

ESTUDIO Y PREDICCIÓN DE AVENIDAS

Ing. C. C. P. J. M.^o FLUXA

Dr. C. Físicas J. CASTEJON

Las corrientes fluviales constituyen para el ingeniero un fascinante campo de actuación por la cantidad de problemas que una utilización integral óptima de sus recursos necesita resolver. Esta utilización implica la elección de un tipo de aprovechamiento o de una forma de explotación entre el elenco de posibilidades que se ofrece, cada una de ellas con sus peculiares economías externas que inciden en el producto nacional.

Por ello es lógico que los técnicos se afanen en conseguir la simulación cuantitativa del río bajo la mayor cantidad de aspectos posible, construyendo modelos de la realidad que permitan con suficiente agilidad el estudio de proyectos y explotaciones.

En el caso de nuestro suelo puede aparecer aún más clara la justificación de la utilidad de estos modelos por la adversidad del medio: escasez clara de recursos y extrema irregularidad de ellos en el tiempo, que obligan a numerosos tanteos para aproximarse a la utilización óptima.

La Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL), en el seno de sus Comisiones, ha promovido al estudio de las avenidas desde distintos puntos de vista: por una parte, el estudio del paso de la crecida por el cauce del río, por medio de su simulación matemática; por otro lado, el funcionamiento de una red hidrometeorológica de alerta, con medición de precipitaciones y caudales, que permita decidir cuándo es preciso realizar la simulación de la avenida para diversos fines, y, por último, la predicción de precipitaciones, con el fin de procurar una ventaja muy interesante de tiempo antes de que pase el agua al cauce.

ASINEL, acogida a las normas de la Comisión Asesora de Investigaciones Científicas y Técnica, sin finalidad lucrativa realiza estos estudios en beneficio de sus Empresas asociadas, recabando al mismo tiempo su experiencia y ayuda como productoras de energía hidroeléctrica. Por el interés nacional de estos temas recibe subvenciones estatales.

Dos miembros de las distintas Comisiones presentan en este artículo la situación actual de los trabajos en este campo.

SIMULACION MATEMATICA DE LOS RIOS

La potencia que caracteriza a los modernos ordenadores electrónicos permite acometer la construcción y uso

de simuladores matemáticos de los aprovechamientos hidráulicos, que, si bien se basan en principios físicos clásicos (ecuaciones de continuidad, etc...), no cabe duda de que presentan rasgos característicos en la resolución de los problemas. **27**

Planteamiento y resolución general del problema.

En la elección de los tipos de aprovechamiento hidráulico interesa conocer cómo afectará al paso del agua la inclusión de distintas obras en el río, o simplemente estudiar los efectos (cotas de inundación) de avenidas en el cauce natural.

Cuando la zona de interés para el estudio es de extensión relativamente pequeña, el modelo reducido clásico se presenta como una herramienta inapreciable para resolver los problemas hidráulicos; pero, en cuanto el tramo de estudio alcanza un cierto tamaño, las dimensiones de la maqueta pueden llegar a ser inaceptables si quiere estudiarse el fenómeno con la adecuada precisión. Piénsese que un tramo de 200 Km. de longitud necesitaría una longitud mínima de 400 m. en la maqueta E¹/500, aun aceptando los inconvenientes inherentes a la distorsión de escalas vertical y horizontal.

El estudio de la lámina de agua en un cauce extenso por medio de su simulación matemática sobre un ordenador digital potente permite obtener resultados comparables técnicamente a los que daría el modelo reducido adecuado si pudiese construirse, pero con costes muy inferiores.

Un simulador matemático de esta clase irá dando la evolución de la lámina de agua con el tiempo, definida por la velocidad y cota superficial, en cuantas secciones del cauce se deseen.

Para ello dispone: a) de un esquema de cálculo que analiza el paso de la corriente sometida a las leyes clásicas de la hidráulica; b) de la definición topográfica del río, con geometría de las secciones, perfil longitudinal, zonas inundables, etc..., y c) de la definición hidrológica del cauce: coeficientes de rugosidad, pérdidas localizadas, desagües por aliviaderos, etc. Introduciendo aguas arriba una variación de caudales cualquiera en función del tiempo, definida por su hidrograma, se obtiene la propagación del régimen no estacionario a lo largo del río, teniendo en cuenta el efecto de posibles afluentes y la explotación que se haga de las obras que encuentra en

su camino. Esta simulación matemática del fenómeno, que ofrece características tan parecidas a las que da un modelo reducido, puede llamarse con toda propiedad modelo matemático del río.

Bases y proceso de cálculo.

El proceso por medio del cual el ordenador calcula en cada instante la línea de agua, consiste en la aplicación de las ecuaciones de continuidad y dinámica al movimiento del agua en el cauce, para lo que se aplica un método de resolución por diferencias finitas de estas ecuaciones en derivadas parciales.

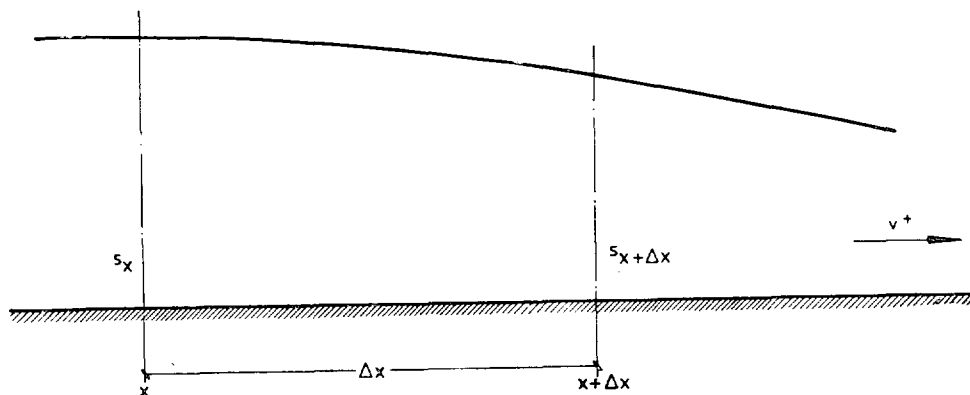


Figura 1.^a

Figure 1.

Sean en la sección x del río, instante t (fig. 1.^a):

- $y(x, t)$ = cota de la superficie de la lámina de agua;
- $v(x, t)$ = velocidad del movimiento;
- $s(x, t)$ = sección mojada;
- $k(x, t)$ = coeficiente de resistencia, por rugosidad, y
- $b(x, t)$ = ancho de la superficie del agua.

Para deducir la ecuación de la continuidad, en el instante t el volumen comprendido entre las secciones x y $x + \Delta x$ vale:

$$V = \frac{1}{2} \Delta x [s(x, t) + s(x + \Delta x, t)]. \quad [1]$$

En el instante $t + \Delta t$, el volumen análogo valdrá:

$$V + \Delta V = \frac{1}{2} \Delta x [s(x, t + \Delta t) + s(x + \Delta x, t + \Delta t)]. \quad [2]$$

Por otra parte, debe ser:

$$\Delta V = \frac{1}{2} \Delta t [s(x, t) \cdot v(x, t) + s(x + \Delta x, t) \cdot v(x + \Delta x, t) + s(x, t + \Delta t) \cdot v(x, t + \Delta t) - s(x + \Delta x, t + \Delta t) \cdot v(x + \Delta x, t + \Delta t)]. \quad [3]$$

Haciendo (2) - (1) = (3) y pasando al límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$, queda:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial (s \cdot v)}{\partial x} = 0,$$

ecuación de la continuidad que, teniendo en cuenta:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} = b \frac{\partial y}{\partial t},$$

puede ponerse en la forma:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial (s \cdot v)}{\partial x} = 0.$$

Para determinar la ecuación dinámica del movimiento se evalúa la energía $H(x, t)$, que posee una sección de agua de abscisa x en el instante t , y la $H(x + v \cdot \Delta t, t + \Delta t)$ que tendrá la misma sección de agua Δt después, cuando haya recorrido un camino $v \cdot \Delta t$:

$$H(x + v \cdot \Delta t, t + \Delta t) - H(x, t) = \Delta H = i \cdot v \cdot \Delta t; \quad [4]$$

en que i es la pendiente motriz.

Esta pendiente motriz se desglosa en dos términos:

$$i_1 = -k v \cdot |v| \text{ por rozamientos } (k > 0), \text{ e}$$

$$i_2 = \frac{-y(x, t) + y(x, t + \Delta t) - y(x + v \cdot \Delta t, t) + y(x + v \cdot \Delta t, t + \Delta t)}{2 v \cdot \Delta t}$$

por pérdida de altura en el tiempo.

Sustituyendo el valor de i en la expresión (4), puesta en la forma:

$$i = \frac{\Delta H}{v \cdot \Delta t} = \frac{H(x + v \cdot \Delta t, t + \Delta t) - H(x + v \cdot \Delta t, t)}{v \cdot \Delta t} + \frac{H(x + v \cdot \Delta t, t) - H(x, t)}{v \cdot \Delta t}$$

y pasando al límite cuando $\Delta x \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$ queda la ecuación dinámica en la forma:

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[y + \frac{v^2}{2g} \right] + k v \cdot |v| = 0.$$

En resumen, la velocidad y el calado en cada punto del río, en función del tiempo, pueden encontrarse por la integración del sistema en derivadas parciales:

$$b \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial (sv)}{\partial x} = 0; \quad [5]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + \epsilon \cdot k \cdot g \cdot v^2 = 0 \quad [6]$$

Con $\epsilon = +1$ si $v > 0$ y $\epsilon = -1$ si $v < 0$, que equivale a una ecuación hiperbólica, no lineal, de segundo grado en derivadas parciales.

Para su resolución en el ordenador se ha utilizado el siguiente esquema en diferencias finitas:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \frac{\varphi(x, t + \Delta t) + \varphi(x + \Delta x, t + \Delta t)}{2} - \frac{1}{\Delta t} \frac{\varphi(x, t) + \varphi(x + \Delta x, t)}{2}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{0,75}{\Delta x} [\varphi(x + \Delta x, t + \Delta t) - \varphi(x, t + \Delta t)] + \frac{0,25}{\Delta x} [\varphi(x + \Delta x, t) - \varphi(x, t)]$$

$$2 \cdot \varphi = 0,75 [\varphi(x, t + \Delta t) + \varphi(x + \Delta x, t + \Delta t)] + 0,25 [\varphi(x, t) + \varphi(x + \Delta x, t)].$$

Con los valores 0,75 y 0,25, el ordenador ha dado soluciones convergentes en los pasos sucesivos.

Entrando en las dos ecuaciones (5) y (6) del movimiento, se encuentran, para cada dos secciones consecutivas en que se divida el tramo del río, las dos ecuaciones lineales:

$$A_1 \Delta y(x, t) + A_2 \Delta y(x + \Delta x, t) + A_3 \Delta v(x, t) + A_4 \Delta v(x + \Delta x, t) + A_5 = 0;$$

$$A'_1 \Delta y(x, t) + A'_2 \Delta y(x + \Delta x, t) + A'_3 \Delta v(x, t) + A'_4 \Delta v(x + \Delta x, t) + A'_5 = 0.$$

entre las cuatro incógnitas incremento de calado (Δy) e incremento de velocidad (Δv), en las secciones de abscisas x y $x + \Delta x$, en el paso de instante t al $t + \Delta t$.

Los coeficientes $A_1 \dots A_5$ valen:

$$A_1 = \frac{b(x, t) + b(x + \Delta x, t)}{4 \Delta t} - 0,75 \cdot v(x, t) \cdot b(x, t);$$

$$A_2 = \frac{b(x, t) + b(x + \Delta x, t)}{4 \Delta t} + 0,75 \cdot v(x + \Delta x, t) \cdot b(x + \Delta x, t);$$

$$A_3 = \frac{-s(x, t)}{\Delta x} \cdot 0,75; \quad A_4 = \frac{s(x + \Delta x, t)}{\Delta x} \cdot 0,75;$$

$$A_5 = \frac{s(x + \Delta x, t) \cdot v(x + \Delta x, t) - s(x, t) \cdot v(x, t)}{\Delta x};$$

$$A'_1 = -A'_2 = -\frac{g \cdot 0,75}{\Delta x};$$

$$A'_3 = \frac{1}{2 \Delta t} - \frac{0,75 v(x, t)}{\Delta x} + \epsilon \text{ Kg} \cdot 0,75 \frac{v(x, t) + v(x + \Delta x, t)}{2}$$

$$A'_4 = \frac{1}{2 \Delta t} + \frac{0,75 \cdot v(x + \Delta x, t)}{\Delta x} + \epsilon \text{ Kg} \cdot 0,75 \frac{v(x, t) + v(x + \Delta x, t)}{2};$$

$$A'_5 = \frac{v^2(x + \Delta x, t) - v^2(x, t)}{2 \Delta x} + g \frac{y(x + \Delta x, t) - y(x, t)}{\Delta x} + \epsilon \cdot \text{Kg} \cdot [v(x, t) + v(x + \Delta x, t)]^2.$$

Añadiendo las dos ecuaciones de límites (hidrograma en la primera sección aguas arriba y condiciones de desahúe, marea, etc., en la última sección aguas abajo) se tiene un sistema de $2N$ ecuaciones (si hay N secciones) con $2N$ incógnitas (incrementos de calado y velocidad en cada sección), que se resuelve para cada paso de tiempo Δt .

La ventaja de haber adoptado el esquema de diferencias finitas indicado más arriba, es la posibilidad de cambiar el paso del tiempo Δt en el programa, si en el desarrollo del cálculo apareciera procedente (por ejemplo: se puede aumentar si los pasos sucesivos muestran una variación muy lenta de la línea de agua), abreviando sustancialmente el tiempo de uso del ordenador, sin que aparezca nunca inestabilidad en la resolución del sistema, por otra parte.

En la programación de la resolución del sistema se ha aprovechado en gran manera el hecho de que la matriz del sistema es muy hueca. Es decir, se han procurado utilizar los abundantes artificios de cálculo simplificados que existen para esta clase de problemas.

El modelo construido por el Grupo de Trabajo ha probado ya su eficacia en diversos tipos de canales. En la actualidad se está construyendo el tramo medio-inferior del río Tajo. Interesa en especial deducir de él una apreciación de los valores que toma la rugosidad del cauce.

Probada la necesidad de un ordenador potente, la actual programación se ha hecho para el sistema IBM 360, con el lenguaje FORTRAN IV. Los datos topográficos (for-

ma del río) e hidrológicos (pérdidas de carga) se llevan a memorias auxiliares, acceso directo (discos), en forma de tablas; así se tienen las distintas áreas mojadas en función de una serie de calados, entre las que se puede interpolar, para cada sección.

Los datos de cada crecida (caudal aguas arriba en función del tiempo) se llevan a memorias de acceso secuencial, no directo (cintas y fichas).

En general, cuando en uno de estos simuladores se quiere probar el efecto de distintas avenidas basta cambiar un paquete de fichas por otro. Si lo que se quiere es probar el efecto de distintas obras (por ejemplo, diques) en el lecho, basta cambiar los datos conservados en el disco por las nuevas características. Estos modelos tienen también una clara aplicación cuando se quiere obtener la ex-

plotación más idónea de unas instalaciones ya existentes, sea en régimen excepcional (determinación de consignas a aliviaderos en caso de crecidas; sirve de complemento a un sistema pluviométrico de alerta instalado en la cuenca), o normal (producción de punta máxima en centrales solapadas fluyentes, en que el remanso tiene importancia al hacer perder altura de salto).

La parte más laboriosa en la construcción de estos modelos está en la fijación de los coeficientes hidrológicos del cauce: rugosidad, coeficientes de desagüe, etc. Debe hacerse por tanteos, ensayando en el modelo regímenes ya conocidos, si es posible permanentes, variando las características hasta obtener una buena reproducción de los datos observados.

En conclusión, el ordenador va presentando los valores

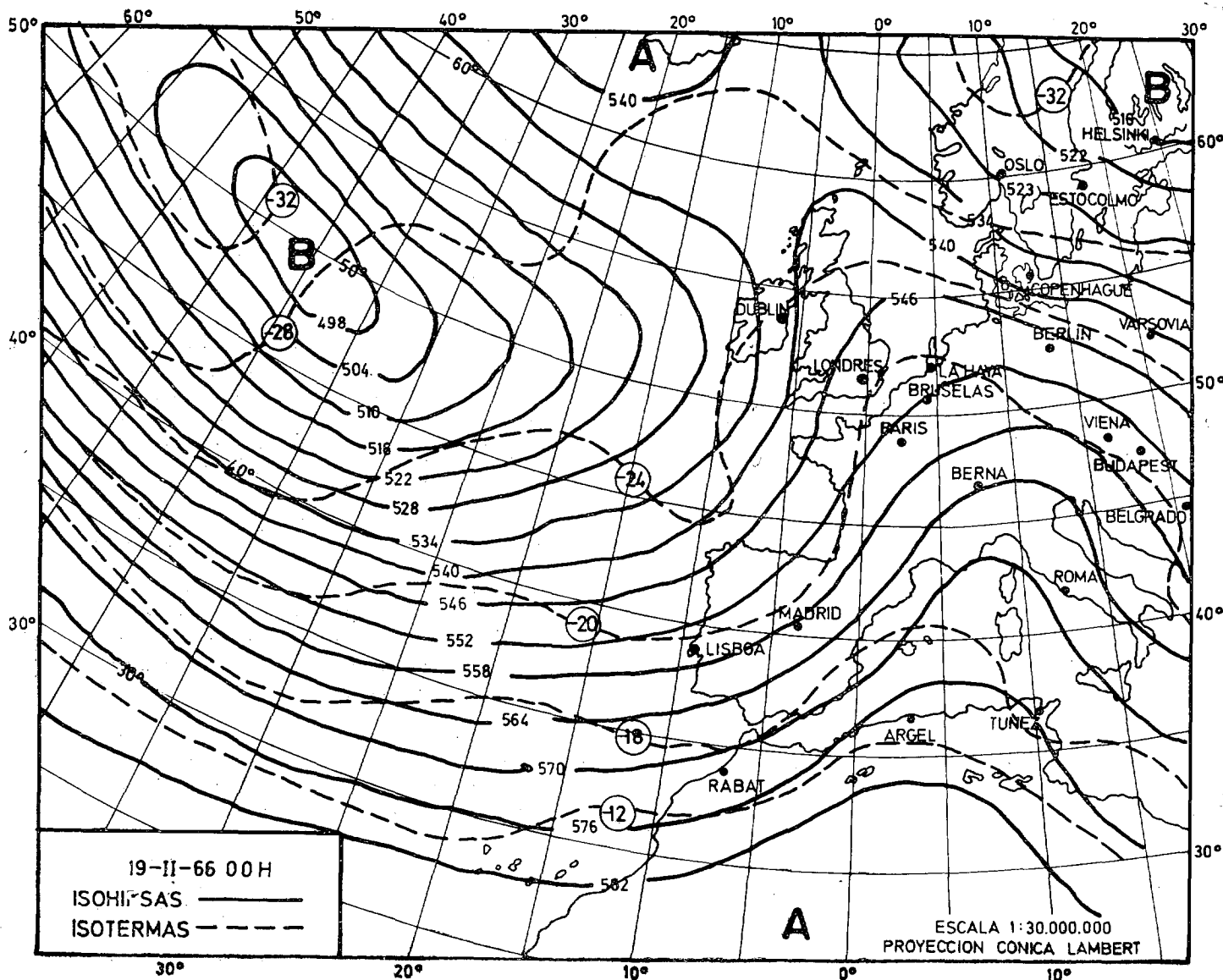


Figura 2.^a

de velocidad y calado en tantos puntos del río como se deseen para cada paso sucesivo del tiempo. Se puede tener en cuenta pérdidas localizadas de carga, inundaciones extensas con pendientes transversales apreciables en la corriente, etc., introduciendo algunas modificaciones en el cálculo. En cambio, en estudios de detalle, como paso por las pilas de un puente, restitución apropiada al cauce de aguas desviadas, ondas de Mach, etc., el modelo reducido sigue siendo una ayuda utilísima.

PREDICCIÓN EXPERIMENTAL CUANTITATIVA DE PRECIPITACIONES. METODO DEL ISOIN

Condiciones generales del fenómeno de precipitación.

La precipitación se produce en el seno de columnas de aire que experimentan un movimiento de ascenso de conjunto suficiente para producir, primero, la condensación del aire húmedo con formación de la nube, y luego, un desarrollo vertical suficiente de la nube (sea nimbostrato, cúmulonimbo o gran cúmulo) para asegurar que hay al menos una zona de la nube con cristales de hielo que coadyuve al crecimiento de las gotas de nube, mediante destilación del agua subfundida [1], transformándolas en gotas de lluvia con tamaño suficiente para caer.

Para que se produzcan estos movimientos ascendentes de conjunto es necesario que se produzcan condiciones dinámicas y condiciones termodinámicas, cuya exposición sería excesivamente extensa y compleja para el alcance de este artículo. Con respecto a las primeras y remitiéndonos a [2], diremos que la existencia de zonas de difluencia, entendido por tales zonas donde se separan las isohipsas de la topografía de 500 mb, como se aprecia en la figura 2.^a correspondiente a la topografía de 500 mb de 19 de febrero de 1966 a cero horas TMG donde hay una zona de difluencia del Suroeste sobre la Península Ibérica, o la proximidad de un centro de baja en 500 mb, son condiciones que aseguran la posibilidad y existencia de corrientes ascendentes de conjunto.

Con respecto a las condiciones termodinámicas y limitándonos fundamentalmente al caso de precipitaciones frontales o de inestabilidad general, podemos decir que puede determinarse mediante el examen de los radiosondeos de las distintas estaciones transcritos a un diagrama termodinámico, tal como el de Stüve, que presentamos esquemáticamente en la figura 3.^a. De la comparación de las leyes teóricas de variación de la temperatura y humedad en función de la presión con otras leyes teóricas de variación para casos ideales de aire seco y aire saturado de humedad expansionados adiabáticamente; es decir, sin intercambiar calor con el resto de la atmósfera; pueden deducirse criterios de estabilidad o inestabilidad condicional o convectiva del aire. Un estudio de este tipo requiere tiempo y presenta la dificultad de no poder definir un índice simple que se pueda intentar correlacionar con precipitaciones reales observadas.

Si consideramos que las curvas de estado de los sondeos típicos de sistemas frontales o de zonas próximas pueden asimilarse, en primera aproximación, a adiabáticas húmedas con curvas de punto de rocío-presión casi coincidentes con la curva de estado, nos daremos cuenta que cualquier incremento en el punto de rocío en superficie, como el que puede experimentar una masa de aire ártico con un recorrido marítimo suficiente, equivale a un aumento de la inestabilidad de la columna. Igualmente, cualquier disminución de temperatura en un nivel medio tal como el de 500 mb., como el que puede experimentar una masa de aire con una cizalladura vertical de velocidad de viento adecuada, equivale a un aumento de la inestabilidad de la columna.

Por este motivo hemos definido como índice empírico representativo de la higrolabilidad del aire la diferencia entre el punto de rocío al nivel del mar y la temperatura de 500 mb., dando a este índice el nombre de Isoin (igual inestabilidad), aunque no reúna las condiciones teóricas

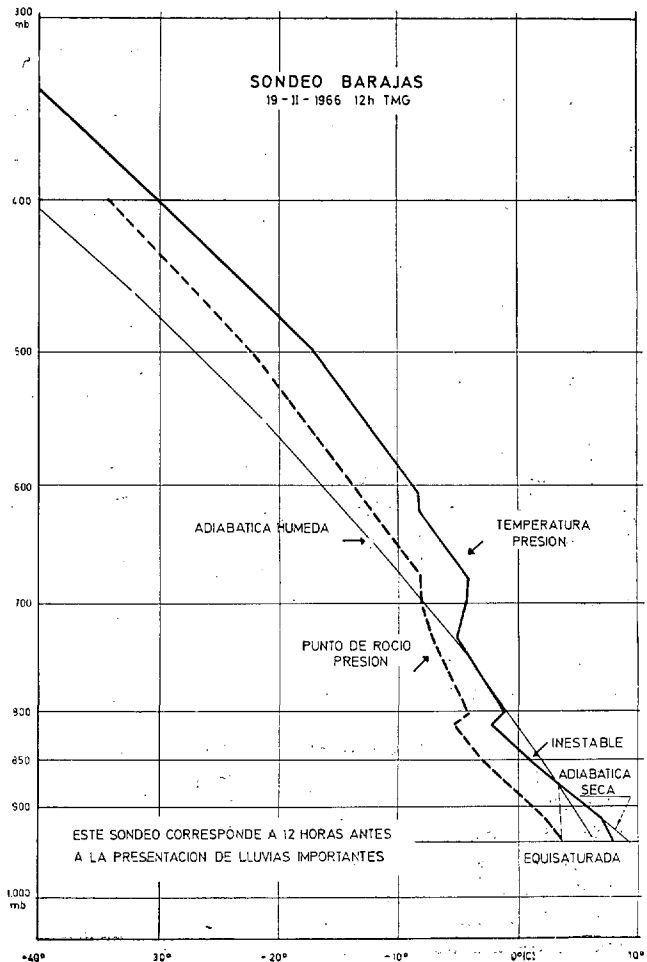


Figura 3.^a

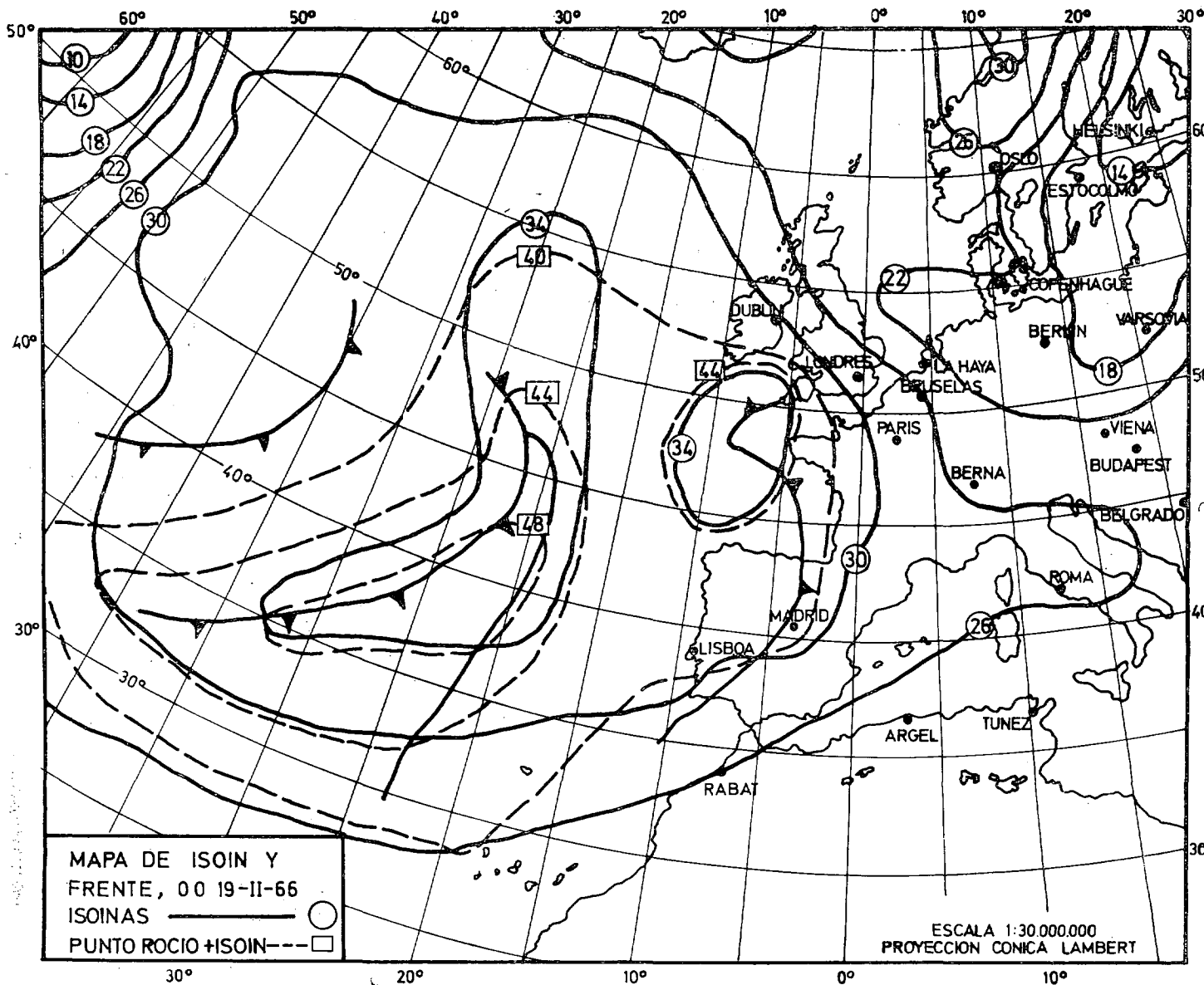


Figura 4.^a

necesarias para ser considerado como un índice de inestabilidad.

En la figura 4.^a representamos el mapa de Isoin correspondiente al día 19 de febrero de 1966. La construcción de este mapa obtenido por diferencia gráfica del mapa de isopletas de punto de rocío al nivel del mar reduciendo puntos de rocío de estaciones de altura mediante un gradiente de $6,5^{\circ} \text{ C}/1000 \text{ m.}$, y el mapa de isotermas de 500 mb requiere aproximadamente unos treinta minutos de trabajo para una zona que abarque toda Europa, Atlántico Norte y costa oriental de Estados Unidos y Canadá.

En la figura 4.^a podemos apreciar valores del Isoin que oscilan desde 10, correspondientes a masas de aire ártico continental, hasta 38, correspondientes a masas de aire ártico calentadas y humedecidas superficialmente por un recorrido marítimo sobre un mar caliente, o a masas tropicales inestabilizadas por advecciones frías en altura. Como es lógico, las masas con valores pequeños de Isoin corresponden a masas de aire muy estables y los valores altos de Isoin corresponden a masas de aire muy inestables, en cuyos frentes de separación se producen las mayores precipitaciones.

1.º Se puede decir que el valor de Isoin de 24 constituye un umbral casi absoluto de ausencia de lluvia. Es decir, para valores actuales o previsibles sobre una zona inferiores a 24, puede pronosticarse ausencia de lluvia. Para lluvias costeras y lluvias orográficas, el umbral de lluvia suele ser de 26 y para lluvias en terrenos llanos puede tomarse como umbral de lluvia un valor de Isoin de 30. Estos umbrales, aunque tienen variaciones estacionales, pueden tomarse prácticamente para todo el año.

2.º Puesto que las lluvias suelen ir asociadas a los sistemas frontales, siguen siendo necesarios los análisis y los mapas pronosticados de superficie. La aportación del mapa de Isoin al análisis y previsión de superficie, consiste en superponer sobre el sistema frontal una serie de isoínas de 38, 34, 30, 26 y 22, cuando se presentan todas, que reflejan las zonas más activas y menos activas del sistema frontal, como puede apreciarse en la figura 4.^a.

Con respecto a la predicción de cantidad hemos seguido el criterio de clasificar las precipitaciones en veinticuatro horas en intervalos de: nulas o inapreciables, 1-5, 6-12, 13-25, 26-50, 50-100 mm. y superiores a 100 milímetros, con traducción fácil a unidades anglosajonas.

3.º Se predicen cantidades superiores a 13 mm. en veinticuatro horas (es decir, intervalo 13-25 o superiores), cuando en el mapa de Isoin se hallan valores de puntos de rocío + Isoin iguales o superiores a 40. En la figura 4.^a hemos trazado las líneas de punto de rocío + Isoin de 40, 44 y 48. Como puede apreciarse, el sistema frontal es muy activo y deben predecirse lluvias importantes a veinticuatro horas, como efectivamente ocurrieron. Respecto a la justificación del índice punto de rocío + Isoin, es lógica, ya que no es lo mismo un Isoin de 34, correspondiente a una masa bastante inestable que presente un punto de rocío de 2, lo cual supone un contenido de humedad pe-

queño, que una masa con igual Isoin de 34 y un punto de rocío 14 que presenta un contenido de humedad mucho más elevado. En el primer caso el índice punto de rocío + Isoin vale 36 y en el segundo vale 48. Como regla adicional debe indicarse que en sistemas montañosos, como ocurre en nuestro Sistema Central con temporales lluviosos del Sudoeste, deben preverse precipitaciones del intervalo contiguo superior, debido a la inestabilidad convectiva. En el caso anterior del 20-febrero-1966, podrían predecirse lluvias de 26-50 mm. en las montañas.

4.º Para finalizar esta breve exposición del método, queremos indicar que las zonas de lluvias responden más claramente a variaciones bruscas de Isoin que a valores de Isoin. En el caso anterior del temporal del 20 de febrero, la lluvia comienza con valores de Isoin de 26 y la mayor cantidad de lluvia corresponde al intervalo de tiempo en que el Isoin sube de 26 a 30 y 34. Por ello, los mapas de variaciones de Isoin son muy significativos, ya que mapas de Isoin con zonas de 30 presentan cese rápido de precipitaciones, cuando por advección cálida a 500 mb. o advección fría en niveles bajos el Isoin decrece rápidamente de 30 a 26.

5.º Creemos interesante resaltar que las condiciones de Isoin, que son empíricas y atienden fundamentalmente a criterios termodinámicos, son necesarias pero no suficientes. Es decir, una gota fría que no reúna condiciones dinámicas adecuadas, no produce precipitaciones importantes desde un punto de vista hidrológico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Apuntes de termodinámica de la atmósfera*. Dr. Francisco Morán Samaniego.
- [2] Resumen anual del boletín diario. Año 1966. Servicio Meteorológico Nacional: *Situaciones de lluvia en octubre de 1966*.