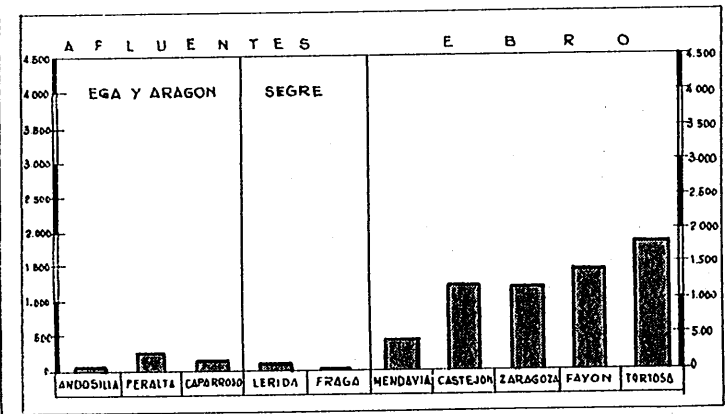


GRAFICO DE AFOROS

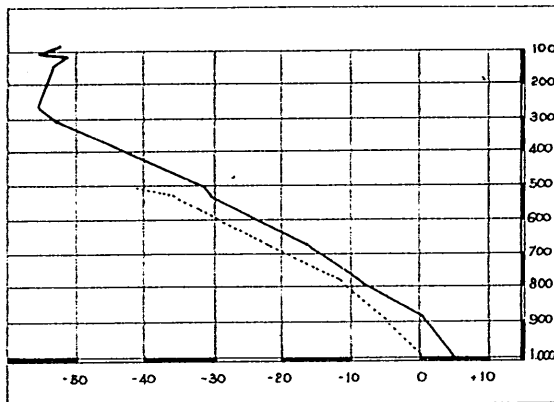
DIA 28

SITUACION METEOROLOGICA



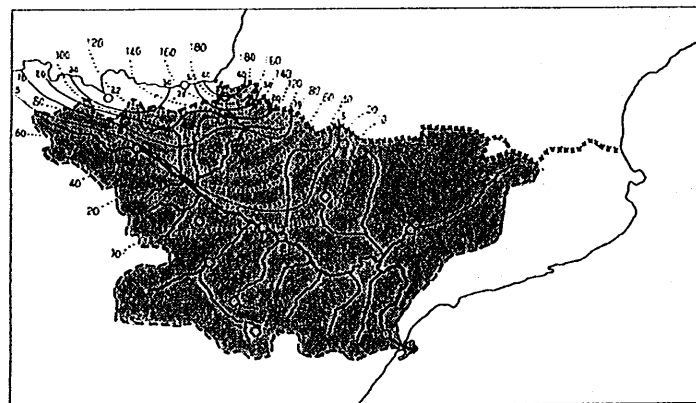
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

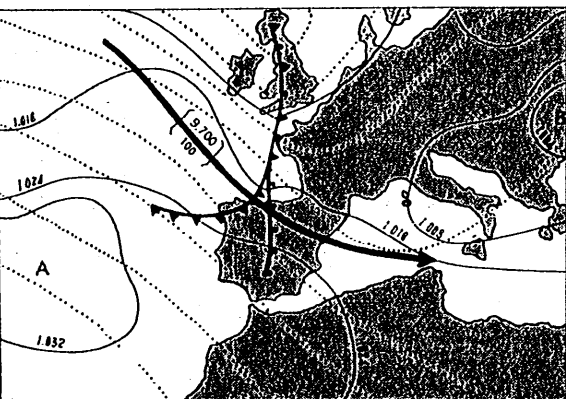


dia 27 a las 23 horas

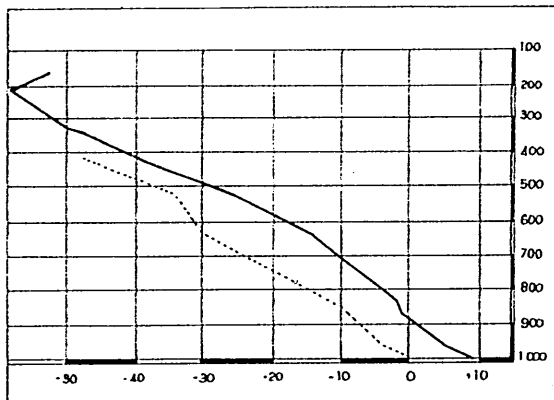
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



11 horas

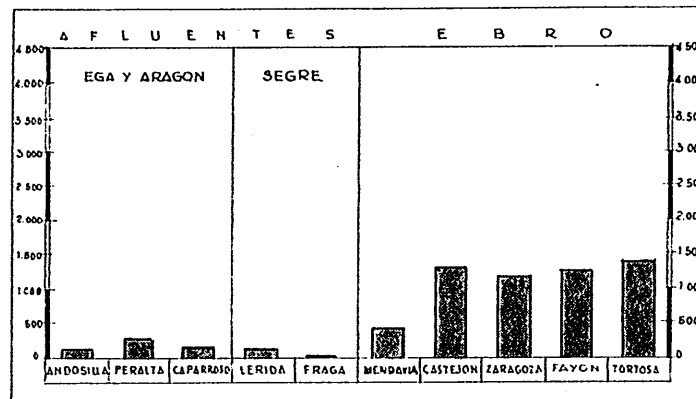
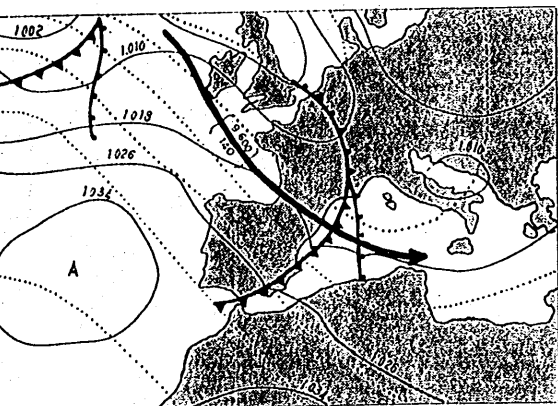


GRAFICO DE AFOROS

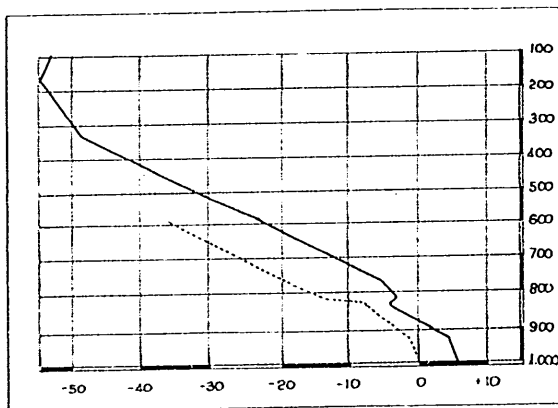
DIA 29

SITUACION METEOROLOGICA



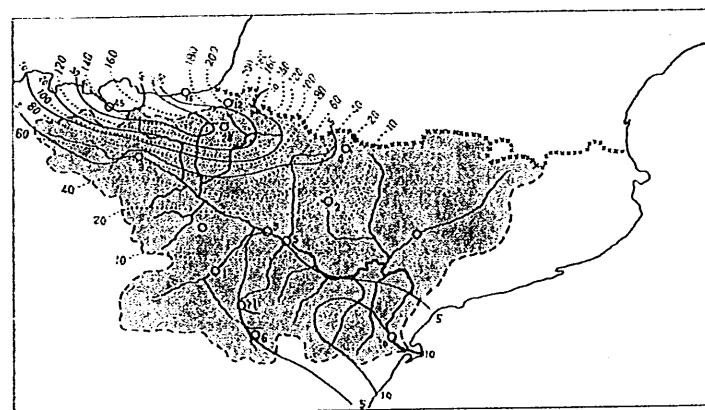
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA



0 horas

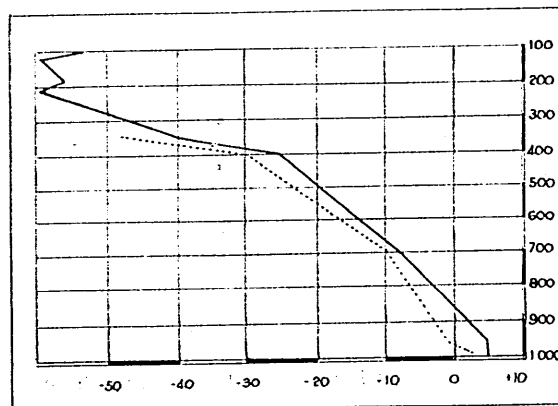
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



12 horas

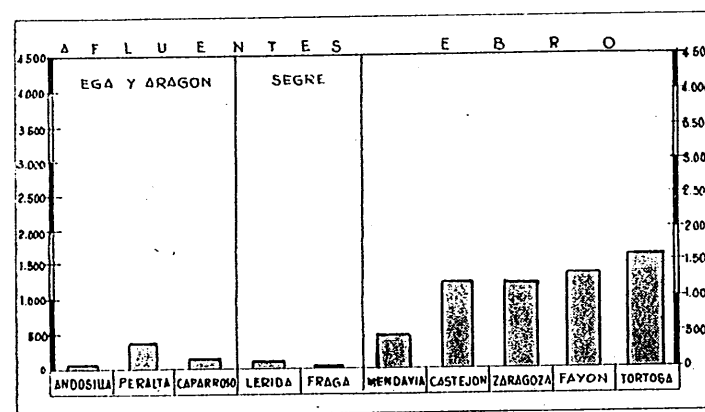
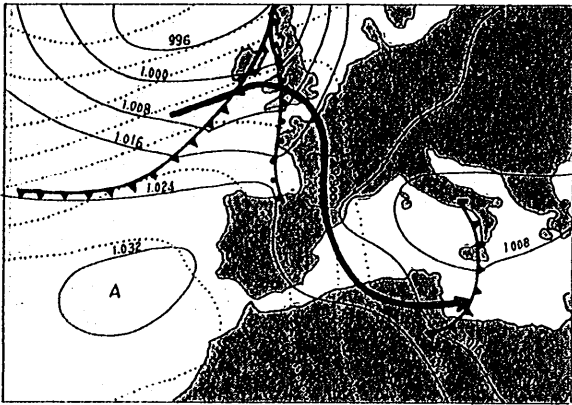


GRAFICO DE AFOROS

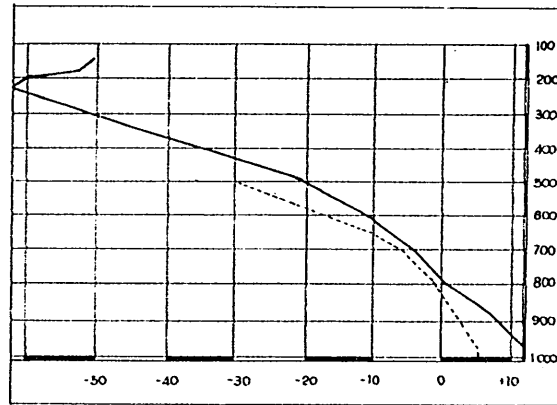
DIA 30

SITUACION METEOROLOGICA



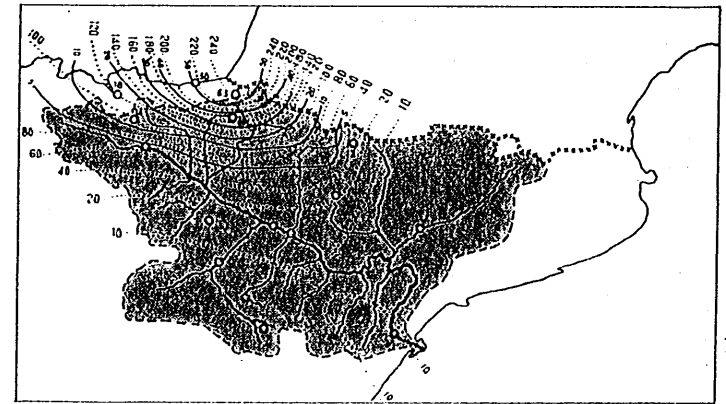
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA



dia 29 a las 23 horas

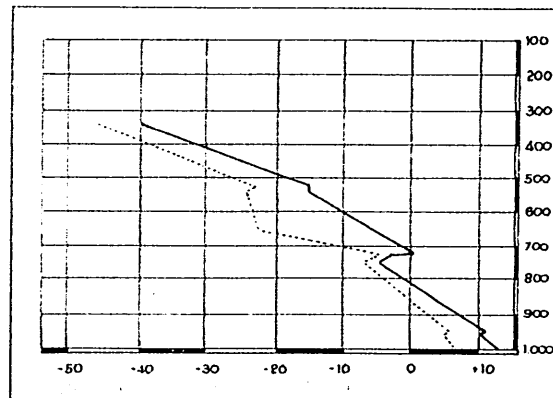
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



11 horas

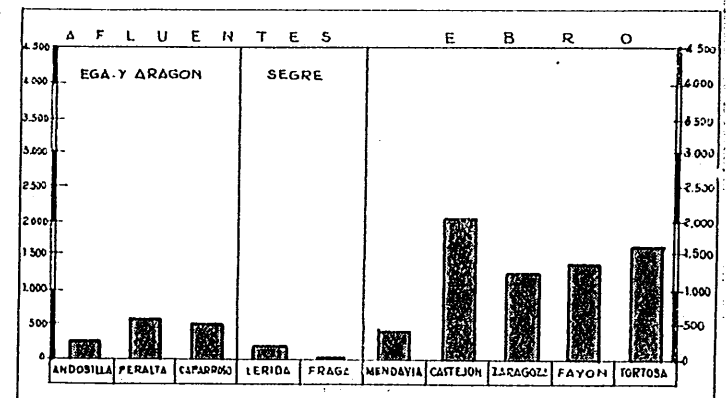
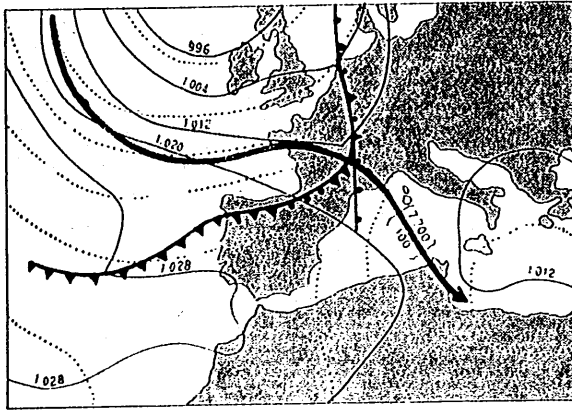


GRAFICO DE AFOROS

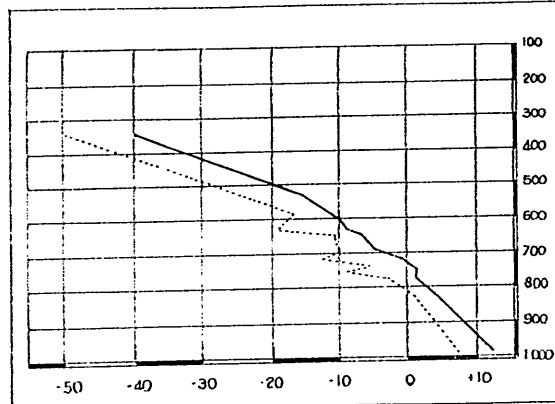
DIA 31

SITUACION METEOROLOGICA



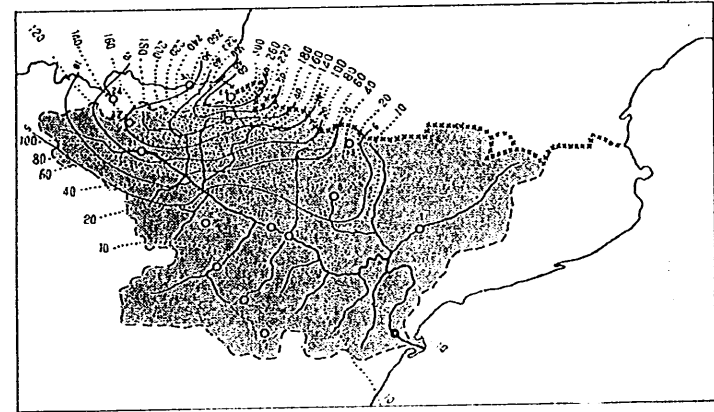
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA



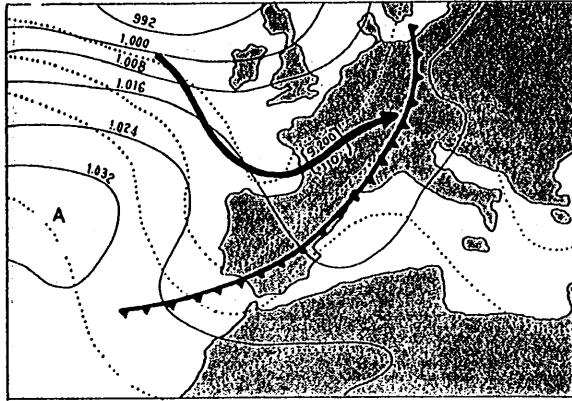
dia 30 a las 23 horas

PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



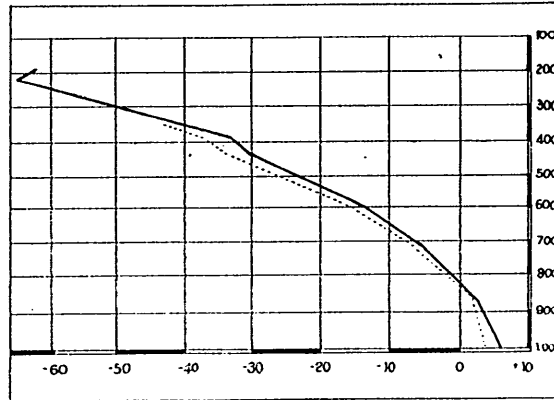
DIA 1

SITUACION METEOROLOGICA



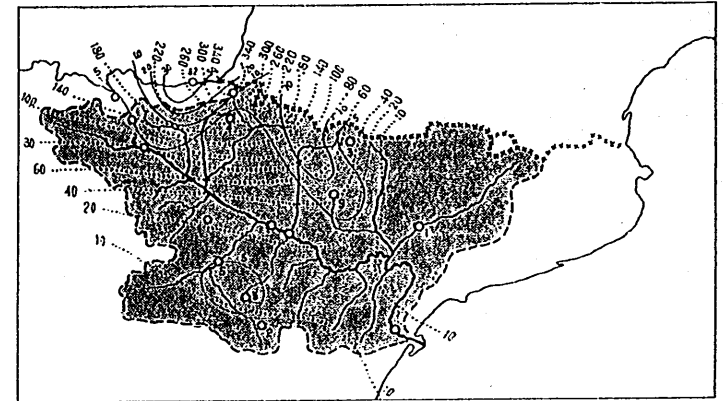
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

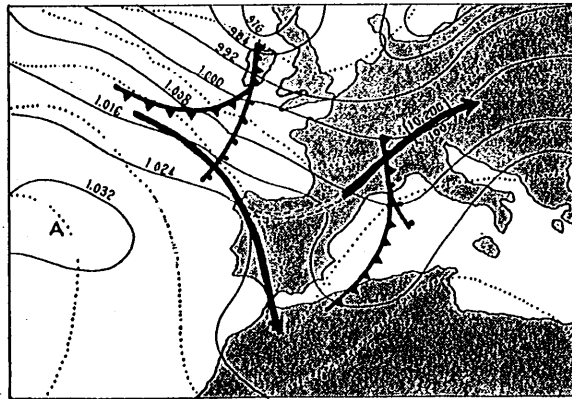


dia 30 a las 23 horas

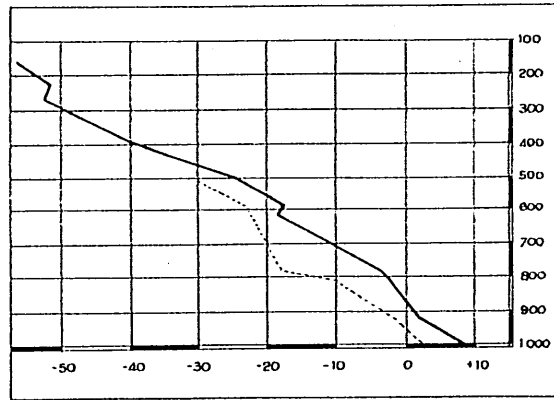
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias - - - - - acumuladas



12 horas



11 horas

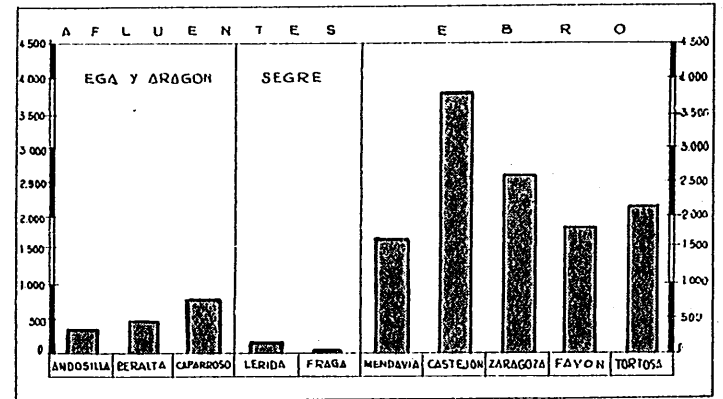
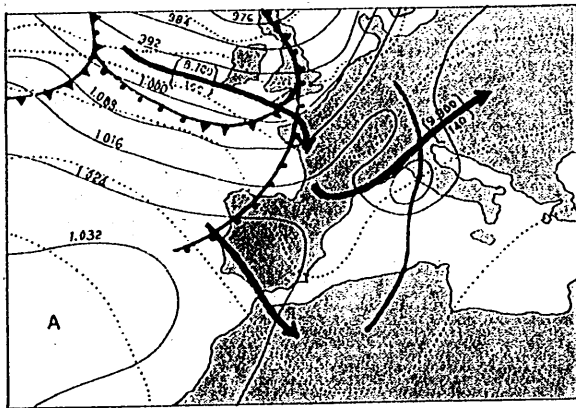


GRAFICO DE AFOROS

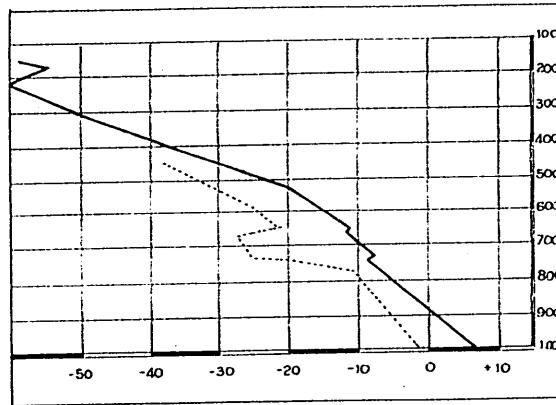
DIA 2

SITUACION METEOROLOGICA



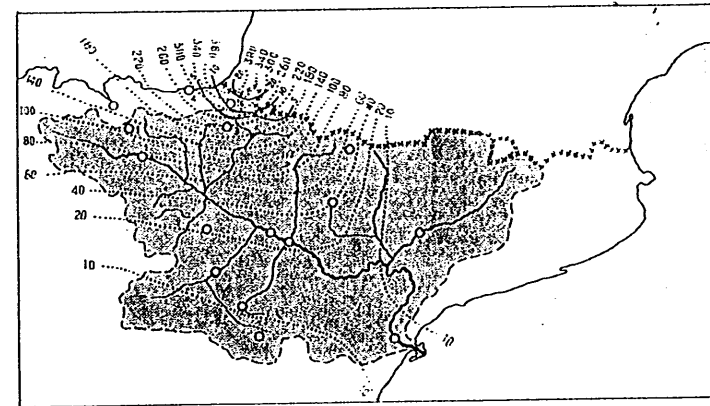
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA



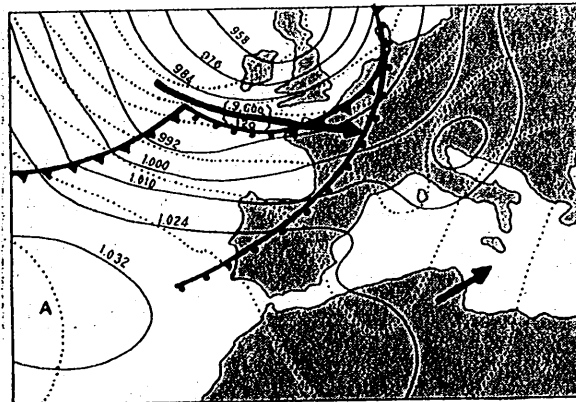
0 horas

PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO

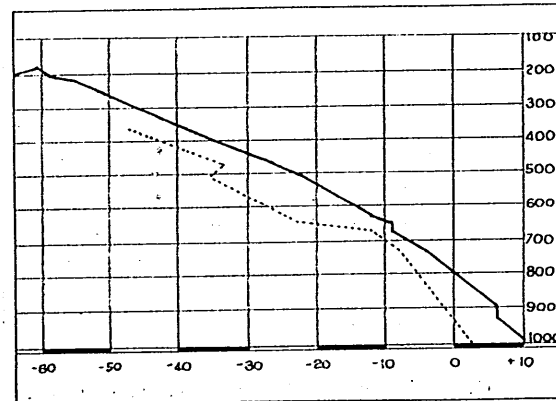


— Isoyetas diarias

..... acumuladas



12 horas



12 horas

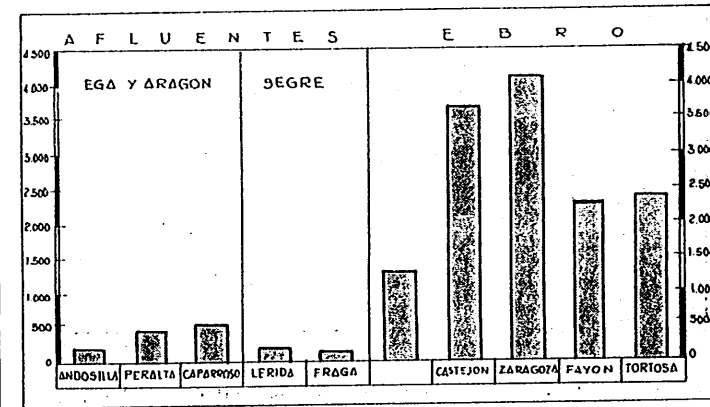
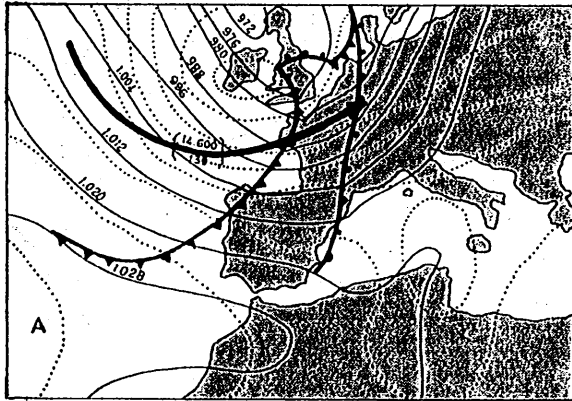


GRAFICO DE AFOROS

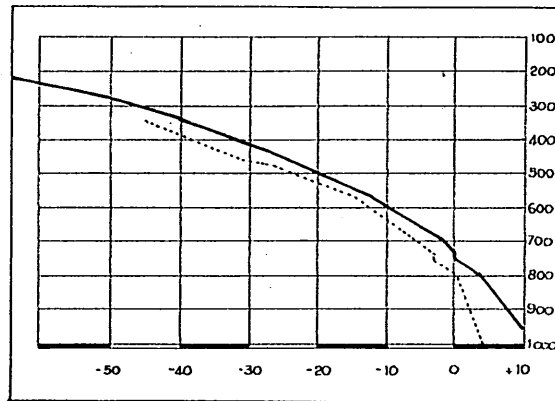
DIA 3

SITUACION METEOROLOGICA



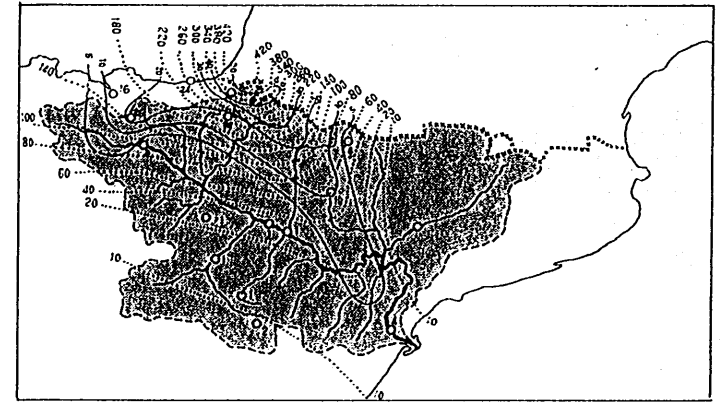
0 horas

SONDEO TERMODINAMICO DE ZARAGOZA

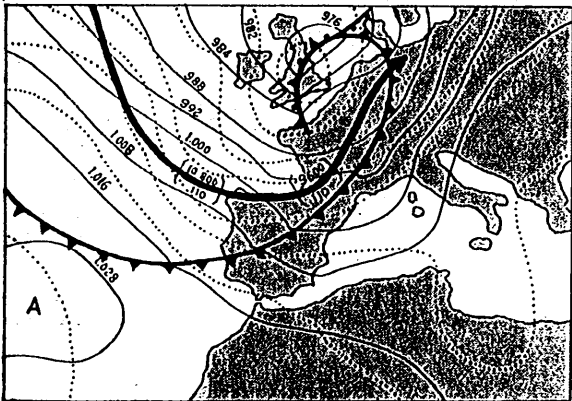


dia 2 a las 23 horas

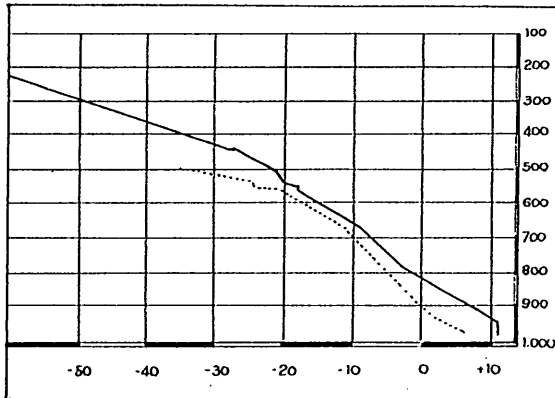
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



11 horas

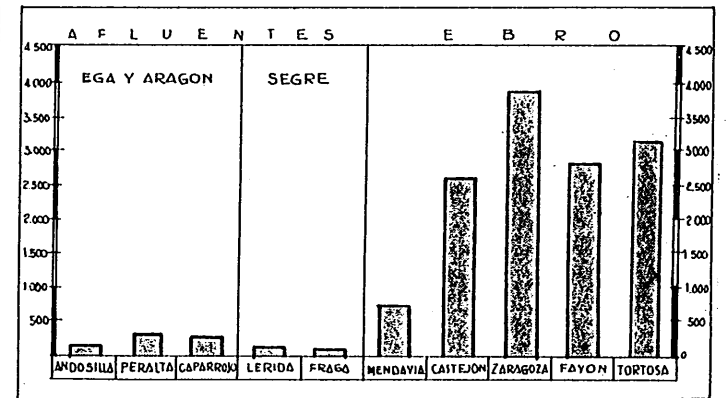
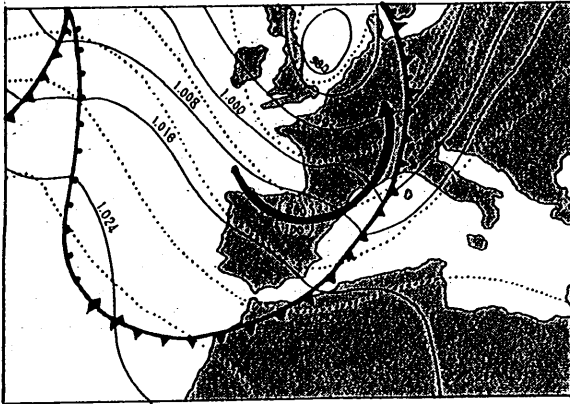


GRAFICO DE AFOROS

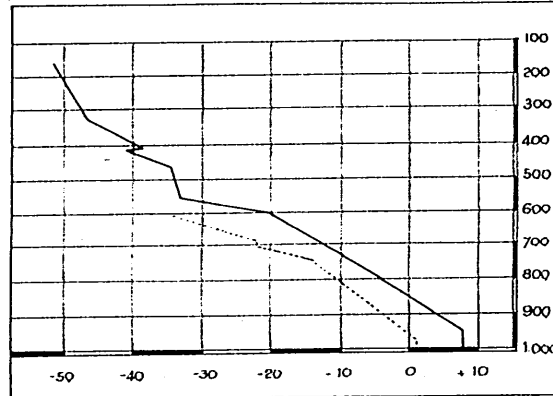
DIA 4

SITUACION METEOROLOGICA



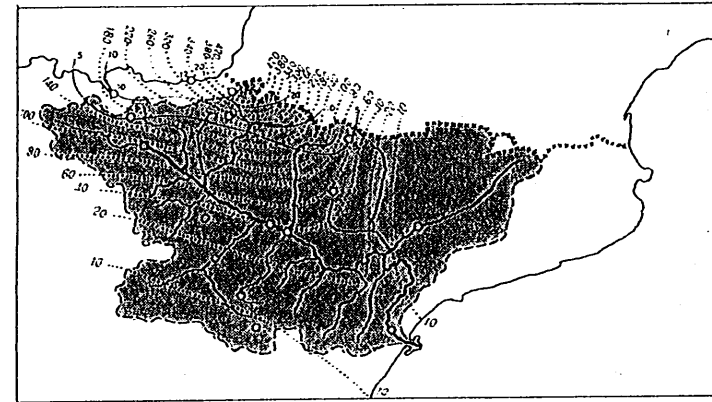
0 horas

SONDEO TERMODYNAMICO DE ZARAGOZA

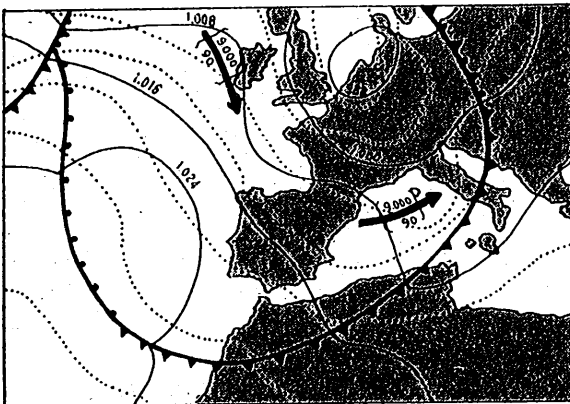


0 horas

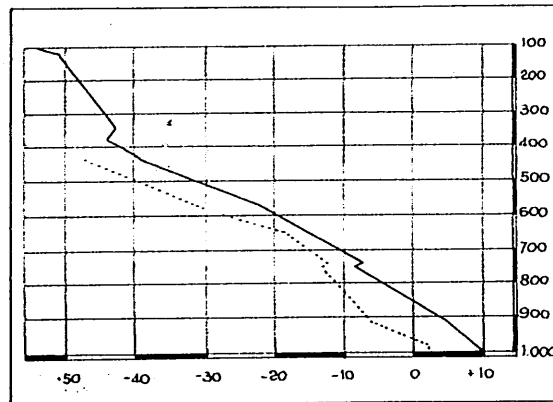
PRECIPITACION EN LA CUENCA DEL EBRO



— Isoyetas diarias acumuladas



12 horas



12 horas

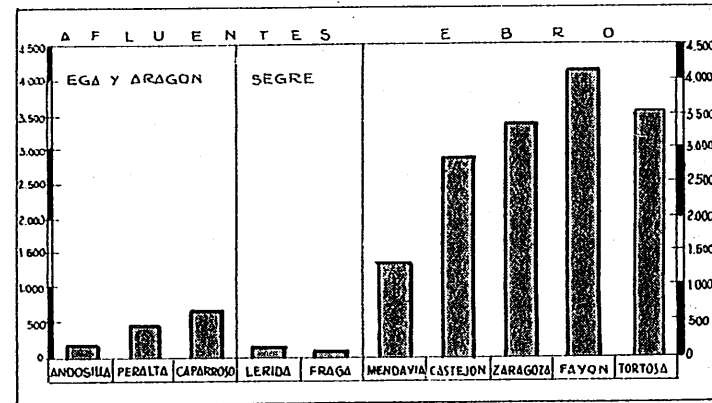


GRAFICO DE AFOROS