

## **Prólogo a los ensayos de un precursor y un alarife de la predicción moderna del tiempo**

Joaquín Pelkowski

Profesor Asociado, Departamento de Geociencias. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia

### **RESUMEN**

El objetivo de este breve artículo no es otro que el de servir de prólogo a las traducciones de dos ensayos de importancia histórica para la predicción moderna del tiempo atmosférico. Incluye también las semblanzas de sus autores, H. v. Helmholtz y V. Bjerknes.

### **ABSTRACT**

The purpose of this short article is but to serve as a preface to the translations of two essays of historical importance for modern weather prediction. It includes also brief biographies of their authors, H. v. Helmholtz and V. Bjerknes.

---

*« Parece muy oportuno a favor de la verdad que al paso que vayamos descubriendo el verdadero método de filosofar, vayamos también haciendo conocer las ilusiones centenarias »*

J. C. Mutis

Al igual que los pueblos antiguos sintieron la gran curiosidad por conocer el curso de los astros para organizar sus múltiples actividades socioculturales, la previsión del tiempo atmosférico no ha sido menos intrigante para ellos. Aunque la obra fundadora de la meteorología, *Los meteorológicos* de Aristóteles, no hace casi referencia a cuestiones relacionadas con la previsión del tiempo, su discípulo Teofrasto, en cambio, nos lega nada menos que 24 maneras de predecir la lluvia, 45 para indicar la dirección del viento, 50 para adivinar el acercamiento de una tempestad, y 7 reglas que supuestamente permitían conocer el tiempo durante el año a venir.

El mundo cristiano no concede mucho espacio a la racionalidad y las ciencias, colocando la fe por encima de la evidencia. Es testimonio de la decadencia intelectual en la Edad Media cristiana las siguientes pobres **especulaciones de Beda el Venerable (673-735)**, que se encuentran en sus *Prognostica temporum*: «Cuando el primero de enero caiga en un domingo, podemos esperar un buen invierno, una primavera ventosa,

un verano seco, buena vendimia; la ganadería prosperará, la miel será superabundante, ancianas morirán, la abundancia y la paz reinarán». Viene luego la era de la astrometeorología, y medran las especulaciones que ligan la meteorología y la astrología, que convierten la previsión del tiempo en una actividad secundaria de charlatanes, más que nada dedicados a adivinar los destinos de las grandes figuras políticas de su época. Como un ejemplo típico, podemos citar el caso de Justus Stoeffler (1452-1531), quien anuncia en sus efemérides impresas en 1499 que la conjunción de los astros provocaría un diluvio en febrero de 1524. Llega el temido febrero y no se produce siquiera una inundación digna de ese nombre. No obstante, el público sigue fiel a sus astrólogos. Los llamados pronósticos gozaban de un prestigio enorme en la Europa del siglo XVI. De entre las obras maestras de la astrometeorología cabe destacar el *Libro sobre la predicción del tiempo, del alquimista* inglés Robert Fludd (1574-1637), cuyas ideas se han perpetuado hasta nuestros días en obras sobre astrometeorología que no dejan de publicarse<sup>1</sup>. Sin embargo, en la Edad Media no todos los intelectos están supeditados a la fe o encadenados al marco aristotélico. Quizá el primero en superar los límites del marco aristotélico con un enfoque a la vez matemático y experimental, es Roger Bacon (hacia 1214-1294). También podemos mencionar a un "vándalo" de la astrometeorología, al teólogo francés Nicole Oresme (1323-1382), comentarista de Aristóteles, quien estaba convencido de que la previsión del tiempo era posible, pero al mismo tiempo reconociendo que su época no disponía de los medios para establecer sus reglas.

La meteorología no logra establecerse como ciencia exacta sino hasta el siglo XIX. En el siglo XVIII, Jean d'Alembert (1717-1783) y Leonhard Euler (1707-1783) sientan las bases de la hidrodinámica. En particular, Euler propone las conocidas ecuaciones diferenciales del movimiento de un fluido en 1752. Se cultiva entonces la teoría de las ecuaciones diferenciales (ordinarias), uno de cuyos frutos (metafísicos) es la concepción de un mundo determinista, que a principios del siglo XIX, el "Newton francés", P. S. de Laplace (1749-1827), expresa en un pasaje que no deja de citarse: *«Así pues, hemos de considerar el estado actual del universo como el efecto de su estado anterior y como causa del que ha de seguirle. Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero, nada te resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos»*. En otra ocasión se pronuncia claramente sobre el papel del azar: *«La palabra azar (chance) sólo expresa, por lo tanto, nuestra ignorancia de las causas de los fenómenos que observamos que ocurren y se suceden sin ningún orden aparente. La probabilidad es relativa en parte a nuestra ignorancia y en parte a nuestro conocimiento»*.

Este ideal laplaciano, de un estado inicial que determina los estados posteriores, inspiró la ciencia teórica del siglo XIX. Se refleja, por ejemplo, en una conferencia sobre ciclones y tempestades pronunciada en 1875 por Hermann von Helmholtz (1821-1894), uno de los científicos más importantes del siglo XIX, que termina así: *«De este modo persiste en nuestro horizonte científico el azar; pero en realidad es sólo la expresión de lo defectuoso que es nuestro conocimiento y de la torpeza de nuestra capacidad de combinación. Una mente que tuviera un conocimiento exacto de los hechos, y cuyas operaciones mentales fueran suficientemente rápidas y precisas, para adelantarse a los sucesos, no dejaría de ver en los más desenfrenados caprichos del tiempo, no menos*

*que en el curso de los astros, el operar armónico de leyes eternas, que nosotros sólo podemos dar por sabido y sospechar.»*

El mecanicismo subyacente en las ciencias matemáticas que culminó en el determinismo laplaciano, se infiltra, lenta y rezagadamente, en el campo de la predicción meteorológica. En la primera mitad del siglo XIX domina la climatología, hacia mediados se desarrolla la teoría térmica de los ciclones, y con ella se crea la meteorología sinóptica, que permite relacionar la presión y el campo de vientos en superficie. A fines del siglo, los pronósticos basados en mapas sinópticos se consideran como el fundamento más exacto, aunque en gran parte subjetivo, del arte de predecir el tiempo, y en particular las tormentas. El optimismo inicial se amortiguó a medida que se generalizaba el empleo de los mapas del tiempo. Los mapas del Atlántico no trajeron el éxito esperado. Cundió el desaliento, según el gran hidrodinámico noruego V. Bjerknes, en un discurso que pronunció en Leipzig en 1938. Pero Vilhelm Bjerknes (1862-1951), en un grandilocuente gesto de optimismo, esboza en 1904 un osado proyecto de espíritu plenamente laplaciano, que se puede considerar como la primera expresión completa y pormenorizada del problema de la predicción del tiempo, y hay quienes ven en él el inicio de la meteorología dinámica contemporánea (**Panchev**, 1989).

Es este clásico ensayo con el famoso programa de Bjerknes, que ofrecemos en versión castellana al lector de este número, junto con la traducción de la mencionada conferencia que Helmholtz dictara en 1875. Además de la expresión determinista que citamos anteriormente, en el ensayo de Helmholtz se encuentran apreciaciones acerca de una inestabilidad que hoy en día se conoce como "sensibilidad a las condiciones iniciales". Sendos esfuerzos, en 1908 por parte del meteorólogo austriaco Exner<sup>2</sup>, y en 1922 por parte del excéntrico inglés L. F. Richardson (1881-1953), de llevar a cabo el programa de Bjerknes, fracasan.

El intento frustrado de Richardson es bastante conocido de los meteorólogos. Las ecuaciones que utilizó para, su ambiciosa tarea eran innecesariamente completas, puesto que desafortunadamente describen toda clase de ruidos, ondas acústicas, y hasta la respiración de las plantas. Esta dificultad fue superada por el ruso Kibel (1904-1970), quien en 1940 propuso un principio básico para simplificar las ecuaciones hidrodinámicas: la expansión asintótica cuasigeostrofica, que filtra el ruido. La creación de una teoría de predicción a corto plazo fue basada posteriormente en este principio. El fracaso de Richardson obviamente no suscitó en Bjerknes el deseo de abandonar la técnica basada en mapas del tiempo que describe en su famoso artículo de 1904. Ese fracaso ha sido reseñado prolijamente.

El intento de Exner, en cambio, se ha ignorado en la literatura histórica. Exner extendió en 1908 su teoría, y demostró, mediante la integración de ciertas ecuaciones diferenciales, la posibilidad de su aplicación para el pronóstico de 12 a 24 horas por anticipado. Mediante este método se calcularon diariamente en el Servicio Meteorológico de Viena los pronósticos de las distribuciones de presión durante muchas semanas, y se compaginaban con el estado actual. En general se encontró que la concordancia no era mala. Los fracasos se pueden atribuir al hecho de que la teoría de Exner sólo tenía en cuenta los procesos térmicos en las capas bajas de la atmósfera, ignorando la influencia de las capas altas. *Las reflexiones teóricas de Exner constituyen el primer intento verdadero de calcular por anticipado los mapas sinópticos* (mi énfasis), su valor reside sobre todo en haber hecho hincapié en la importancia de las

corrientes horizontales en lo referente al cambio de la distribución de la presión. Su implementación en los servicios meteorológicos padecía de la desventaja de que el tiempo para realizar los cálculos dispendiosos era demasiado corto.

El programa de Bjerknes cobra nueva actualidad con el advenimiento de las computadoras electrónicas, hacia mediados del siglo XX. Pero tras su puesta en práctica, tan espectacular como alentadora<sup>3</sup>, se vuelve a descubrir aquella inestabilidad en los sistemas dinámicos de la que hablaba Helmholtz en su conferencia, hallazgo que contribuyó esencialmente a la creación de "una ciencia del caos", o "caología". Las implicaciones para el programa fundamental de la predecibilidad del tiempo atmosférico son de gran trascendencia. Al mismo tiempo, actualmente florece la termodinámica de los procesos irreversibles, con su tiempo cronológico unidireccional. Estas dos ciencias están convergiendo hacia una síntesis insólita, con posibles consecuencias nefastas para el programa de Bjerknes. La erosión actual del concepto de determinismo laplaciano, que no puede dejar indiferente al meteorólogo o climatólogo actual, será el tema de una contribución futura.

Aquí, por el contrario, me limito a presentar brevemente las traducciones de dos ensayos clásicos que son expresión típica del espíritu de la ciencia del siglo XIX, y que ofrecemos al lector de habla hispana, esperando brindarles un servicio a aquellos que no tengan conocimiento del idioma en que fueron publicados originalmente. Ambos ensayos son de gran interés histórico. El de V. Bjerknes es el más célebre, por lo menos ha sido citado frecuentemente. Pero el lector de la traducción del ensayo de Helmholtz podrá percatarse de que en él se encuentra el germen del programa que Bjerknes esbozara en 1904. Su ensayo, más largo y casi completamente desconocido, incluso para quienes pueden leerlo en su lengua original, revela que su autor tenía plena conciencia del papel de las inestabilidades atmosféricas, tan caras a nuestros modernos "caólogos". Es por estas razones que el ensayo de Helmholtz ha sido seleccionado como digno de darse a conocer a la comunidad meteorológica (que yo sepa, no existe traducción al inglés). La conferencia de Helmholtz se publicó en 1884 en sus "Conferencias y discursos".

En cuanto a la traducción, trato de ser fiel al contenido, evitando plegarme demasiado literalmente a su estilo, aunque sin sacrificar la costumbre teutónica de construir frases interminables. No dudo que la traducción es más torpe que el original, si de torpeza en el estilo del máximo representante de la ciencia alemana del decimonónico una persona como yo pueda atreverse a hablar. También confieso que no logré desentrañar unos dos o tres pasajes, que para mí siguen siendo oscuros (lo cual indico en notas de pie de página). La traducción de la famosa estrofa de Goethe que encabeza el ensayo de Helmholtz, ocasionalmente citada por meteorólogos anglosajones, es mía, y trata de ser tan trivial como el original.

Un tanto puede decirse acerca de la traducción del intrépido proyecto de Bjerknes, publicado en la más prestigiosa revista de la época, la *Meteorologische Zeitschrift*<sup>4</sup>, que desde este año podría cobrar nuevamente relieve, después de haber surgido de una fusión de revistas, entre ellas las *Beitraege zur Physik der Atmosphaere (Contributions to Atmospheric Physics)*, que dejó de existir en 1999.

Para redondear un tanto el marco histórico, considero que no es superfluo agregar unas semblanzas de Helmholtz y Bjerknes.

Hermann von Helmholtz nace en Potsdam en 1821 y muere en Berlín, en 1894. Se le puede considerar el científico alemán más versátil y famoso del siglo XIX. Formuló una versión matemática de la ley de conservación de la energía, midió la velocidad de los impulsos nerviosos, inventó el oftalmoscopio, entre otras cosas, e hizo importantes aportaciones a la física, las matemáticas, la medicina y la psicología. Su interés por la meteorología nació a raíz de la lectura del libro que publicara Th. Reye en 1872 sobre ciclones y tornados. Son famosas sus investigaciones sobre fluidos con densidades distintas, incluyendo el comportamiento de las superficies de discontinuidad. Introdujo el concepto de temperatura potencial, aunque el término se lo debemos a W. v. Bezold, importante físico y meteorólogo del siglo XIX, quien contribuyó a crear una termodinámica atmosférica. En 1888-89, Helmholtz propuso un modelo de circulación atmosférica, pero sin tener en cuenta intercambios turbulentos.



**Hermann von Helmholtz (1821-1894)**

En hidrodinámica, las contribuciones de Helmholtz fueron decisivas. En la primera mitad del siglo XIX, Cauchy (1789-1857) y Stokes (1819-1903) estudian la cinemática de los fluidos y el concepto matemático de vorticidad, y analizan flujos vortiginosos. En el movimiento de un fluido, cada pequeña parte del mismo puede considerarse como un cuerpo en rotación: el cuerpo puede o no estar en rotación de sí mismo. Si lo está, gira alrededor de un eje a una determinada velocidad, de modo que su rotación se puede representar mediante una flecha que apunta a lo largo del eje de rotación y tiene la longitud igual al doble de la velocidad angular. Este vector define la vorticidad. En 1858, Helmholtz enfoca el estudio de la vorticidad de una manera novedosa, publicando una serie de teoremas elegantes sobre líneas vorticales y tubos vorticales.

Uno de sus discípulos más brillantes fue el malogrado H. Hertz (1857-1894). En el año en que fallecen tanto él como Helmholtz, escribe un párrafo memorable que V. Bjerknes citaba con evidente admiración: *«Nuestro proceder, al derivar el futuro del pasado, consiguiendo así la previsión deseada, es siempre el siguiente. Establecemos imágenes subjetivas o símbolos de los objetos externos, de tal carácter que sus*

*consecuencias intelectualmente necesarias sean invariablemente símbolos, una vez más, de las consecuencias necesarias de la naturaleza del objeto representado.»*

Vilhelm Bjerknes (1862-1951) nació en Cristianía (actual Oslo), hijo del famoso matemático Carl Anton Bjerknes. Estudió en Oslo y luego pasó dos años con Hertz en Bonn. En 1895 fue nombrado profesor de mecánica y física matemática en la Universidad de Estocolmo, donde prosiguió las investigaciones de su padre, tratando de completar la analogía entre las fuerzas electromagnéticas y las hidrodinámicas. Es así como descubre en 1897 su famoso teorema de la circulación, que expresa la relación entre el cambio de la circulación de un rosario material de fluido y la baroclinidad (superficies isobáricas que no coinciden con las superficies isocóricas) del flujo. Este trabajo lo llevó al campo de la geofísica. Vio que su teorema podía explicar la creación de movimientos circulatorios en la atmósfera y el océano, y su puso a explorar la idea. Los teoremas clásicos de Kelvin y Helmholtz son válidos sólo para fluidos barotrópicos (en los que la presión es sólo una función de la densidad, y sin tener en cuenta efectos de viscosidad). Pero en los fluidos geofísicos la densidad cambia no solo con la presión, sino con fuentes de calor. La ciencia que resulta de combinar la hidrodinámica y la termodinámica fue bautizada, por Bjerknes, como dinámica física de fluidos.



**Vilhelm Bjerknes (1862-1951)**

Con su teorema de circulación y el concepto de un fluido general para el cual la densidad cambiaría como, resultado de un calentamiento (y acaso en virtud de un cambio en la composición), Bjerknes se percató de que podría por vez primera formular un conjunto completo de ecuaciones termodinámicas que gobiernan los procesos atmosféricos. Por consiguiente, propuso abordar en 1904 el problema de la predicción del tiempo como un problema de condiciones iniciales de la física matemática, en el que el estado inicial se habría de determinar a partir de observaciones, y el cambio futuro, integrando dichas ecuaciones.

En 1905 visita los Estados Unidos y recibe el apoyo de la fundación Carnegie para trabajar en problemas de predicción del tiempo, usando datos entonces recientes de los ascensos a capas superiores.

En 1913 es nombrado primer director del recién fundado Instituto de Geofísica en Leipzig, Alemania. En su discurso de inauguración hace hincapié en su enfoque teórico, y se muestra reacio a dejarse distraer por consideraciones prácticas. Los esfuerzos y recursos se han de concentrar en investigación puramente teórica: una conjugación de la hidrodinámica y la termodinámica hacia el problema de la predicción. Bjerknes era una figura muy carismática que inspiraba gran entusiasmo y ahínco entre sus colaboradores. El trabajo en Leipzig fue muy productivo hasta que estalla la Primera Guerra Mundial, cuando los militares empiezan a intervenir en la investigación. Empeoraron gradualmente las condiciones materiales y V. Bjerknes regresa en 1917 a su país natal, donde ocupa una cátedra en Bergen, Noruega. Allí, con un puñado de asistentes, entre ellos dos financiados por la Carnegie, Hesselberg y Solberg, continuó el trabajo teórico iniciado en Leipzig, pero debido a presiones propias de las circunstancias bélicas, el grupo tuvo que dedicarse a la predicción práctica para el sector que tenía que ver con la pesquería y la agricultura. Una ventaja de esta actividad consistió en que obtuvieron financiación gubernamental para el establecimiento de una red de observaciones asombrosamente densa.

En vista de su convicción de que las ecuaciones no cederían fácilmente la información que contienen, Bjerknes decide estudiar las ecuaciones linealizadas<sup>5</sup>. Los ciclones necesariamente han de ser, en sus estadios de formación, débiles, y por ello su descripción debería ser abordable mediante ecuaciones lineales. Escribe, en 1933, en un tratado sobre hidrodinámica física (redactado con dos coautores): «Sin embargo, las ecuaciones lineales siempre parecen tener como soluciones estables o inestables, movimientos *en forma de onda*. Igualmente, las perturbaciones atmosféricas, los ciclones, tienen, por consiguiente, que nacer como ondas. Hasta ahora, yo no tenía la menor idea de cómo se había de concebir la transición entre la onda aún no observada y el conocido vórtice».

Esta transición misteriosa fue descubierta en los mapas del tiempo, poco después, por Jack Bjerknes, hijo de V. Bjerknes. Este propone el modelo del ciclón frontal. Solberg escudriñó viejos mapas referentes al Atlántico Norte y logró demostrar la existencia del frente polar y la formación de perturbaciones onduladas en el mismo, que se convertían en ciclones frontales del tipo encontrado por J. Bjerknes. El cuadro fue completado por el sueco Tor Bergeron, que se había vinculado al grupo en 1919. Este encontró que a medida que el ciclón envejecía, su sector cálido desaparecía por oclusión, de modo que el aire frío invadía todos los niveles bajos del ciclón, mientras que el aire cálido era levantado hacia niveles superiores. El resultado fue un modelo ciclónico de cuatro dimensiones, con un cambio típico de estructura durante su ciclo de vida. En palabras de Hesselberg: «El ciclón nace como la onda incipiente en el frente de Solberg, se convierte en el ciclón ideal de Jack Bjerknes y termina sufriendo la muerte de oclusión de Bergeron». El éxito de la teoría frontal de la llamada escuela de Bergen la hizo famosa internacionalmente. Sus logros están documentados en obras recientes, notablemente por **Bergeron** (1981), **Friedman** (1989), y **Nebeker** (1995).

En 1919 V. Bjerknes viaja a Suecia a reclutar nuevos colaboradores, uno de los cuales fue Carl Gustaf Rossby (1898-1957), estudiante de matemáticas, mecánica y

astronomía. Por intervención de V. Bjerknes, terminó siendo uno de los meteorólogos más significativos del siglo XX, aunque no se le puede considerar como un discípulo de aquél. Rossby no aceptó nunca totalmente las ideas de la escuela de Bergen sobre el frente polar como agente principal, responsable de la producción del tiempo atmosférico. Cuando empezaron a disponer de mapas de altura en los años 30, Rossby dirigió su atención hacia sistemas motores de gran escala, especialmente las ondas largas de los ponientes superiores. Su modelo barotrópico, junto con su famosa fórmula de ondas, formaron la base de nuevas ideas que han sido de singular trascendencia en meteorología y oceanografía. En 1938 definió el concepto de vorticidad potencial para un océano estratificado.

J. Bjerknes, quien siguió profundizando su estudio de la estructura tridimensional del ciclón, convirtió, a partir de 1940, y con la colaboración de J. Holmboe, otro asistente de V. Bjerknes el departamento de meteorología de la universidad de Los Angeles en uno de los centros de investigación de punta. Otros discípulos famosos de V. Bjerknes fueron V. W. Ekman (quien descubrió la famosa espiral que lleva su nombre), y J. W. Sandstroem (quien estableció el teorema que lleva su nombre y que enuncia que para que la atmósfera se comporte como una máquina térmica, el calentamiento ha de tener lugar a mayores presiones que el enfriamiento).

V. Bjerknes es sin duda alguna uno de los más importantes meteorólogos del siglo XX. Helmholtz, como uno de los científicos más destacados y significativos del siglo XIX, aportó mucho a la hidrodinámica teórica, y puede por ello reclamar para sí el título de precursor de la meteorología moderna. Esperamos que la traducción de dos ensayos de tan importantes figuras en la historia de la meteorología, sea de algún provecho, no solamente para quien esté convencido de la importancia de recurrir directamente a las fuentes, sino incluso para orientar o inspirar la investigación actual.

---

<sup>1</sup> Recientemente adquirí un libro, publicado en 1988, sólo guiándome por su prometedor título *Principles of Astronomical Meteorology*, escrito por un rumano, cuyo nefando nombre no revelaré, obra que resultó ser un tratado sobre astrometeorología tan primitivo que no merece recomendación sino como ejemplar para un gabinete de aberraciones intelectuales del siglo XX.

<sup>2</sup> Exner nace en 1876 y muere en 1930.

<sup>3</sup> Véase el artículo "50 años de predicción numérica del tiempo", en este mismo número.

<sup>4</sup> Bjerknes, V., 1904: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 21,1 7.

<sup>5</sup> Linealización se convirtió, con refinamiento, en el método predilecto en meteorología dinámica (Lorenz, 1996).

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

Bergeron, T. 1981: Synoptic meteorology: an historical review, Pure and Applied Geophysics, 119:443 473.

Eliassen, A. 1982: V. Bjerknes and his students. Ann..Rev. Fluid Mechanics.

Friedman, R.M. 1989: Appropriating the Weather: Vilhelm Bjerknes and the Construction of a Modern Meteorology, Ithaca and London, Cornell University Press, 286 pp.

Lorenz, E. 1996: The evolution of dynamic meteorology. Historical Essays on Meteorology, American Meteorological Society, Boston, 586 pp.

Nebeker, F. 1995: Calculating the Weather: Meteorology in the 20 th century. Academic Press, San Diego, 251pp.

Panchev, S. 1989: Dynamic Meteorology. Elsevier, Amsterdam, 324 pp.