

## **Paralelismo**

Miquel Ballester  
Cruelles  
*Universidad  
Complutense*

*Territoris* (1998), 1:  
101-109

# Paralelismo

**Miquel Ballester Cruelles**

Profesor Emérito de Física del Aire de la Universidad Complutense  
y de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona

## *Resum*

La història de la meteorologia al llarg del segle es dibuixa damunt tres fites o esdeveniments memorables, retratats per altres tantes màximes magistrals representatives, de les quals són autors, respectivament: (I) V. Bjerknes (1904), que afirma que la predicció meteorològica hauria de ser escomesa com un problema de física i de mecànica; (II) C. G. Rossby (1940), que estableix de forma indiscutible la primordial importància de la vorticitat en el camp del moviment i el seu pronòstic; (III) E. N. Lorenz (1996), que introdueix una nova noció i funció del caos en la recerca d'una certa impredecibilitat del comportament atmosfèric. El títol d'aquest article rememora la vida de J. M. Jansà, cronològicament paral·lela a la seqüència d'aquests esdeveniments.

## *Abstrat*

The history of Meteorology throughout the present century is outlined on the basis of three main sequential events, depicted by three representative sentences original respectively of: (I) V. Bjerknes (1904) stating that the weather forecasting should be undertaken as a problem of Physics and Mechanics. (II) C.G. Rossby (1940) establishing unquestionably the foremost importance of vorticity in the field of motion and its prediction. (III) E.N. Lorenz (1996) introducing a new meaning and role of chaos in the research of a certain unpredictability of the atmospheric behaviour. The title of this paper reminds how the life of J. M<sup>a</sup>. Jansà is chronologically parallel to the sequence of these events.

Recepció del manuscrit, desembre de 1996

A JOSEP M<sup>a</sup> JANSÀ GUARDIOLA, a lo largo de cuya prolongada y fecunda vida ha sabido comentarnos y enseñarnos la evolución histórica espectacular de la Meteorología en el decurso del presente siglo, que ahora trato de representar telegráficamente a través de tres hitos de esa cronología paralela.

A continuación se hace referencia o exégesis de tres frases señeras que marcan el inicio, el centro y el final de este siglo XX.

## **I. «Das problem der Wettervorhersage betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik» (Vilhelm BJERKNES, 1904)**

Así se titulaba un artículo publicado en la revista «Meteorologische Zeitschrift», páginas 1-7 del número correspondiente a enero de ese año y enviado en el 1903. No contiene referencias ni bibliografía. Pone los cimientos de la predicción del tiempo en base a la resolución de un sistema de siete ecuaciones con siete variables, a saber: tres componentes de la velocidad del viento, la presión atmosférica, la densidad, la temperatura y la humedad del aire. Pues, según él, los procesos de la atmósfera son de naturaleza mecánica y física. El sistema quedaba así definido por:

Tres ecuaciones hidrodinámicas de movimiento, que vinculan las componentes de la velocidad con la presión y la densidad. Una ecuación de continuidad que garantiza el principio de conservación de la masa en ese movimiento, relacionando estas componentes con la densidad. Una ecuación de estado entre la presión, la temperatura, la densidad y la humedad del aire. Dos principios de la termodinámica: el primero contemplando procesos con absorción o cesión de calor, o bien adiabáticos, y el segundo dando entrada a la entropía. Las cuatro primeras ecuaciones se formulan en derivadas parciales y contienen el tiempo «t» como variable independiente, alojando así una capacidad de pronóstico. La de estado es una ecuación finita (no diferencial, por tanto sin problema de integración pero tampoco de pronóstico). Las dos últimas son manipulables en términos de energías ligadas a variaciones de la temperatura, la presión y la densidad.

Lo curioso del caso es que el autor menciona y discute exhaustivamente las ecuaciones, aunque sin expresarlas analíticamente. (Probablemente debido a algún escrúpulo como catedrático de la Universidad de Oslo, donde las habría explicado hasta la saciedad). El trabajo tiene un exquisito sabor académico, rompiendo con la noción decimonónica de que la predicción del tiempo era materia de una ciencia natural, descriptiva. Su visión del futuro es impresionante, pues los modelos matemáticos de predicción descansan en la actualidad sobre las mismas premisas. Pero la simiente no cayó en terreno abonado. Respetuosamente en el olvido tuvo que esperar casi 20 años un intento de L.F. Richardson, fallido y honestamente explicado en la obra «Weather Forecasting by Numerical Process» (1922, Cambridge University Press). Lo que después Sir Graham Sutton (Director de la Met. Office) recordó como «Richardson's dream» no sirvió sino para afianzar la vieja tradición de predecir por métodos, en el fondo, subjetivos.

Siguen unos años de divorcio amistoso entre dos grupos que se apuntaron a lo que vino en llamarse «Meteorología Dinámica» y «Meteorología Sinóptica», respectivamente. La opinión generalizada les atribuía carácter de ciencia a la una y de tecnología a la otra, aunque no en balde la Sinóptica se nutría de leyes hidrodinámicas y termodinámicas aplicadas a su quehacer. La Dinámica, por su parte, mantuvo un desarrollo continuado sobre su línea, asimismo sin perder de vista la realidad natural, necesariamente compatible con la teoría. Desentrañar la complejidad del mundo por simplificación ha sido la vía perseverante del físico. La física del aire supuso un andar infatigable por ese camino. A la sazón parecía patente que los grandes movimientos atmosféricos, a escala sinóptica, utilizables en provecho de la predicción, eran prácticamente horizontales. La reducción era empíricamente plausible y, por supuesto, la observación instrumental en la tercera dimensión era comparativamente impracticable (pese a ciertas posturas para un «dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse»). La Dinámica aportaba su versión poniendo en juego dos entes o atributos clásicos de los fluidos: la «divergencia» y la

«vorticidad». Su expresión analítica (bidimensional) revela ya una semejanza ortográfica que parecería darles pie de igualdad en su comportamiento simplemente cinemático

$$\text{Divergencia} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\text{Vorticidad} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

donde:

- x es una coordenada sobre un paralelo geográfico, dirigida hacia el E.
- y es una coordenada sobre un meridiano geográfico dirigida hacia el N.
- u es una componente de la velocidad sobre el eje x.
- v es una componente de la velocidad sobre el eje y.

El esquema viene a indicar que en todo movimiento fluido organizado pueden presentarse macrotorbellinos y convergencias; pero ninguna Mecánica de fluidos avanzará prevalencias o predominios de una magnitud sobre la otra, a priori, sin conocerse propiedades del régimen. Ambas son lineales, de primer orden diferencial y visiblemente gemelas (en su forma, diríase, canónica). El hecho observado de que la vorticidad ciclónica solía ir acompañada de convergencia y la anticiclónica de divergencia invitó en un principio a explorar estos segundos campos, como sinónimos de mal tiempo y bonanza, respectivamente. Sin duda pudo haber una cierta confusión entre el significado de convergencia/divergencia de la velocidad con el de confluencia/difluencia de líneas de corriente. Lo cierto es que el aire fluye sobre una esfera en rotación, en un planeta geofísicamente privilegiado: la relación entre su velocidad angular y la energía térmica puesta en juego por la radiación solar, es tal que provoca un equilibrio entre la fuerza de inercia (Coriolis) y la engendrada por la presión. El resultado final es que el movimiento contenido en la primera sigue las isolíneas de la segunda, esto es, el aire se desplaza a lo largo de las isobaras, con velocidad que depende de la distancia entre éstas; lo que redonda, por ende, en mengua del campo de divergencia. Pero ésta sigue gozando sus encomios.

Se ha coronado una tercera parte del siglo. Universidades y servicios meteorológicos han aunado esfuerzos con provechoso fruto. Junto con los grandes logros, la conjunción y elucidación de los conceptos de divergencia y de vorticidad han cobrado máxima actualidad. Estamos en puertas de la segunda frase lapidaria del siglo.

## **II. «The factors determining the stationary or progressive character of the motion are to be found in the vorticity distribution»**

**(Carl Gustav ROSSBY, 1940)**

La frase está contenida en un artículo denominado «Planetary flow patterns in the atmosphere», publicado en un suplemento del *Quarterly Journal* de la Royal Meteorological Society correspondiente a ese año (Volumen 66, páginas 68-87). La II Guerra Mundial, que acababa de empezar, dejó a todos con la palabra en la boca. Las investigaciones y progresos habidos en esos cinco años por parte de ambos contendientes fueron abundantes pero, a la sazón, desconocidos. La Meteorología pertenecía al secreto militar. Luego, ya en tiempos de paz, salieron a la luz. Fueron espectaculares los avances en la exploración o sondeo del aire superior (seguramente en asistencia de las fuerzas aéreas respectivas). Una consecuencia desconocida fue la introducción del análisis sobre superficies isobáricas en sustitución de las horizontales, lo que facilitaba la identificación de datos en altura a los distintos niveles de presión. Es curioso que la nota técnica circulada con carácter reservado, original de los oficiales de Meteorología Prof. R. C. Sutcliffe y O. Godart («Isobaric Analysis», *Met. Office, Tech. Mem. n° 50, Londres 1942*), llegó tardíamente a conocimiento de A. Eliassen, quien publicó un artículo titulado «The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable» (*Geofys. Publik. XVII, 1948*), al final del cual incorpora una nota pidiendo disculpas por no haber advertido la existencia del trabajo anterior cuando éste se encontraba ya en imprenta. El cambio supuso la aceptación generalizada de la hipótesis hidrostática, sobre la cual descansaba la sustitución de la coordenada cartesiana vertical por la presión en altura (a manera de coordenada de Lagrange), pasando aquella a desempeñar el papel de variable física. Los mapas con curvas isobaras sobre superficies de nivel se convirtieron en otros con curvas de nivel sobre superficies isobáricas, con consecuencias más allá de este aparente juego de palabras. El incremento ingente de las observaciones aerológicas permitió el diseño de configuraciones a varios niveles (en número cada vez mayor), rellenándose con carácter discreto la tercera dimensión. Por primera vez la noción del comportamiento del aire en altura fue haciéndose familiar, lo que, junto al desarrollo espectacular del cálculo automático, invitó a pensar que el problema de la predicción daría entrada a métodos objetivos, reconduciendo diferencias entre la Dinámica y la Sinóptica.

Los primeros modelos matemáticos acusaron un efecto adverso de la presencia de ondas «espúrias» (cortas, gravitatorias, sonoras) que había que filtrar. Aparecieron ideas felices: las aproximaciones geostrófica e hidrostática ejercían ese cometido. Mas la aplicación indiscriminada de la primera a las ecuaciones generales de la hidrodinámica invalidaba su capacidad de pronóstico al cancelar términos que la poseían. Las miradas se dirigieron entonces hacia la ecuación de vorticidad, en cuya formulación desaparecen los términos de la presión (o del geopotencial) y permiten dosificar la condición geostrófica de filtrado. En el intento de simplificar al máximo el modelo se introdujo la noción «lato sensu» de barotropía, como condición de la atmósfera con campo único de movimiento a cualquier nivel. Llegamos así a la coronación del medio siglo con el primer experimento que abriría las puertas de la predicción dinámica: al equipo encabezado por J. G. Charney y R. Fjørtoft se agregó el famoso matemático J. von Neumann, publicándose el resultado en la revista sueca *Tellus*, volumen 2, 1950, bajo el título «Numerical integration of the barotropic vorticity equation». Un clamor general no tardó en proclamar una nueva «era» con la entrada de la predicción por la puerta grande del ámbito académico, de la mano de las ciencias exactas siguiendo la tradición del determinismo matemático. Tuvo también sus detractores, pues sus resultados, válidos únicamente al nivel de 500 hPa, eran comparables

a los obtenidos por los acostumbrados métodos convencionales. Con paso lento y seguro se fue avanzando, primero con la incorporación de dos niveles (700 y 300 hPa) a los que se adjudicó la ecuación de vorticidad, reservando el de 500 para otra ecuación procedente de otras fuentes (termo-hidrodinámicas), desprovista de la capacidad predictora por carecer de términos en derivadas con respecto al tiempo «t». Se distinguían así unas ecuaciones de «pronóstico» de otras de «diagnóstico», desempeñando estas últimas el importante papel de garantizar leyes físicas, vinculantes entre variables meteorológicas, que debían cumplirse para una estricta adaptación del modelo a la realidad que debía representar. Los avances en el terreno de la Dinámica habían de ir paralelos a los de la tecnología del cálculo, con ordenadores cada vez más sofisticados y rápidos. En pocos años se incrementó el número de niveles: el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Plazo Medio introdujo 19 en 1986 y 31 en 1991, y sustituyó el gran CRAY X-MP/48 por el aún más complejo y rápido CRAY Y-MP/864. De las modestas mallas iniciales, a cuyos vértices se adscribían los datos, se pasó a considerables mejoras en su densidad, a fin de superar en lo posible el error procedente de eliminar componentes de alta frecuencia contenidas en la ecuación exacta y no en la aproximada (error de truncamiento); en dicho Centro se pasó de una resolución T 106 a una T 213 (cifras representativas de los números de onda acumulados). Mas no se acababan ahí los problemas. La sustitución de las derivadas parciales por cocientes de incrementos finitos daba lugar a errores de discretización e inestabilidades (lineal, de cálculo), que provocaba amplificaciones indebidas, con independencia de la no lineal ocasionada por la aparición de frecuencias extrañas («aliasing»). Bastantes quebraderos de cabeza se evitaron con la introducción de métodos espectrales para la resolución de las ecuaciones; el reciente superordenador CRAY Y-MP/C90 suple la acumulación de operaciones en la mínima unidad de tiempo. En un momento dado también se decidió utilizar modelos con las ecuaciones generales de la hidrodinámica en vez de las de vorticidad; vino a ser como un resucitar la idea original de V. Bjerknes, sólo que su sistema había sido retocado a lo largo de esos tiempos. Estas ecuaciones vinieron a llamarse «primitivas» como indicación de su génesis. Estos modelos actualizados contienen: las 2 ecuaciones de movimiento (bidimensional), la 3a ha sido reemplazado por la condición hidrostática; la ecuación de continuidad, que en coordenadas no cartesianas (x,y,p,t) no contiene la densidad (variable física no incluida en la observación meteorológica); la ecuación estado; las ecuaciones derivadas de los principios I y II de la termodinámica, donde la entropía entra en la física del aire como proporcional al logaritmo de la temperatura potencial.

Mejoras de otra índole han sido: investigación de la capa límite planetaria en beneficio de la condición de contorno inferior; introducción de la orografía como singularidad perturbadora y ciclogénica; énfasis y tratamiento de fenómenos a subescala (no cubiertos por resolución en el modelo), dando lugar a parametrizaciones; entrada de factores disipativos y «forzamientos» de índole térmica o mecánica; incorporación del agua (ecuación de continuidad para el vapor, etc.); penetración lateral de influencias tropicales. La extensión de la superficie de pronóstico abarca el hemisferio y la validez, teórica de 10 días, resulta fiable para los 5 primeros. Los estudios pormenorizados de verificación de las predicciones dejan sin lugar a dudas la certeza de una dependencia con respecto a las condiciones iniciales; los datos de observación no entran así directamente en el cálculo sino una vez sometidos a un proceso denominado «inicialización». Pero este «último» (en todos sentidos) problema parece no tener solución; esto es, ¿no es posible acertar el punto exacto de partida que nos lleve, por vía matemático-determinista, al acierto en el pronóstico?. ¿Existe una «impredecibilidad» inherente en la atmósfera?. Es llegado el momento de la tercera reflexión.

**III. «Sensitive dependence on initial conditions in non-linear dynamical systems is responsible for an apparent randomness. Chaos means something that looks random but it is not. The Earth's atmosphere, plus its surroundings, is chaotic».**

(Edward N. LORENZ, 1996)

Nos hallamos ante una nueva doctrina de la Dinámica del aire o ante una nueva doctrina de la Dinámica del caos, o ambas cosas?. La noción de caos es imprecisa; los diccionarios suelen hacer referencia al caos bíblico, del «Génesis», como idea acompañante del desorden. En la creación el Demiurgo puso orden en las cosas, pero tratándose de un acto inicial se suscita la confusión ante unas cosas que aun no han sido creadas. En cuanto al azar, resultaba tranquilizante disponer de una olla o cajón de sastrería donde meter todo aquello que escapa a toda ley. En este sentido cabría distinguir un azar «epistemológico», consecuencia de nuestra ignorancia o desconocimiento ante un mundo natural indiscernible, de un azar «ontológico», como un derecho que posee ese mundo natural a ser intrínsecamente interrogado (J. Wagensberg, «Metatemáticas» 9, 1985). Cabría también aplicar esta distinción al concepto de caos. De la misma manera que hay una personificación del caos (en ciertas definiciones, en la Mitología griega, etc.), sería concebible una personificación del azar (en este caso ontológico); etimológicamente, tanto en árabe («az-zahr») como en latín («alea»), el término se refiere al juego de los dados, como algo que escapa al control humano. Lorenz introduce novedades conceptuales y terminológicas (la palabra «atractor» bautiza un fenómeno descubierto por él, hoy incorporado al vocabulario moderno. Cuando ataca el problema de la predicción, enfocando un margen no predecible, lanza la idea de un caos, hasta entonces sinónimo de desorden, pudiendo acercarse hacia un tipo de orden sin periodicidad. Para muchos no estaba claro si se trataba de reconocer cierto orden remoto en el desorden (como si una parte del azar epistemológico fuera desentrañable) o, por el contrario, si el orden aparente acabara por desordenarse, como si el caos fuera ubicuo, inmanente al determinismo (sin presencia aparente, recóndito y como larvado en todo sistema determinista). Y así, el azar ontológico ¿permanecerá para siempre intocable, en Derecho de la Naturaleza a no ser nunca totalmente descubierta?. El tránsito de lo sencillo a lo complejo, de lo regular a lo irregular, se enfoca sobre la noción de «espacio de estado». Atañe a los sistemas dinámicos, entendiéndolos por éstos los sistemas cuya evolución, a partir de un estado inicial conocido, puede describirse por un conjunto de reglas, expresables en forma de ecuaciones. Un espacio de estado, muy sencillo, para representar esa evolución, se compondría de dos coordenadas: posición y velocidad. La trayectoria puede converger hacia un punto fijo, que será su atractor; o hacia una curva cerrada, si el movimiento es periódico. Los atractores pueden ser, así, superficies o volúmenes conocidos en espacios de estado con más coordenadas. Si la evolución de un sistema no es sensible a las condiciones iniciales, esto es, si dos puntos próximos inicialmente siguen estándolo posteriormente, el atractor es normal, canónico (well-behaved) y suele corresponder a casos cuya evolución es pronosticable. Matemáticamente se caracterizan por tener dimensión entera, igual a la dimensión topológica en el espacio de estado. Por el contrario, pueden darse movimientos no periódicos originarios de sistemas dinámicos sencillos, cuya trayectoria en el espacio de estado no sería repetitiva ni se cortarían a sí mismas (nunca seguiría un camino ya recorrido). Esa trayectoria tendrá longitud infinita, pero confinada a un área finita en el espacio de estado. Esto puede ocurrir si el atractor no es un conjunto topológico sino «fractal». El

primer sistema de esta condición fue dado a conocer por Lorenz en 1963 («Deterministic nonperiodic flow», *Journal Atmospheric Sciences* 20, pags. 130-141). Su sencillez matemática (tres ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, lineales) no haría sospechar la complejidad de su trayectoria en el espacio de estado; aunque determinista no es periódica estrictamente. El atractor no pertenece a la familia de aquellos arriba descritos sino que se compone de capas infinitamente anidadas, resultantes de unos rizos o lazos irregulares aunque aparenta cierta regularidad; capas que cubren un área infinita pero que ocupan una volumen nulo. Su tratamiento conduce a buscar referencias en otras dimensiones (por ej. la de Hausdorff-Besicovitch); así para conjuntos topológicos la dimensión de H-B es un entero (0 para puntos, 1 para curvas, 2 para superficies, etc.), mas para conjuntos fractales la dimensión ya no será un entero sino un cierto número real (el «polvillo» del conjunto de Cantor tiene dimensión fractal H-B estimada en 0,63). Sobre esta línea de raciocinio se llega a la noción de sistemas dinámicos caóticos cuyos atractores reciben el nombre de «extraños», calificativo dado a conocer por Ruelle y Takens en 1981 («Dynamical systems and turbulence. Lecture notes in Mathematics» 898. New York, Springer), bien es verdad que Chirikov e Izrailev vienen a decir que «un atractor extraño sólo parece extraño a los extraños», pues esos infinitos complejos son precisamente lo que cualquiera podía esperar («Degeneration of turbulence in simple systems». *Physica D* 2, pgs. 30-37).

La predecibilidad/impredecibilidad del sistema atmosférico ha sido exhaustivamente tratada no sólo por Lorenz («The growth of errors in prediction» en *Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics*. Academic Press, 1985. «Dimension of weather and climate attractors», *Nature* 353, pgs. 241-244, 1991, «The essence of Chaos». University of Washington Press, 1993), sino por una multitud de Meteorólogos y Físicos, así como por Matemáticos que tardíamente (los trabajos se habían recluso en revistas de Física del Aire) advirtieron la trascendencia de los resultados, produciendo una respuesta masiva que hoy supera las 7.000 entradas en el compendio «Bibliography on Chaos» (Zhang-Shu-Yu, World Scientific, Singapur, 1991), sobre trabajos que trascienden el tema inicial para difundirse universalmente. Se abre en un momento histórico de euforia en la problemática de la predicción/previsión en otras ciencias: económicas, sociológicas, políticas, etc. a la búsqueda de soluciones no precisamente periódicas, como manifestaciones de fenómenos que parecerían repetirse. La teoría del caos ha abierto nuevos horizontes y en algunos ambientes científicos (Tsonis, Elsner y otros) la consideran como el descubrimiento más importante del siglo XX después de la Relatividad y de la Mecánica Cuántica. Su impacto habrá de sentirse destacadamente en nuestro campo de las ciencias atmosféricas. A fin de cuentas ese caos fue descubierto esencialmente por un Meteorólogo.