

La Escuela Noruega de Meteorología: una ojeada retrospectiva

por Manuel PUIGCERVER

Departamento de Física de la Tierra y del Cosmos, Universidad de Barcelona (Centro Coordinado del C.S.I.C.).

ABSTRACT

A brief historical account of the inception of scientific weather forecasting is presented, particular emphasis being placed on the findings and achievements of the so-called Norwegian School. Some remarks are made concerning the human traits of those men who laid the foundations of modern meteorology. The spreading of the Norwegian method to other countries, a slow and difficult process at the beginning, is briefly discussed.

RESUMEN

Se presenta una breve relación de los comienzos de la predicción científica del tiempo, prestando especial atención a los descubrimientos y logros de la Escuela Noruega de Meteorología. Se dan algunos datos sobre los aspectos humanos de quienes echaron los cimientos de la meteorología moderna. Se discute brevemente la difusión de los métodos noruegos a otros países, proceso que al principio fue lento y no desprovisto de dificultades.

INTRODUCCIÓN

El tema de esta contribución se ha escogido por varias razones: el interés del ilustre Prof. Dr. Solé Sabarís por la historia de la Ciencia, que presumiblemente no se ciñe a la ciencia catalana; el estar relativamente cerca de su campo de especialización; y finalmente, el reciente fallecimiento del Profesor Tor Bergeron, con quien desaparece el último miembro del núcleo inicial de la Escuela Noruega.

El presente autor ha conocido personalmente a varios de aquellos y ha sido discípulo de otros, lo que bastaría para rendir tributo a su labor; pero además, teme que en nuestro país nada se escriba al respecto. Sin embargo, los descubrimientos de la Escuela Noruega constituyeron en su día una revolución en la manera de pensar en Meteorología, y algunos de ellos han desafiado el paso del tiempo convirtiéndose en pilares de dicha ciencia. Vale la pena de echar un vistazo al panorama de la Meteorología a comienzos de siglo y a la inesperada incursión vikinga y sus resultados.

LOS ALBORES

El estudio del tiempo con vistas a su predicción — ahora llamado diagnóstico — puede hacerse desde dos puntos de vista que coinciden con los métodos de Euler y de Lagrange de la Mecánica de fluidos. El enfoque euleriano (mantener fijas las coordenadas y observar la variación con el tiempo de las

magnitudes de interés) parece más apropiado en Meteorología, donde la inmensa mayoría de observatorios están fijos. Mediante una red suficientemente densa de observaciones simultáneas y un sistema de comunicaciones para reunir las rápidamente en una estación principal, las observaciones se pueden representar sobre un mapa geográfico y analizarlas para conocer la situación a la hora considerada. Este procedimiento, llamado *método sinóptico*, había ya sido propuesto por Brandes en 1820, pero fue relegado al olvido en parte por falta de procedimientos adecuados de transmisión, y en parte a causa de los buenos resultados obtenidos por Dove (1827, 1828) mediante el *método local*.

Dove, que tenía una superior facultad de observación, llegó a inferir la existencia de las que él llamó «corriente polar» y «corriente ecuatorial», haciendo hincapié en seguir el movimiento de las masas de aire y sus líneas de encuentro. Este es el enfoque de Lagrange (partículas identificables mediante coordenadas de numeración y estudio de la variación de las magnitudes siguiendo el movimiento de la partícula) y contiene el germen de los descubrimientos de la Escuela Noruega 80 años después.

Los Servicios Meteorológicos europeos se crearon en el decenio 1860-1870 por accidente cuando, en 1854, una violenta borrasca alcanzó en el Mar Negro a la escuadra anglo-francesa durante la guerra de Crimea y le causó graves daños.

El concepto de la Física en la época era determinista: se aceptaba que, conocido el estado de un sistema físico en un instante t_0 y las leyes que lo rigen, puede conocerse su estado en cualquier instante posterior $t + \Delta t$. El descubrimiento de Neptuno por Galle a partir de los cálculos de Leverrier — sin duda uno de los más bellos éxitos científicos de todos los tiempos — se consideró la confirmación definitiva. Además era común — entonces y ahora — la idea de que, aunque más compleja, la Meteorología es básicamente la misma clase de ciencia que la Astronomía. Si ésta podía, como lo había demostrado, predecir la existencia de un planeta desconocido, aquella debía poder pronosticar la formación de un temporal. Consiguientemente, el emperador Napoleón III encargó a Leverrier la creación de un servicio meteorológico en Francia.

Leverrier recopiló las observaciones meteorológicas de observatorios astronómicos, universidades y observadores individuales — frecuentemente asociaciones médicas — refe-

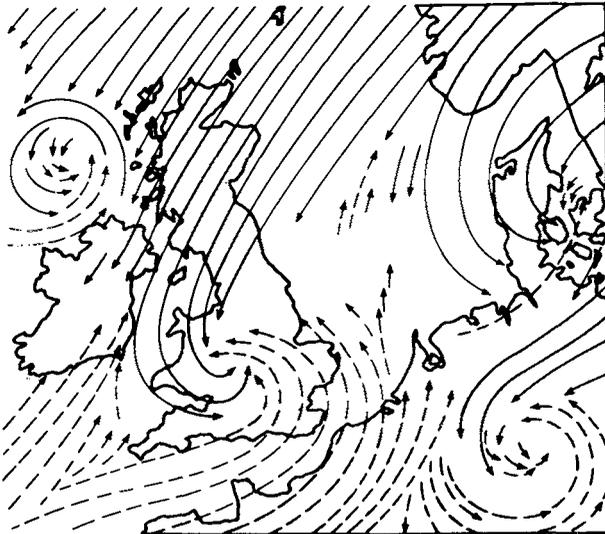


Fig. 1. Esquema, según Fitzroy, de la interacción entre el aire polar (línea llena) y el ecuatorial (de trazo) mostrando la formación de vórtices depresionarios en la frontera entre ambas masas de aire. Nótese que Fitzroy se equivocaba en cuanto al diámetro de las depresiones extratropicales. (Reproducido de Petterssen (1969) por cortesía de McGraw-Hill Book Co.)

rentes al temporal de Crimea, las transcribió sobre un mapa, redescubriendo el método sinóptico de Brandes de 1820, y analizó el campo de presión trazando líneas isobaras. Juzgados con criterios actuales, sus mapas eran toscos y de escasa densidad de observaciones, que, en cambio, eran de alta calidad, al haber sido realizadas por científicos solventes (Kington, J. A.: comunicación personal). El análisis de Leverrier mostró que la famosa borrasca había seguido una trayectoria bastante regular moviéndose a lo largo de ella con velocidad casi constante. La conclusión concordaba con la idea determinista: La trayectoria de las depresiones era pronosticable. Bastaba con una red suficiente de observatorios adecuadamente dotados que realizasen observaciones simultáneas y las transmitiesen telegráficamente (el telégrafo se conocía desde 1845) a una oficina central donde se analizarían los mapas.

Casi al mismo tiempo (1863), el Almirante Fitzroy había desarrollado un modelo de vórtice depresionario (fig. 1), basado en su dilatada experiencia marinera, que nuevamente postulaba la existencia de las corrientes polar y ecuatorial de Dove. Fitzroy propugnaba la creación de un servicio de predicción en las Islas Británicas, lo que consiguió pese a las reservas de la Royal Society y a las advertencias del propio Leverrier, quien sabía que su investigación no había siquiera tocado el problema físico del origen y crecimiento de las depresiones. Incidentalmente, se tardó 80 años en formularlo sobre una firme base física: lo hizo Sutcliffe en 1947. Sin embargo, los comienzos del Meteorological Office bajo la dirección de Fitzroy y con el concurso de Sir Francis Galton fueron prometedores. El método sinóptico se combinó con el punto de vista lagrangiano de Fitzroy; Galton llegó a construir mapas de líneas de corriente e ideó el registro de las variables atmosféricas más importantes — presión, temperatura, humedad, precipitación y viento— sobre la misma banda («meteorogramas»); y finalmente, la red británica de observaciones era en 1873 tan densa como en 1913: Sir Napier Shaw (1934) comenta que prosiguiendo ese camino

hasta el final, los frentes pudieron haber sido descubiertos en 1869 en lugar de 1919.

Gracias a estos esfuerzos, varios países europeos tenían hacia 1870 servicios meteorológicos que emitían regularmente pronósticos del tiempo. El que éstos se convirtieran gradualmente en fuente inagotable de chistes y perdieran todo crédito se debe a dos desgraciadas circunstancias: por una parte, la prematura muerte de Fitzroy en 1865 y la emigración de Galton a otros campos de la Física; por otra, la obstinada e irracional defensa del método local por Dove, negándose a aceptar cualquier perfeccionamiento que proviniera del método sinóptico. Como resultado, sus ideas se transformaron en símbolo de dogmatismo anticuado e intransigente, favoreciendo la difusión del método que atacaba.

Este tiene en sí muchos méritos y ventajas prácticas, pero la falta de modelos con base física en los últimos decenios del siglo XIX había convertido su empleo en un problema rutinario, tratando de reconocer en el mapa alguna de las siete configuraciones isobáricas propuestas por Abercromby en 1878 y 1885, a cada una de las cuales se suponía asociada una clase específica de tiempo. Esto, junto con la intuición del predictor constituía la base de la predicción del tiempo a finales del siglo pasado y comienzos del presente.

Un fugaz destello de genio lució en 1906, cuando W. N. (Sir Napier) Shaw y R. G. K. Lempfert (1906) presentaron su modelo ciclónico (Shaw, 1911; Fig. 3, a), que incluía la existencia de dos masas de aire distintas en una depresión (todavía tratadas como «corrientes») retornando al enfoque lagrangiano de Dove y Fitzroy. El modelo explicaba la precipitación en el frente cálido y en el frío; la vaguada entre la corriente fría del E al norte de ella y la corriente fría o fresca del W al sur está probablemente asociada a una ocusión retrocurvada, como ha hecho observar Bergeron (1959) y se interpreta en la fig. 3, b. Aunque que quizá no claramente formulados, allí estaban los elementos esenciales del esquema noruego de 1919. Pero parece que Shaw quedó tan impresionado por la teoría de la compensación de Dines, que consideró inútil mejorar su modelo, perdiendo la oportunidad de descubrir la evolución de las depresiones. Paradójicamente, las palabras de Shaw referentes al modelo de Fitzroy son aplicables al suyo propio por la misma razón.

Tal era el sombrío panorama de la ciencia meteorológica a finales de siglo, cuando Vilhelm Bjerknes, joven y oscuro profesor de Física Teórica, fue llamado de su nativa Noruega a explicar Mecánica en la Universidad de Estocolmo.

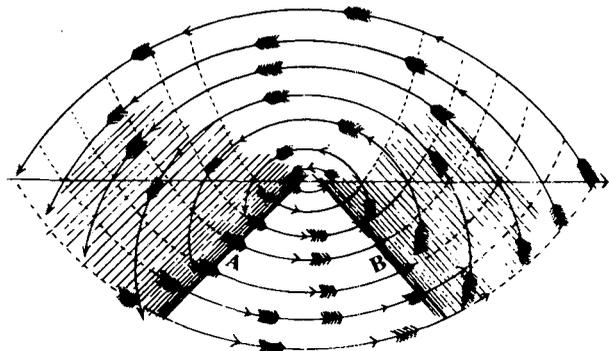


Fig. 2. Modelo de depresión de Jinman, capitán mercante británico. Es asimétrico e incorpora un sector cálido limitado por dos «confluencias» a lo largo de las que se concentra la precipitación. Aunque muy idealizado, es obvia su semejanza con el modelo noruego de 60 años más tarde. (Reproducido de Petterssen (1969) por cortesía de McGraw-Hill Book Co.)

EN EL BUEN CAMINO

Vilhelm Bjerknes tenía entonces 31 años. Su padre, Carl Anton Bjerknes, fue un físico que intentó formular una analogía hidrodinámica del campo electromagnético y Vilhelm trató de proseguirla aportando sus propias ideas: como resultado, descubrió los ahora famosos teoremas de la circulación. Partiendo de ellos echó los cimientos de una Hidrodinámica física aplicable a las atmósferas y los océanos que incluía consideraciones energéticas y termodinámicas. Ello es característico de V. Bjerknes: siendo básicamente un teórico, nunca perdió de vista las aplicaciones.

En su famosa monografía de 1898, Bjerknes da el primer paso hacia la formulación racional, teórica y práctica, de la Meteorología y la Oceanografía. En 1904, en una conferencia pronunciada en Washington, expuso su programa para la creación de una Meteorología Dinámica en estas palabras: «Todo problema atmosférico se puede reducir a establecer la posición y movimiento de todas las partículas de aire implicadas y predecir su futuro estado, posición y movimiento en un instante dado mediante las leyes de la Física: un problema que en principio debe ser susceptible de solución. Ésta debe comprender tres pasos: (1) Realizar el mejor diagnóstico posible de los estados atmosféricos; (2) Hallar la posición futura de todas las partículas, y (3) Determinar sus estados futuros en las nuevas posiciones».

El resultado fue la concesión de una ayuda de la Institución Carnegie que duró 36 años. Gracias a ella, Bjerknes —una de cuyas cualidades era la detección de talentos— pudo emplear a tres brillantes jóvenes (J. W. Sandström, Theodor Hesselberg y Olaf Devik, posteriormente sustituido por H. U. Sverdrup) con quienes publicó los dos primeros volúmenes de su *Dynamic Meteorology and Hydrography*. Pero pronto vio que un físico poco conocido no podría efectuar las reformas prácticas que requerían los servicios meteorológicos para proseguir el tratamiento teórico que él proyectaba. Por eso aceptó la cátedra y la dirección de un Instituto de Geofísica que la Universidad de Leipzig le ofreció en 1912.

Le acompañaron Hesselberg y Sverdrup, a los que se unieron Halvor Solberg y su hijo Jakob («Jack») Bjerknes, ambos de unos 20 años. Los comienzos fueron prometedores: varios jóvenes se unieron al Instituto, destacando H. Petzold; se ensayaron nuevas técnicas de análisis, particularmente el trazado de líneas de corriente, que puso de manifiesto la existencia de «líneas de convergencia» como característica habitual en los mapas de tiempo. V. Bjerknes y Petzold habían especulado sobre su posible naturaleza física; J. Bjerknes y Solberg mostraron su aparente relación con áreas de lluvia.

EL FLORECIMIENTO: LA ESCUELA DE BERGEN

Las condiciones en Alemania eran penosas en 1917. Los discípulos alemanes de Bjerknes estaban en filas, y Petzold había caído en Verdún. V. Bjerknes fue llamado a su país para fundar un Instituto Geofísico en Bergen cuando Noruega estaba virtualmente aislada, sin poder importar alimentos y casi incomunicada.

Los Bjerknes mostraron otra vez su sentido práctico. En 1918, la agricultura y la pesca en Noruega necesitaban vitalmente un servicio eficaz de predicción del tiempo; además, ellos deseaban continuar sus estudios sobre las líneas de convergencia. Lograron multiplicar por diez la

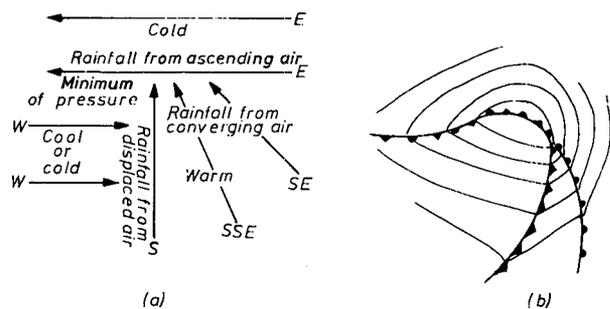
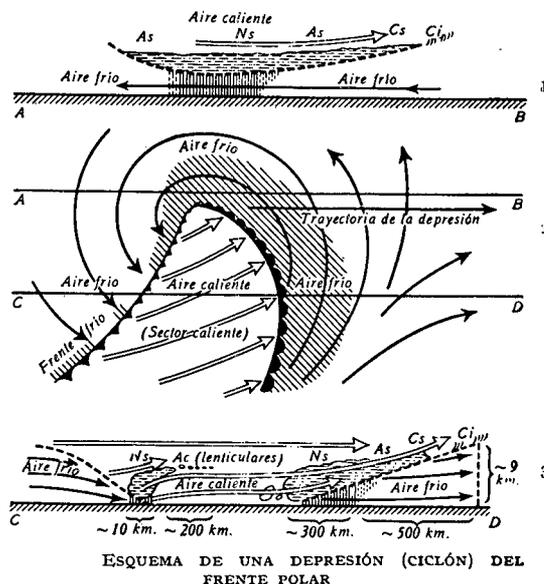


Fig. 3. a) El esquema de Shaw, mostrando la distribución de viento, precipitación y temperatura en una depresión extratropical. b) Interpretación moderna, según el autor, del esquema a).

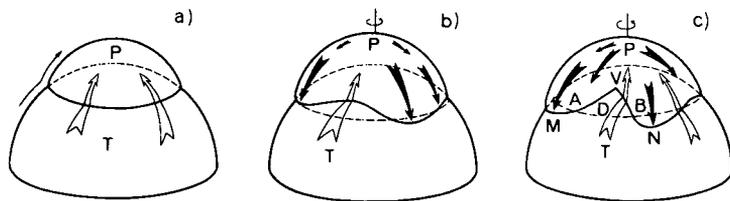


ESQUEMA DE UNA DEPRESIÓN (CICLÓN) DEL FRENTE POLAR

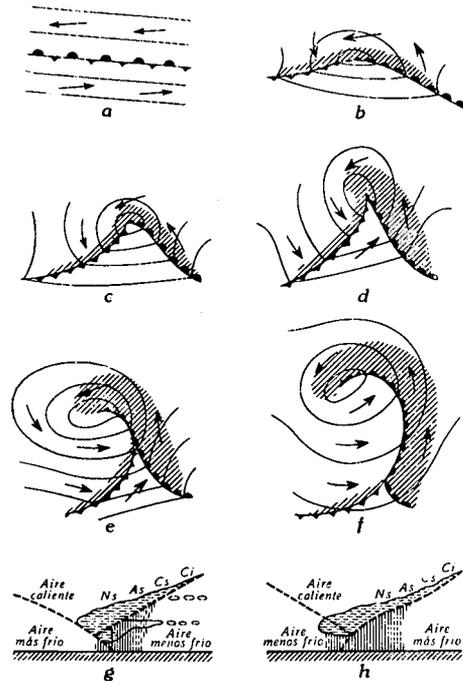
- 1) Corte vertical de la depresión según la línea AB, situada al norte de la misma.
- 2) La depresión proyectada sobre el mapa.
- 3) Corte vertical de la parte meridional de la depresión según la línea CD del esquema 2. (Según J. Bjerknes)

Fig. 4. El modelo ciclónico de J. Bjerknes (1918) incorporando las modificaciones introducidas en 1921. (Cortesía de Editorial Labor).

densidad de estaciones de observación en el Sur de Noruega e introdujeron nuevos elementos en las observaciones: nubes, visibilidad y precipitación, que en sus manos condujeron a la aerología indirecta. Los observadores, escogidos entre marinos o pescadores retirados (gente acostumbrada a observar el tiempo) y adiestrados personalmente por los Bjerknes, sentían el orgullo del buen profesional —el trabajo bien hecho— que garantizaba la calidad de las observaciones. Además, V. Bjerknes logró, con Hesselberg, ahora director del Instituto Meteorológico Noruego, establecer dos nuevas oficinas de predicción, la de Bergen dirigida por Jack Bjerknes y la de Oslo por Solberg. El prestigio de los Bjerknes y su labor de «fichaje de talentos» atrajeron a Bergen a varios jóvenes de los que muchos han dejado su nombre en la historia de la Meteorología: Rosseland en 1918, Tor Bergeron, Bjorkdal y Carl-Gustaf Rossby en 1919; poco más tarde, Erik Palmén y Sverre Pettersen.



1)



Esquema de la evolución de una depresión, según I. Bjerknes y H. Solberg, con oclusión del frente frío

2)

Fig. 5. 1) Formación de ondas en el frente polar según las ideas de Bjerknes y Solberg. (Reproducido de Puigcerver (1968) por cortesía de Editorial Labor). 2) Ciclo de vida de una depresión según Bjerknes y Solberg (cortesía de Editorial Labor).

Vilhelm Bjerknes discutía diariamente sus ideas con sus discípulos, pero les dejaba total libertad para ensayar innovaciones. Por otra parte (Bergeron 1959, 1962), aquellos jóvenes, de sólida formación física y matemática, sabían poco de la meteorología entonces clásica y nada de los métodos de análisis en uso en la época. Podían pues romper con ideas preconcebidas si discrepaban de los hechos, y éstos se detectaban mejor que en cualquier época anterior (y mejor que ahora) gracias a la densidad de la red noruega.

Los resultados no tardaron. En 1919 publicó Jack Bjerknes su histórica monografía «On the Structure of Moving Cyclones», que por primera vez describe los frentes frío y cálido (todavía llamados líneas de convergencia) y da una explicación física tridimensional de los movimientos de aire en la depresión, justificando los hidrometeoros (nubes y precipitación) característicos de cada clase de frente (Fig. 4). Bjerknes también indica el origen de la energía de la depresión como transformación de la energía potencial de masas de aire yuxtapuestas. Ello ya se apuntaba en el clásico trabajo de Margules de 1905, de igual manera que el modelo ciclónico de Bjerknes aparece vagamente intuido en el de Shaw (fig. 3, a). El genio de Bjerknes estriba en haber reunido porciones dispersas de verdad integrándolas en un cuadro tridimensional coherente y apoyado en buenas observaciones.

Sin embargo, el modelo era todavía estático. La clave de la evolución de las depresiones llegó casi simultáneamente por las vías experimental y teórica. Tor Bergeron se dio cuenta hacia 1919 de que el sector cálido se va estrechando al transcurrir el tiempo y llega a perder contacto con el suelo, proceso llamado oclusión. Bjerknes y Solberg, en otra monografía histórica (1922) introdujeron la idea de que las

depresiones se originan como ondulaciones en la superficie de separación de las dos masas de aire polar y tropical, ahora ya llamada frente polar, usando la terminología bélica en boga. Con ello se podía seguir el ciclo de vida de las depresiones desde su origen como ondas de pequeña amplitud en el frente polar, pasando después a depresión joven con onda de amplitud creciente (fig. 5) y ulterior oclusión hasta su desaparición como un vórtice inmerso en el aire frío. De paso, Bergeron introdujo su teoría de la precipitación, que requiere la coexistencia de cristales de hielo y gotas de agua en el interior de la nube; para nubes «frías», sigue siendo básicamente válida en la actualidad.

Sin embargo, a Halvor Solberg no le satisfacían los métodos semiempíricos de sus colegas. Su idea era establecer los fundamentos físico-matemáticos de la teoría ondulatoria de las depresiones; para ello, emprendió con V. Bjerknes una investigación para demostrar que en una superficie de discontinuidad inclinada, como el frente polar, se podían formar ondas capaces de crecimiento. El problema era complicado y el resultado no fue un éxito completo, pero demostró que con ciertas restricciones, tal crecimiento era posible. Estos trabajos (Solberg, 1928; V. Bjerknes et al., 1933), menos conocidos, contienen el fundamental descubrimiento de la inestabilidad baroclínica.

Así, la Escuela de Bergen había conseguido establecer una sólida base teórica del nuevo modelo de depresión al mismo tiempo que elabora un método de análisis que además de proporcionar una descripción lógica del estado del tiempo, contenía los elementos necesarios para predecir su evolución. El cuerpo de doctrina elaborado por la Escuela de Bergen está contenido en la monumental *Physikalische*

Hydrodynamik. En cinco años se había avanzado más que en toda la historia de la predicción del tiempo. Todavía más, pocos son los descubrimientos modernos que no estaban ya contenidos, explícitamente o intuitivos, en las ideas de la escuela noruega.

Gran parte del mérito se debe a V. Bjerknes: a su excepcional claridad de ideas, a su facultad de interpretar físicamente resultados matemáticos, a su acierto en la elección de colaboradores de talento y sobre todo, al espíritu que supo inspirar a su grupo junto con los principios que informaron la filosofía de la Escuela de Bergen y que pueden sintetizarse así:

1) La predicción del tiempo podía enfocarse racionalmente como problema físico. 2) Las leyes físicas debían ser aplicables a estados atmosféricos individuales. 3) Se necesitaba una red de estaciones lo bastante densa para poderla emplear directamente en el cálculo de derivadas. 4) La mejora del método sinóptico requería un nuevo modelo de transcripción y la introducción de la orografía en los mapas impresos. 5) Era esencial el enfoque lagrangiano, analizando el mapa mediante el trazado de isógonas, líneas de corriente e isotacas en lugar de limitarse al campo de presiones. Posteriormente, Bergeron incorporó el análisis isobárico —de mala gana al principio— al método noruego. Pero las líneas de corriente ya habían cumplido su finalidad, pues sin ellas es muy posible que nunca se hubiera descubierto el frente cálido, mucho menos conspicuo que el frío en los mapas. 6) Finalmente, toda observación que no fuese claramente errónea se debía poder interpretar en términos de algún proceso físico.

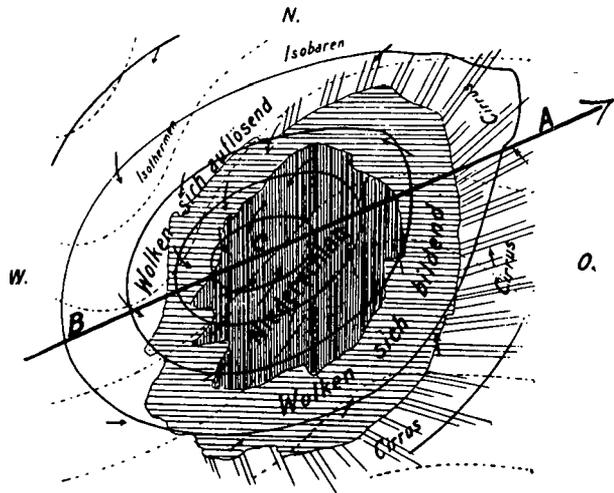


Fig. 6. Modelo ciclónico que figuró durante 25 años en las sucesivas ediciones del texto de J. von Hann y todavía se consideraba válido en Europa Central en 1930 (Bergeron, 1959).

Pero el afán y la pasión científica que caracterizó al grupo de Bergen no se explican sin la inspiración de Vilhelm Bjerknes y la dirección inmediata de Jack. Ambos poseían mentes analíticas e inquisitivas, un sorprendente sentido práctico y una fabulosa capacidad de trabajo. En la oficina meteorológica de Bergen no había «horas de trabajo». Vilhelm, con plena confianza en Jack y su grupo, ponía a contribución su personalidad y prestigio cuando había que defender las ideas de «sus chicos» frente a las escuelas tradicionales. A su vez, sus discípulos veneraban al «viejo»

Bjerknes, en parte debido a su extremada modestia: Así, comentando su papel en los fundamentales descubrimientos de su escuela, explicaba (Bergeron, 1962): «Durante cincuenta años, los meteorólogos han estado mirando mapas del tiempo sin descubrir nada importante. Yo no he hecho más que dar la clase conveniente de mapas a los chicos apropiados, y éstos no tardaron en descubrir las arrugas en la faz del Tiempo».

LA DIFUSIÓN DE LOS DESCUBRIMIENTOS

Al leer, incluso ahora, algunos trabajos del grupo de Bergen, la primera impresión es de un aplastante sentido común. La segunda es de admiración ante esta impresión de sencillez tratando de cuestiones complicadas: cosa nada sorprendente sabiendo quienes formaban el grupo.

En la época de la Escuela de Bergen estaba reciente la separación de Suecia y Noruega con la consiguiente independencia de ésta, pero los Bjerknes y su grupo resistieron la tentación y publicaron todos los trabajos importantes en alemán (entonces idioma científico por excelencia) o en inglés, lo que aseguraba su difusión.

Naturalmente, la intrusión de unos inexpertos jovencitos escandinavos acaudillados por un físico teórico no fue bien recibida por los meteorólogos centroeuropeos. El presente autor oyó a Bergeron el siguiente comentario: «...Argumentaban: Primero, que los frentes no existían; y segundo, que de haber existido, los habrían descubierto los centroeuropeos» (aludiendo pudorosamente a las escuelas de Frankfurt y Viena). El modelo ciclónico de la fig. 6, similar al de Abercromby, aparece intacto en las cuatro ediciones del prestigioso *Lehrbuch der Meteorologie* de Julius von Hann (desde 1901 a 1926) y se usó en Europa hasta 1930. En el «Daily Weather Report» del Meteorological Office británico no comenzaron a publicarse frentes hasta 1933 (Douglas, 1952), y el U. S. Weather Bureau no los adoptó (Reed, 1977) hasta 1938. El presente autor los introdujo en las oficinas meteorológicas de Barcelona, ¡en 1950!

La difusión de los descubrimientos de la escuela noruega y sus métodos de trabajo no fue, pues, fácil ni rápida. Se expusieron por primera vez ante una audiencia internacional influyente en una conferencia de directores de servicios meteorológicos celebrada en Bergen en 1921 pero aún transcurrirían quince años hasta ser generalmente aceptadas. Lentamente, sin embargo, el método noruego fue imponiéndose, en parte por su mérito intrínseco y en parte como consecuencia de la labor «misionera» desarrollada por los miembros del grupo.

El resto es historia reciente. Gracias al radiosonda, ideado casi simultáneamente en Rusia por Moltchanoff y en Francia por Bureau, la aerología se transformó de indirecta en directa. La densidad de la red de radiosondeos se incrementó enormemente como consecuencia de la segunda guerra mundial y se mantuvo después. El grupo de Chicago, encabezado por Rossby (antiguo discípulo de Bjerknes) estableció la existencia de la corriente en chorro y de las ondas cortas y largas en ella y analizó sus propiedades dinámicas. Los teoremas de la vorticidad, el descubrimiento de la conservación de la vorticidad potencial y ciertos avances tecnológicos (radar meteorológico, teletipo, facsimil y satélites de comunicaciones, ordenadores y satélites meteorológicos) han conducido a modelos teóricos del comportamiento de la atmósfera que incorporan creciente detalle y

permiten pronosticar mapas futuros mediante métodos dinámicos y empleo de ordenadores. El planteamiento ha cambiado, pero nos hemos acercado al objetivo de la vida científica de V. Bjerknes: el diagnóstico del estado presente de la atmósfera para obtener, a partir de él, el estado futuro mediante integración respecto al tiempo de las ecuaciones hidrodinámicas, ya intentada sin éxito por L. F. Richardson casi treinta años antes del primer ordenador.

El punto de vista moderno dista mucho del enfoque determinista. Sabemos ahora que la atmósfera tiene un límite inherente de previsibilidad, que se estima entre cinco días y tres semanas e incluso hay indicaciones de que se puede haber alcanzado ya. La formulación de Laplace o aun de Bjerknes parece hoy curiosamente arcaica. Pero el que se haya podido llegar a donde hoy estamos se debe en muy gran parte al infatigable esfuerzo y a la claridad de ideas de un pequeño grupo de hombres que en el primer cuarto de siglo trabajaban en una pequeña oficina de una pequeña ciudad de un pequeño país: La Escuela Noruega de Meteorología.

BIBLIOGRAFÍA

- BERGERON, T. (1928): Über die dreidimensionale verknüpfende Wetteranalyse. — *J. Geof. Publ.*, 5, N.º 6.
- BERGERON, T. (1959): Methods in Scientific Weather Analysis and Forecasting. — *The Atmosphere and the Sea in Motion*, The Rockefeller Institute Press, New York, pp. 440-474.
- BERGERON, Y. (1962): Vilhelm Bjerknes, March 14, 1862 — April 9, 1951. 2. The Stockholm period, y 4 The Bergen School. En *In Memory of Vilhelm Bjerknes on the 100th Anniversary of his Birth*. *Geof. Publ.*, Geoph. Norv., XXIV, pp. 11-15 y 16-21.
- BJERKNES, J. (1919): On the Structure of the Moving Cyclones. — *Geof. Publ.*, 9, N.º 9.
- BJERKNES, J. y H. SOLBERG (1922): Life Cycle of Cyclones and the Polar Front Theory of Atmospheric Circulation. — *Geof. Publ.*, 3, N.º 1.
- BJERKNES, V. (1904): Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und Physik. — *Meteor. Z.*, 21, pp. 1-7.
- BJERKNES, V., J. BJERKNES, H. SOLBERG y T. BERGERON (1933): *Physikalische Hydrodynamik mit Anwendung auf die dynamische Meteorologie*. Verlag Julius Springer, Berlin.
- DOVE, W. H. (1827): Einige meteorologische Untersuchungen über den Wind. — *Pogg. Ann.*, 11, p. 545.
- DOUGLAS, C. K. M. (1952): The Evolution of 20th Century Forecasting in the British Isles. *Reviews of Modern Meteorology*, 4. — *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 78, 335, pp. 1-21.
- HANN, J. von (1901): *Lehrbuch der Meteorology*, I. Aufl., Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft.
- PETTERSEN, S. (1940): *Weather Analysis and Forecasting*. McGraw-Hill Book Co., New York.
- PETTERSEN, S. (1969): *Introduction to Meteorology*, 3er ed. McGraw-Hill Book Co., New York.
- PUIGSERVER, M. (1968): Estado actual de la Meteorología. En *Avances del Saber* (Enciclopedia Labor, Vol. X), pp. 80-109. Ed. Labor, Barcelona.
- REED, R. J. (1977): The Development and Status of Modern Weather Prediction. Bjerknes Memorial Lecture. — *Bull. Am. Met. Soc.*, 58, 5, pp. 390-401.
- SHAW, W. N. y R. G. K. LEMPFERT (1906): *Life History of Surface Air Currents*. Meteorol. Committee, M. O. 174, London.
- SHAW, W. N. (1934): The March of Meteorology. — *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 60, p. 101.

Recibido, junio 1978.