

Enlace de la Climatología con la Meteorología dinámica

Por JOSE M.^a JANSA GUARDIOLA

Doctor en Ciencias.

Posición del problema.

En 1945 planteó el autor por primera vez el problema del enlace de la Climatología con la Meteorología dinámica en un trabajo publicado en la "Revista de Geofísica", bajo el título "¿La Climatología, Estadística o Física?" (I). En él llamaba la atención sobre el procedimiento anticientífico y completamente injustificado que se viene siguiendo al construir la Climatología—tanto en su forma clásica como en las orientaciones modernas, donde el nombre de *Climatología dinámica* podría inducir a error—por procedimientos estadísticos y aplicarle luego, sin embargo, siempre que convenga, las leyes de la Física teórica; es decir, manejaéndola como si fuese Meteorología dinámica.

Si la Climatología se construye por procedimientos estrictamente estadísticos, a base de frecuencias y medias aritméticas, siguiendo la misma pauta que la Economía o la Demografía, las leyes que enlazan entre sí temperaturas, presiones, humedades, vientos y demás magnitudes en Climatología, no pueden ser las mismas que enlazan las mismas magnitudes en Meteorología dinámica. Pero tampoco pueden ser totalmente independientes. Entre estos dos grupos de leyes debe existir un enlace, que pone a la Estadística meteorológica, o Climatológica, fuera del plano de las demás Estadísticas. La relación entre una serie de precios y una serie de volúmenes de producción, o entre una serie de estaturas y una de pesos, es una ley estadística pura, porque entre cada número de la primera columna y su correspondiente de la segunda no hay enlace funcional ninguno. En cambio la relación entre una serie de temperaturas y una serie de presiones, aunque aparezca también como ley estadística, no lo puede ser en el mismo sentido que aquéllas, porque entre las temperaturas y las presiones individuales existe una dependencia funcional rígida, conocida, asegurada por la Meteorología dinámi-

ca. Con otras palabras: la Economía y la Demografía son ramas de la Estadística, porque no existe ni una Economía dinámica ni una Demografía dinámica. La Climatología, aunque se presente bajo una forma estadística, no es una rama de esta Ciencia, o si acaso, será una rama completamente especial.

Para escapar a la contradicción denunciada pueden seguirse dos caminos: o bien aplicar formalmente los métodos estadísticos, sin más variación que la exigida por la consideración de series teóricamente continuas, infinitamente dilatadas en el pasado y dotadas de frecuencias límites rigurosamente estables, o bien escoger un grupo de variables fundamentales, tomadas como variables independientes de estado, cuyos valores normales se establecen estadísticamente y deducir de ellos los valores normales de los restantes elementos meteorológicos por las leyes de la Dinámica. En el primer caso se llega a una Climatología como Estadística; en el segundo a la Climatología como Física. Ordinariamente suelen mezclarse una cosa con otra, y no se sabe a punto fijo cuál ha sido el criterio realmente aplicado.

Las series estadísticas especiales de la Climatología se caracterizan por estas dos particularidades: 1.º, contienen infinitos términos x_1, x_2, \dots ; 2.º, la serie de las medias aritméticas, deducida de ella, es estadísticamente convergente y su límite estadístico a es el valor normal del elemento meteorológico x . Pasando a una distribución continua se demuestra que si dicha distribución obedece a la Ley de Gauss, ningún otro elemento meteorológico que dependa de x puede obedecerla, excepto si la dependencia es lineal, o se cumplen condiciones restrictivas muy especiales. También se demuestra que la función lineal posee exclusivamente la propiedad de conservar íntegra la ley de probabilidad de su argumento, pero comparada con otros tipos de funciones la de conser-

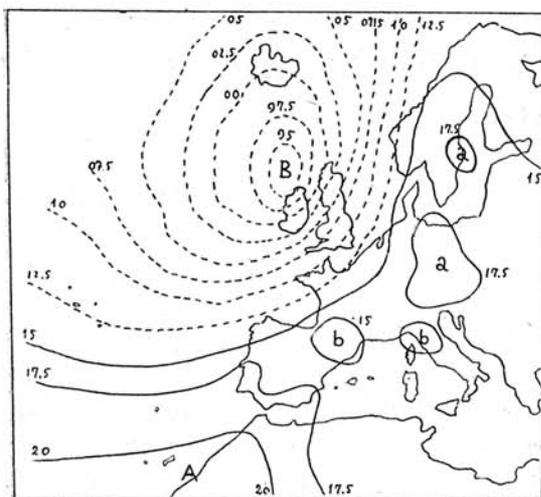


Fig. 1.

*Campo efectivo. Día 30 de junio de 1932,
a 0,7 horas.*

var entre los respectivos valores normales el mismo enlace funcional existente entre valores efectivos. Así queda establecido que las leyes de la Climatología, como Estadística, no pueden coincidir exactamente con las de la Meteorología dinámica.

La construcción de la Climatología como Física presenta dificultades de otra índole: ¿Qué criterio debe seguirse para escoger los elementos fundamentales? Admitiendo que el estado del aire depende de tres variables escalares y de un vector, y que éste sea fundamental, todavía queda un amplio margen de arbitrariedad en la elección de las tres variables escalares, pues todas las magnitudes de estado tienen el mismo derecho, y no vale decir, por ejemplo, que la energía, la entropía, la temperatura equivalente potencial, o el punto de rocío son demasiado complicadas en comparación con la presión, la temperatura y la humedad relativa, pues la Naturaleza no sabe de tales grados de complicación, que sólo tienen sentido en relación con la manera humana de efectuar sus medidas. Por lo que a la humanidad se refiere en particular, aun suponiendo que un índice de humedad deba figurar en el cuadro de variables fundamentales, nadie preferirá a la humedad relativa contra la humedad específica o la razón de mezcla, a pesar de que aquélla es la que dan directamente los meteorógrafos y ésta resulta por un artificio de cálculo.

Ni el criterio de sencillez ni el de obten-

ción inmediata son aceptables para ejecutar la elección. Por otra parte, la Termodinámica teórica exige la perfecta indiferencia: el número de variables de estado independientes es determinado, tres; pero casi todos los grupos de tres que se pueden extraer de la lista completa son equivalentes. Al cambiar las variables independientes cambiará la forma de las leyes, pero no su significación. Otra cosa sería en Climatología, donde al cambiar el grupo de variables fundamentales cambiaría, no solamente la forma, sino también el contenido de las leyes, pues no debe olvidarse que los elementos fundamentales pueden ser mirados como variables independientes en sentido termodinámico, pero no en sentido geográfico o sinóptico.

El criterio que proponíamos entonces es de índole estadística, y es el siguiente: La ley de distribución de frecuencias, o mejor dicho de probabilidades de cada elemento meteorológico en general, parece ser asimétrica, pero si todas las desviaciones de su valor normal fuesen absolutamente aleatorias, dicha distribución debería obedecer a la ley de Gauss. Por otra parte, se ha demostrado que si una variable obedece a esta ley, cualquier función dependiente de ella en general no la puede obedecer. Está, pues, justificado atribuir el carácter de variables independientes a aquellos elementos sujetos a la ley de Gauss. Si éstos fuesen más de tres, entre ellos no podría haber más que relaciones lineales, y no habría inconveniente en que subsistiese entre ellos una libertad de elección. Con este criterio la elección queda relegada a una cuestión experimental, que conviene aplazar hasta que las leyes de distribución de probabilidades de cada elemento en todo el mundo sean mejor conocidas.

La diferencia entre la Climatología como Estadística y la Climatología como Física estriba en la designación del valor normal. En el primer caso es para todos los elementos su límite estadístico; en el segundo caso es su límite estadístico tan solo para los elementos fundamentales, mientras que para los demás se calcula por aplicación de las leyes de la Física. En el primer caso las leyes de la Climatología son específicas y exclusivas, y tienen el carácter de leyes estadísticas. En el segundo caso son las leyes de la Meteorología dinámica, y aunque re-

cayendo sobre un sujeto de naturaleza estadística son, en cierto modo, mixtas.

Ni uno ni otro procedimiento permiten establecer un enlace satisfactorio de la Climatología con la Meteorología dinámica, aunque abren el camino que puede conducir a esta meta.

La Meteorología amortiguada.

Hace algunos años que el autor empezó a trabajar sobre una nueva teoría, para la que propuso el nombre de *Meteorología amortiguada*, y cuya exposición completa, en sus rasgos fundamentales, está contenida en la memoria recientemente publicada por el Instituto Nacional de Geografía, con el título: "El método de amortiguación aplicado a la Meteorología".

Con el descubrimiento de la Meteorología amortiguada el problema del enlace de la Climatología con la Meteorología dinámica cambia de aspecto, y se encamina hacia una solución completa y racional, consistente en subordinar ambas a una fórmula más general y comprensiva, que las contiene como casos particulares.

La Meteorología amortiguada se funda en la histéresis atmosférica: un estado meteorológico lleva impreso el sello de sus antecedentes, tanto más vivo cuanto más recientes, como una generación está marcada con la herencia de sus progenitores en progresión desvaneciente hacia el pasado. El punto de vista de la Mecánica racional parte del principio de que *la evolución de un sistema depende únicamente del estado inicial* (coordenadas y sus derivadas), pero no del camino seguido para llegar al mismo. La Meteorología amortiguada parte de este otro principio: *la evolución de un elemento meteorológico, a partir de un momento determinado, depende de todos los valores que ha tomado dicho elemento anteriormente, y tanto menos cuanto más remotos*. Aunque pudiese generalizarse a toda la Física la interpretación mecanicista, estos principios no son en modo alguno contradictorios. Lo único que se puede reprochar al segundo es contener datos superfluos que, con arreglo al primero, ya se encuentran implícitamente contenidos en un estado inicial infinitamente remoto, pero se justifica su necesidad práctica por la imposibilidad de describir un estado inicial con bastante detalle para que la evolución deducida resulte su-

ficientemente correcta. Dicho con otras palabras: el conocimiento de los estados anteriores a un estado inicial determinado no podrían añadir nada al conocimiento de éste si fuese completo, pero como no lo es, el procedimiento equivale a añadir indirectamente lo que le falta.

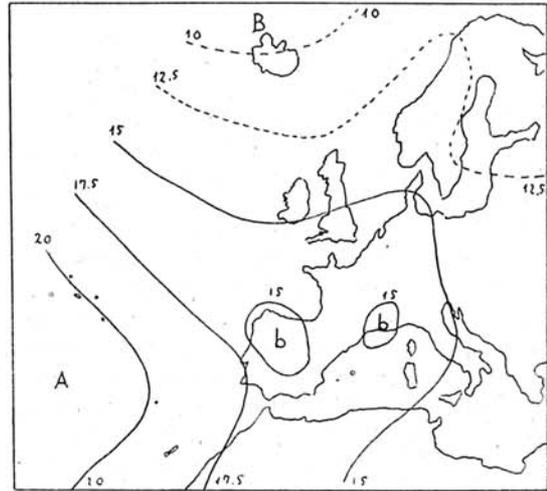


Fig. 2.

Campo amortiguado, el mismo día, con $\beta = 0,1$.

El valor amortiguado A de un elemento a se calcula por la fórmula:

$$A_o = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot e^{-\beta i}}{\sum_{i=0}^{\infty} e^{-\beta i}}$$

si la serie es discreta, o por la fórmula:

$$A_o = \frac{\int_0^{\infty} a \cdot e^{-\beta t} \cdot dt}{\int_0^{\infty} e^{-\beta t} \cdot dt}$$

si es continua. En la primera a_o representa el valor efectivo, o último término conocido de la serie, a_1 el anterior, y así sucesivamente. En la segunda a es función del tiempo, y éste se cuenta, para mayor comodidad, positivamente hacia el pasado, tomando por origen el momento actual.

Como este origen resulta así variable, teó-

ricamente conviene más escoger un origen fijo y escribir la segunda fórmula así:

$$A_{t_1} = \frac{\int_{t_1}^{\infty} a \cdot e^{-\beta(t-t_1)} dt}{\int_{t_1}^{\infty} e^{-\beta(t-t_1)} dt};$$

siendo t el momento para el cual se quiere saber el valor de A .

El parámetro β es arbitrario, gracias a lo cual se dispone de una infinidad de valores amortiguados distintos, partiendo de la misma serie de valores efectivos. Estos valores amortiguados de todos los elementos meteorológicos obtenidos con el mismo valor de β , representan un estado ficticio de la atmósfera, que evoluciona con el tiempo, más lentamente que su estado real. El estudio de estos estados ficticios por los métodos sinópticos constituye la Meteorología amortiguada, habiendo, por tanto, una infinidad de Meteorologías amortiguadas, caracterizada cada una por el valor particular de β que le corresponde, como existe una infinidad de sistemas geométricos no euclidianos regulares, caracterizados cada uno por el valor particular de su radio de curvatura. Los valores extremos de β son cero e infinito. Con $\beta = 0$ resulta:

$$A_0 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=0}^n a_i}{(n+1)};$$

o bien:

$$A_{t_0} = \lim_{t_1 \rightarrow \infty} \frac{\int_{t_0}^{t_1} a \cdot dt}{(t_1 - t_0)};$$

es decir, los valores normales de la Climatología, y con $\beta = \infty$ se tiene:

$$A_0 = a_0$$

y

$$A_{t_0} = a_{t_0},$$

o sean los valores efectivos de la Meteorología dinámica. Así como la Geometría euclidiana está contenida como caso particular y límite en la Geometría general de Riemann, cuando el radio de curvatura se hace infinito, del mismo modo la Climatología y la Meteorología dinámica quedan incluidas en la Meteorología amortiguada como casos

particulares y límites, y el principal objeto propuesto está plenamente conseguido.

En la citada memoria se encontrará una detallada exposición del algoritmo de la amortiguación tratado algebraicamente y su aplicación a los principales problemas de la Meteorología teórica, tales como el viento geostrófico, la frontogénesis, el principio de circulación, ciclones y anticiclones, etc. Todas las fórmulas de la Meteorología amor-

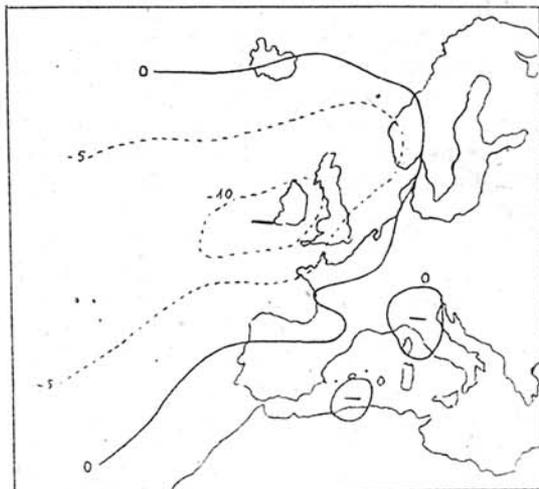


Fig. 3.

Perturbación, el mismo día, con $\beta = 0,1$.

liguada contienen, naturalmente, el parámetro β y degeneran en las correspondientes de la Meteorología dinámica al hacer $\beta = \infty$. Para $\beta = 0$ darán las fórmulas válidas en Climatología, formuladas por primera vez correcta y teóricamente. A dichas fórmulas de Meteorología amortiguada se les puede dar una forma semejante a la corriente en Meteorología dinámica, sustituyendo los términos efectivos por los correspondientes amortiguados y añadiendo un término aditivo complementario, de forma casi siempre muy complicada, pero ordinariamente acotado entre límites de variación bastante restringidos, que incluso puede faltar en ciertos casos. Por ejemplo, el gradiente amortiguado de presión es igual al gradiente de la presión amortiguada; el viento geostrófico que satisface la condición vectorial

$$\rho \cdot [\omega \times v] + \rho \frac{v^2}{r^2} \cdot r = \gamma$$

(ρ = densidad del aire, ω = velocidad angular de la Tierra, v = velocidad relativa de una partícula, r = radio de curvatura de la

trayectoria relativa, γ = gradiente de presión) en Meteorología efectiva; satisface la relación análoga

$$P \cdot [\omega \cdot xV] + P \cdot \frac{V^2}{R^2} \cdot R = \gamma$$

(siendo las letras mayúsculas los valores amortiguados de las minúsculas correspondientes y θ el término complementario) en Meteorología amortiguada. Las componentes del vector θ , que tiene las dimensiones de una fuerza, se expresan en función de to-

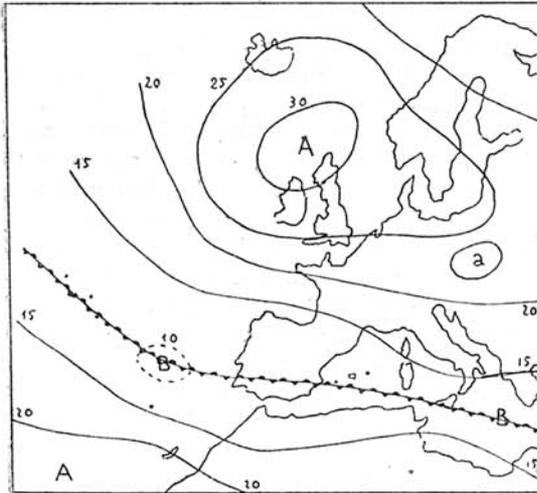


Fig. 4.

Frente amortiguado. Día 3 de marzo de 1932.

das las derivadas de ρ y de γ con relación al tiempo. Su módulo es menor que la mitad del producto de las oscilaciones extremas de ambos elementos. Para juzgar de la importancia de estos términos complementarios que aparecen aquí y en la mayor parte de los casos, y que sirven de medida a la desviación existente entre las leyes de la Meteorología amortiguada y las correspondientes de la Meteorología dinámica, se pueden calcular sus valores máximos, que son los que resultan de la Climatología.

Los resultados obtenidos para la frontogénesis amortiguada son del mayor interés. Entendiendo por intensidad de la frontogénesis la velocidad con que varía el gradiente de temperatura en las cercanías del eje de dilatación; dicha intensidad queda reducida en el campo amortiguado en la proporción

$$\frac{\beta}{y + \beta}$$

siendo y la distancia de un punto cualquiera a dicho eje. Sobre el eje mismo la intensidad es la misma que en el campo efec-

tivo, mientras sea $\beta > 0$. Para $\beta = 0$ (límite climatológico), dicha intensidad se anula en todo el campo, lo que quiere decir que en Climatología no hay frontogénesis, o sea, que los frentes son estacionarios, como era de esperar, pues todos los campos lo son. Para $\beta = \infty$ se recae, una vez más, en la Meteorología dinámica.

La existencia de una frontogénesis amortiguada, impuesta por la teoría y confirmada experimentalmente, trae consigo la formación en las cartas sinópticas amortiguadas de zonas frontales bien definidas (frentes amortiguados), que evolucionan de modo semejante a como lo hacen los frentes reales, dando lugar a ondulaciones de tipo ciclónico y de tipo anticiclónico, que reproducen a ritmo lento las primeras fases, bien conocidas, de la teoría de Bjerkness, alcanzándose raramente la fase de oclusión. A lo largo de estas zonas frontales semiestacionarias del campo amortiguado es de esperar que habremos de encontrar efectos análogos a los que se producen al contacto de masas de aire reales, físicamente heterogéneas, sin olvidar que aquí todo es ficticio: las mismas masas de aire, los frentes, los movimientos, las nubes y las precipitaciones, en el mismo sentido en que son ficticios todos los elementos de una carta climatológica ordinaria.

Las aplicaciones.

La Meteorología amortiguada tiene aplicación inmediata en previsión del tiempo, tanto en la previsión a largo plazo como a corto plazo. En la previsión a largo plazo la Meteorología amortiguada proporciona una técnica completamente nueva, destinada a adquirir enorme desarrollo en un futuro próximo, pues podrá beneficiarse de cualquier perfeccionamiento que se consiga en Meteorología sinóptica ordinaria. Si recordamos que las leyes de la Meteorología amortiguada se apartan poco de las de la Meteorología dinámica, pero que su ritmo evolutivo es más lento, se comprenderá que si a las cartas sinópticas amortiguadas se les aplican los mismos métodos de previsión, cualesquiera que sean, válidos para la Meteorología sinóptica ordinaria, las previsiones obtenidas tendrán un período de validez proporcionalmente más largo; si, por ejemplo, con el valor de β utilizado, el ritmo evolutivo ha quedado reducido a la décima

parte, cualquier previsión que en Meteorología sinóptica ordinaria se tendría por válida para veinticuatro horas, deberá considerarse como admisible para diez días. Por desgracia, la disminución de β , deseable para alargar el plazo de validez de una previsión, trae consigo una desviación creciente y difícil de precisar de las leyes amortiguadas con relación a las conocidas de la Meteorología dinámica que se aplican en Meteorología sinóptica. Se verifica una especie de ley de indeterminación, en la cual son magnitudes conjugadas al alcance de la previsión y su precisión. Si se toma como índice del tiempo de validez el coeficiente β (que tiene las dimensiones del inverso de un tiempo) y como índice de la precisión la fluctuación de los valores observados con relación al previsto para cada elemento, que llamaremos δ , y designamos por Δ dicha fluctuación para la Climatología (que suponemos conocida), las magnitudes β y δ están enlazadas por la siguiente relación de indeterminación:

$$(1 + \beta) \cdot \delta = \Delta.$$

En vez de β se puede introducir el citado período de validez, que llamaremos τ , y que podemos escribir en la forma

$$\tau = \frac{k}{\beta}$$

(k es un número abstracto, a determinar experimentalmente), y la ecuación anterior se convierte en:

$$\left(1 + \frac{k}{\tau}\right) \cdot \delta = \Delta.$$

Cuando se hace $\beta = 0$ resulta $\tau = \infty$ y $\delta = \Delta$, lo que significa que en Climatología el plazo de validez de una previsión es infinito, pero su error probable es máximo; dicho con otras palabras: a base de una carta climatológica se puede dar una previsión numérica de cada elemento, con una probabilidad superior al 95 por 100 de que la diferencia entre el valor observado y el previsto será menor que 2Δ .

Para $\beta = \infty$ se tiene $\tau = 0$ y $\delta = 0$; es decir, que la previsión inmediata carece de error.

Para $\beta = k$, $\tau = 1$, $\delta = \frac{\Delta}{2}$; relaciones que permiten escoger la unidad natural de tiempo y medir k experimentalmente.

La previsión a corto plazo recibe con la Meteorología amortiguada una mejora sustancial. En efecto, partiendo de la idea bá-

sica del método de las variaciones, se considera que la situación efectiva revelada por las cartas sinópticas resulta de la superposición de un estado fundamental de variación lenta y de una perturbación de variación rápida. Con ésta está ligado principalmente el *tiempo real*. La dificultad estaba en la falta de un criterio que permitiese separar estos dos componentes sin ambigüedad. En el método de las variaciones se abandona esta empresa como imposible y se sustituye la representación directa de la perturbación por una imagen indirecta de la misma, sacada de las tendencias o variaciones de la presión. Esta imagen resulta a veces bastante inadecuada y sólo sería correcta si el campo fundamental fuese rigurosamente invariable, pues las variaciones de presión se componen de los dos mismos elementos que se trata de separar, si bien la perturbación contribuye en mayor medida. Con la Meteorología amortiguada se logra un aislamiento de la perturbación casi perfecto, pues basta restar de los valores efectivos los amortiguados correspondientes. Es verdad que subsiste un margen de incertidumbre, representado por la arbitrariedad de β ; pero se ha descubierto experimentalmente que la influencia de este parámetro sobre el aspecto cualitativo de la perturbación es mucho menor de lo que habría podido esperarse, y en particular, sobre la situación geográfica de la misma es casi nula. La perturbación desaparece para $\beta = \infty$ y se hace máxima para $\beta = 0$; pero esto no quiere decir que el mapa climatológico sea el mejor para representar el estado fundamental, o, dicho con otras palabras, que la perturbación resulte mejor reflejada cuando se refiere a la carta climatológica. Si se dibujan una serie de pares de cartas con elementos amortiguados y con las perturbaciones respectivas, correspondientes a una serie de valores de β , desde $\beta = \infty$ hasta $\beta = 0$, se descubrirá fácilmente un cierto valor de β que da la representación óptima, de forma sencilla, bien limitada y resaltante. Las perturbaciones negativas, que gobiernan el mal tiempo, se destacan a manera de núcleos cerrados semejantes a los grandes ciclones del campo isobárico, moviéndose con notable regularidad alrededor de los grandes anticiclones del campo amortiguado, que desempeñan el papel de centros de acción. Todo se simplifica; todo se regulariza y ordena.