

# Historia

## Un Centenario no muy divulgado

por Alberto Linés Escardó



En diciembre del pasado año se cumplieron cien años del primer vuelo del hombre en avión. El hecho fue recordado y celebrado, aunque es preciso reconocer que no

tuvo demasiada relevancia fuera de los ámbitos profesionales del transporte aéreo.

Este año se cumplen asimismo cien años de otro hecho muy importante en la Meteorología: la formulación matemática de las ecuaciones del movimiento de las masas de aire, debido a Vilhelm Bjerknes quien, ya entrado el siglo XX, llevó a cabo la enunciación de otras teorías muy importantes sobre todo para la predicción del tiempo.

La preocupación sobre el planteamiento matemáticos de los fenómenos meteorológicos viene de antiguo. El propio Aristóteles estaba convencido que en el desarrollo de los dichos fenómenos estaban relacionados con causas físicas. Lo patentiza cuando dice a su discípulo Teofrasto: «Debemos ahora mostrar que cada viento es acompañado por fuerzas y otras condiciones debidas a relaciones entre uno y otras; tales condiciones son diferentes de unos vientos a otros».

Habrían de pasar muchos siglos para que con un mínimo de rigor se abordara la formulación matemática de esas relaciones. Los movimientos de las masas de aire, en general, tardarían mucho tiempo en parametrizarse; en realidad no se alcanzarían planteamientos en forma convincente hasta los comienzos del siglo XX.

En el siglo XVII Newton descubre la gravitación universal y establece la relación matemática entre fuerza y aceleración; corresponde a Leibnitz la formulación en términos de cálculo diferencial.

Cerca de tres siglos se demoraría la aplicación de estas formulaciones a los fluidos en general y al aire en particular. El retraso fue debido a causas varias, y no la menos importante el que no se conocía la relación entre la presión y la densidad, como indica Duncan Thompson (*The Mathematics of Meteorology*). Lo cierto es que durante siglos la Matemática marchaba muy por delante de la Meteorología, aunque cada vez las distancias se acortaban gracias a los avances de la Física.

Con los trabajos de Euler y Bernouilli se logró establecer una formulación del movimiento de los fluidos, los cuerpos no sólidos como se les denominaba, por medio un sistema de cuatro ecuaciones en derivadas parciales no lineales, en que se relacionaban cinco va-

riables, a saber, las tres componentes del viento, la densidad y la presión. Al haber una variable mas que ecuaciones, la solución era indeterminada.

Aunque el planteamiento matemático era correcto, la base física era endeble, entre otras razones porque al calor se le suponía una forma de la materia. Boyle encontró una relación lineal entre densidad y presión para los gases. Posteriormente, un paso más fue la formulación debida a Boyle y Charles, que establecía la relación entre las variables que caracterizan el estado de un fluido.

Con el establecimiento del equivalente mecánico de calor por Joule, y a partir de sus ideas y experimentos con los trabajos de Helmholtz y otros, se estableció la equivalencia entre calor y energía, con lo que se formuló el primer principio de la Termodinámica o principio de la equivalencia que allanaba uno de los principales obstáculos. En el plano de lo puramente dinámico, la formulación de Coriolis fue decisiva, al introducir en todos los movimientos de la materia el efecto de la aceleración debida a la rotación de la Tierra.

Ya en 1904, hace justamente un siglo, fue

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} + f_v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - f_u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -u \frac{\partial p}{\partial x} - v \frac{\partial p}{\partial y} - w \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{C_p p}{C_v} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -u \frac{\partial T}{\partial x} - v \frac{\partial T}{\partial y} - w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{RT}{C_v} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right). \end{aligned}$$

importantísimo el planteamiento de Bjerknes cuando estableció un sistema de seis ecuaciones en derivadas parciales entre estas seis variables: Las tres componentes del viento, la densidad del aire, la presión y la temperatura. El primer miembro de cada ecuación era la derivada parcial o si se quiere, la variación con respecto al tiempo de cada una de las variables citadas. Dicho con otras palabras: se planteaba, conocido el valor de determinados parámetros de la atmósfera, saber cuales serán un tiempo después, ya sea unas horas, un día o varios. Bjerknes había sentado sólidas bases para la Meteorología moderna y un rigor matemático en sus aspectos dinámicos.

El planteamiento de las seis ecuaciones de Bjerknæs era impecable, pues recogía las leyes de Newton sobre el movimiento, la de los gases perfectos, el principio de conservación de la masa y el de la equivalencia.

El problema estaba, por una parte, en disponer de una red de datos suficiente y, por otra, la enorme dificultad de resolver un sistema no lineal entre derivadas parciales que carece de soluciones analíticas. Además, el sistema incluía las ondas sonoras y las gravitatorias no deseables en un planteamiento puramente meteorológico. En alguna manera, la Meteorología salvaba gran parte de la distancia con la Matemática. Y aún marcaba lo que hoy llamaríamos una «especificación de usuario»: De nada sirven técnicas de predicción que empleen más tiempo en elaborarse que el plazo de validez de las mismas. Porque resolver el sistema de Bjerknæs dando a la variable  $t$ , tiempo, incrementos de 24 horas, es decir, una predicción de un día para otro, podía llevar meses con los métodos de que entonces se disponía.



Reunión de la Comisión de Estudio de la Atmósfera Superior en Leipzig, 1927. Vilhelm Bjerknæs es el cuarto por la derecha de los sentados. De pie hacia el centro de la foto, el más alto de los dos con traje gris, está el pionero de la predicción numérica, Lewis Fry Richardson. A la izquierda de éste, con traje negro, aparece Enrique Meseguer, director del Servicio Meteorológico Español y, tres lugares a la derecha de Richardson, con pajarita, Eduard Fontserè.

### El ensayo de Richardson

El primero que se atrevió a abordar el problema matemático en toda su dimensión, fue el científico británico Lewis F. Richardson (1881-1953). Conductor de ambulancias durante la primera guerra mundial, entre servicio y servicio trabajaba en la solución de un caso concreto, sobre los datos de una cuadrícula que diseñó, que abarcaba las Islas Británicas, Francia y el entorno de los Pirineos. Acabada la guerra continuó sus trabajos. Tuvo la acertada idea de emplear el método llamado de «las diferencias finitas», con lo que eludía en parte cálculos infinitesimales. Para aliviar el enorme aparato matemático, hubo de hacer continuas simplificaciones. En 1922 ya logró un primer resultado, en apariencia un fracaso mayúsculo, ya que para la varia-

ción de la presión en 24 horas en un determinado lugar, aparecieron errores de varias decenas de milibares.

Al dar cuenta de sus trabajos, suponía que para poder hacer operativo su método de resolución de las seis famosas ecuaciones harían falta miles de personas adiestradas, dotadas de las calculadoras mecánicas entonces disponibles. Y acababa diciendo: «Quizá algún día los avances de la computación la hagan más veloz que el tiempo atmosférico y a un coste menor que los gastos implicados». En alguna manera intuía que tal cosa acaecería en el plazo de menos de 25 años.

### Una buena aproximación: Los movimientos cuasi horizontales del aire.

A mediados del siglo XX se hicieron importantes avances en la simplificación de las ecuaciones y en establecimiento de relaciones lineales en lo posible entre las variables implicadas. Un procedimiento fue el de suponer nulas las variaciones transversales y verticales de viento, es decir, considerar los movimientos puramente horizontales como prevaletentes en desplazamientos a gran escala.

Un nuevo concepto entró en escena: La vorticidad, ya estudiada en 1858 por Helmholtz, que es la circulación rotatoria del aire alrededor de un eje orientado arbitrariamente, es decir, el rotacional del vector velocidad. La fórmula de la vorticidad de Rossby viene a ser la aplicación meteorológica del teorema de Gauss. El propio Rossby en 1939 había demostrado que la propagación de las grandes ondas más o menos sinusoidales se podían prever por medio de la vorticidad, y aplicó también con éxito su método para prever el movimiento de ondas planas. También fue importante el llamado método de las perturbaciones.

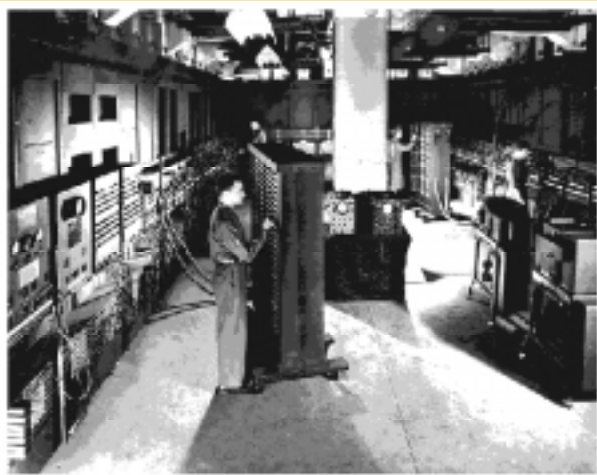
En los años cincuenta, la USAF empleaba unos diagramas para las trayectorias de vorticidad constante, que permitía prever el desplazamiento de los ejes de las ondas principales hasta para 72 horas, es decir, cambios a gran escala. En plena guerra fría, era decisivo disponer de una predicción de unos días para el caso de una súbita emergencia. Un método diseñado por Jerome Namias basado en las anomalías, con alguna base estadística, permitía asimismo predicciones hasta cinco días que regularmente eran difundidas por todas las bases militares americanas repartidas por buena parte del mundo.

Los métodos de predicción a largo plazo, es decir, de unos cinco a algo más de diez días, por entonces no se basaban, salvo raras excepciones, en formulaciones dinámicas; eran usuales las correlaciones y otros algoritmos estadísticos y en la búsqueda de ciclos en determinadas variables. Las predicciones para un mes solían tener una base probabilística.

## Los primeros ordenadores

En 1946 se disponía de ordenadores cuya velocidad de cálculo era unas 10.000 veces la de las calculadoras convencionales más veloces. En los años posteriores se irían perfeccionando con rapidez. Los meteorólogos se dieron cuenta inmediatamente de las enormes posibilidades que se abrían con los cálculos electrónicos y prestaron una atención creciente al problema de la predicción numérica del tiempo contado para ello con calculadoras de muy alta velocidad.

Así como en su momento los trabajos de Richardson parecieron un fracaso, a mediados de siglo alcanzaron



Ordenador ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) instalado en Aberdeen (Maryland, EE.UU.), en el que se realizó la primera predicción numérica operativa en 1949 basada en el modelo cuasigeostrofico de Charney, Fjörtoft y Von Neumann.

notoria actualidad y pronto se iniciarían los ensayos de lo que se conoce como predicción numérica del tiempo, es decir, la metodología de la predicción del tiempo basada en la resolución de las ecuaciones físicas que rigen el movimiento de la atmósfera. Un hecho importante tuvo lugar en 1948 cuando Charney encontró que un uso adecuado de las aproximaciones geostrofica e hidrostática conducen a una sola ecuación que incluye la presión y en la que están ausentes las ondas sonoras y gravitatorias.

Hubo una gran mejora en las redes de telecomunicaciones entrados los años sesenta, que de momento facilitaba la difusión y recopilación de datos, en número creciente de día en día. Ello ayudaba enormemente la elaboración de los mapas sinópticos.

Como se conocían bien los problemas matemáticos implicados en la predicción numérica, los ensayos no se hicieron esperar y fueron sumamente alentadores. Por entonces estuvo de moda lo que se llamaba «predicción objetiva», basada en técnicas muy concretas en las que apenas quedaba espacio para la iniciativa del predictor. Fjörtoft ideó un método gráfico relativamente simple para la predicción objetiva del mapa de 500 milibares.

Muchos de los primeros ordenadores fueron de tipo analógico, pero al poco tiempo el Álgebra de Boole irrumpió y proliferaron con enorme rendimiento los ordenadores digitales, hoy herramienta imprescindible en el mundo actual de la tecnología.

## Los modelos de Circulación General

Hoy la mejor herramienta para la previsión del tiempo son los llamados modelos de circulación general basados en las ecuaciones primitivas, que abordan básicamente el planteamiento de Bjerknes: considerar el problema de la predicción meteorológica como un problema de valores iniciales. Una vez conocidas unas condiciones iniciales de la atmósfera, también llamado análisis, que se obtienen a partir de las observaciones disponibles, se integran las ecuaciones atmosféricas con una condiciones de contorno en el límite inferior y superior de la atmósfera.

Dada la fuerte no linealidad de las ecuaciones en derivadas parciales de la atmósfera, su resolución exige el uso de métodos numéricos altamente eficientes. Para ellos, se procede a una discretización de las ecuaciones y de los campos representados en rejillas horizontales cuya resolución, dependiendo de los ordenadores utilizados, está alrededor de los 50-20 km. El número de niveles en los que habitualmente se discretizan las ecuaciones y los campos en la vertical oscila entre 30-90. Los modelos globales utilizan frecuentemente la aproximación hidrostática –nula aceleración vertical-, sin embargo los modelos de área limitada que utilizan resoluciones horizontales superiores a los 10 km son habitualmente no hidrostáticos, ya que a dichas escalas la existencia de fuertes aceleraciones verticales impiden que dicha aproximación se pueda razonablemente mantener.

El sistema atmósfera interacciona con la superficie de la tierra, con los océanos y con los hielos polares. Esta interacción puede imponerse como una condición de contorno externa al sistema. Por ejemplo, imponer que la temperatura de los océanos es constante durante la integración. O bien puede acoplarse un modelo de océano que evoluciona también con el tiempo y que interacciona con el modelo de atmósfera. El uso de condiciones de contorno fijas o el acoplo con subsistemas que a su vez evolucionan depende críticamente del alcance de las predicciones.

Como resumen podemos decir, que el punto de partida de los actuales modelos de predicción que se utilizan operativamente en los principales centros meteorológicos, y que tanto han progresado en los últimos decenios, es el ya centenario planteamiento de Bjerknes.