

Evolución científica de la meteorología

Scientific evolution of meteorology

Francisco Valero Rodríguez

Académico Correspondiente de la Sección de Ciencias Experimentales de la Real Academia de Doctores de España. valero@ucm.es

An. Real. Acad. Doct. Vol 2, Nº 3, (2017) pp. 412-426.

RESUMEN	ABSTRACT
<p>El discurso trata de desvelar los vínculos significativos de la evolución histórica de la meteorología desde una perspectiva científica. Para ello hemos adoptado recrear un recorrido cronológico de los hitos más relevantes intentando combinar tanto los de carácter empírico, básicamente observacional, como los de signo teórico. Aunque los orígenes escritos de la meteorología se remontan a Aristóteles, hemos considerado más provechoso ceñirnos a los últimos 400 años, ya que en ellos es cuando puede hablarse propiamente de progreso científico general en sentido lato. A pesar de que el inicio de la ciencia moderna y, por ende de la meteorología, está cimentado en las observaciones y descubrimientos de Galileo, Boyle y Newton, todavía a finales del siglo XVIII, la física de la atmósfera no se identificaba como una disciplina separada. No es hasta el siglo XIX cuando el determinismo laplaciano convierte la meteorología en ciencia exacta y, paralelamente desde el punto de vista operativo, los progresos de la ciencia meteorológica comienzan a ser mejor aprovechados con el descubrimiento tecnológico del telégrafo.</p> <p>No obstante, es en la centuria comprendida entre 1850 y 1950 cuando la meteorología se convierte definitivamente en una disciplina plenamente consolidada a través de las trascendentales contribuciones de von Helmholtz, Bjerkness y Richardson sobre dinámica atmosférica y el novedoso planteamiento matemático de la predicción numérica del tiempo. A partir de entonces, con el advenimiento de los ordenadores y el espectacular desarrollo de su capacidad computacional, es cuando se irrumpe en el</p>	<p>The speech tries to reveal significant linkages of the historical evolution of the meteorology from a scientific perspective. To do this a chronological survey of the most relevant milestones has been undertaken bringing together both empirical, basically observational, and theoretical ones. Although the writings of meteorology origins go as far as back as Aristoteles in the ancient Greece, we have considered more profitable to stick to the last 400 years, since it is in them that one can properly speak of the actual overall scientific progress in a broad sense. While the beginning of modern science, and hence of meteorology, is grounded in observations and discoveries of Galileo, Boyle, and Newton, the physics of the atmosphere at the end of the eighteenth century was not yet identified as a separate discipline. It was not until the 19th century when the Laplacian determinism turned meteorology into exact science and, at the same time from the operational point of view, advances in meteorological science began to be better exploited with the technological discovery of the electric telegraph.</p> <p>It is, however, in the century between 1850 and 1950 when meteorology finally becomes a thoroughly consolidated discipline through the far-reaching contributions of von Helmholtz, Bjerkness and Richardson on atmospheric dynamics and the novel mathematical approach to the numerical weather prediction. With the advent of computers and the striking development of computational capacity, it is that one enters the exciting world of the deterministic numerical prediction until a paradigm shift occurs, under which Lorentz, in</p>

<p>apasionante mundo de la predicción numérica de tipo determinista hasta que en los años sesenta del siglo XX se produce un cambio de paradigma bajo el cual Lorentz contempla a la atmósfera como un sistema caótico en el que el azar y lo no predecible juegan un papel vital y determinante, lo que permite el desarrollo de sistemas o modelos de predicción por conjuntos, que representan el enfoque actual de la predicción meteorológica. Para finalizar, se hace una reflexión acerca de cuáles son los límites y el futuro de la predicción meteorológica en torno a un período inmediato.</p>	<p>the sixties of the 20th century, considers the atmosphere as a chaotic system where the random and unpredictability play a vital and determining role, allowing the development of ensemble prediction systems or models that constitute the current focus of the weather and climate forecast.</p>
<p>Palabras clave: meteorología, observación, teoría, hitos científicos, centuria 1850-1950, predicción numérica determinista y por conjuntos, perspectivas.</p>	<p>Keywords: Meteorology, observation, theory, scientific milestones, century 1850-1950, numerical deterministic and ensemble forecast, future prospects.</p>

Algo he aprendido en mi larga vida: que toda nuestra ciencia, contrastada con la realidad, es primitiva; y, sin embargo, es lo más valioso que tenemos.

Albert Einstein(1879-1955)

CONTEXTUALIZACIÓN

Antes de abordar la temática del discurso considero indispensable hacer mención del contexto en el que la meteorología se inscribe, empezando por su definición como disciplina científica.

Definición de Meteorología

El Diccionario de la Lengua de la Real Academia Española, la recoge como *ciencia que trata de la atmósfera y de los meteoros*. Definición escasamente aclaratoria (lo mismo que el término “meteorólogo” cuya controversia denominativa está muy en boga).

Ya desde hace 24 siglos, Aristóteles entendía el término en un sentido más amplio: *"Todos los efectos que se pueden llamar comunes al aire y al agua y las formas y partes de la Tierra y los efectos de sus partes"*, un enfoque que no desentona con el actual.

Pero es el profesor Catalá de Alemany en su Diccionario de Meteorología de 1986 quien la define en su sentido más pleno como la *"Ciencia que estudia la atmósfera y que comprende el estudio del tiempo y del clima, que constituyen ciencias bien distintas, aunque no siempre diferenciadas por el gran público. Se ocupa del estado físico, dinámico y químico de la atmósfera terrestre (y de los demás planetas) así como de las interacciones mutuas entre la atmósfera y la superficie terrestre, tanto en la hidrosfera como en la litosfera"*.

¿En qué contexto científico nos introduce la meteorología? En el de la complejidad y la incertidumbre.

Complejidad

Como sabemos, el aire es un fluido contenido en la atmósfera terrestre, de 40km de espesor, compuesto por una mezcla de gases muy variados y reactivos calentada por un enorme reactor nuclear distanciado 150 millones de kilómetros girando solidariamente con una esfera sólida irregular de 12800 km de diámetro a

una velocidad de 1600 km/h. Este conjunto constituye un sistema termodinámico cuya descripción física entraña un inabordable tratamiento matemático y es de imposible control directo.

¿Qué podemos hacer entonces? “**Montar**” un laboratorio virtual mediante modelización numérica, de complejidad enorme para simular su estado, comportamiento y evolución, lo que representa un gran desafío, siempre en las fronteras del conocimiento.

Este discurso constituye un acercamiento personal que transcurre a través de la exposición y simplificación de los **hitos científicos** determinantes en la evolución de la meteorología para finalizar centrándose en el instrumento último de la **predicción del tiempo**, es decir, la **modelización numérica**, laboratorio ineludible, diferenciado y característico de la ciencia meteorológica moderna, tanto en su vertiente aplicada como de investigación, que hace de la meteorología una ventana para disfrutar en las fronteras científicas y tecnológicas actuales.

El hombre desde tiempo inmemorial ha tenido curiosidad por contestar, entre otras, la pregunta: *¿qué tiempo va a hacer?*, cuestión que nunca ha dejado de tener interés, mucho interés en la actualidad, no solo con carácter general en el ámbito social, sino particularmente en el de la I+D+i científica.

El término «**meteorología**» proviene (del título) del libro *Meteorológica* escrito hacia el año 340 a.C. por **Aristóteles**, que especula sobre el origen de los fenómenos atmosféricos y celestes, y cuya vigencia se prolongó hasta el XVII aproximadamente, marcando el origen temporal de este discurso.

Desde entonces la ciencia meteorológica comienza ya a emanciparse de sus orígenes aristotélicos, si bien los pronósticos del tiempo aún perduran en refranes o aforismos populares como por ejemplo “*Sol muy rojo, agua en el ojo*”(con fundamento físico demostrado hoy día), pero también en reglas acientíficas sobre la temperie como las conocidas “*cabañuelas*”, que son testimonio de la decadencia intelectual reinante en la Edad Media cristiana y de especulaciones de la astro-meteorología en el panorama de conocimientos imperante al inicio del siglo XVII.

PERIODO XVII-XVIII. DESARROLLO INSTRUMENTAL Y DE LA CIENCIA MODERNA

A partir del XVII se transformaron las visiones antiguas y medievales sobre la naturaleza y se sentaron las bases de la ciencia moderna. Como acabamos de mencionar, tuvieron que transcurrir muchos siglos desde Aristóteles para percatarnos de que **el aire tenía masa y peso** y de nuestra capacidad para

construir **instrumentos** que los midiesen. La evolución instrumental de **observación** meteorológica en el siglo XVII fue sorprendente: el invento del termómetro de **Galileo**, en 1607, y del barómetro de **Torricelli**, en 1643, permitieron que la temperatura y presión del aire, elementos descriptivos básicos de la atmósfera, pudiesen ser cuantificados por primera vez. A estos siguieron los desarrollados para la velocidad y dirección del viento con el anemómetro de **Hooke** en 1667.

En este siglo se iban experimentando a la vez grandes cambios derivados de las contribuciones de **Pascal** (1648) acerca de las variaciones de la presión con la altitud, de **Boyle y Mariotte** (1662) sobre la ecuación de los gases ideales que permitía determinar el estado de la atmósfera, que se comportaba, a su entender, a modo de materia elástica, como un “muelle de aire”, concepto desarrollado y conocido actualmente como compresibilidad. **Descartes** (1596-1650), en su *Discurso del método* (1637), marca una ruptura con la tradición escolástica al estimular la generación de ideas y conceptos nuevos sobre los fenómenos atmosféricos.

En este hábitat científico la meteorología se erige en **ciencia métrica**, propiciando la creación de teorías novedosas de algunos fenómenos, como la enunciada por **Halley** en 1686 sobre el régimen de los vientos alisios y monzones que se originaban por lo que hoy conocemos como “*convección térmica*” macroescalar, que le permite plasmar el primer modelo de circulación atmosférica en la franja intertropical.

En 1687 **Newton** (1643-1727), a menudo, citado como el científico más grande de todos los tiempos, y su obra como la culminación de la revolución científica, habla ya de partículas y publica sus *Principia* que contienen, entre otras, las “*leyes del movimiento*” y de la “*gravedad*”, de trascendencia universal y, ¡cómo no!, para el desarrollo de la meteorología. La noción de predecibilidad según él existe con carácter diferencial, pero no necesariamente integral.

En los albores del Siglo de las Luces hubiera sido inconcebible el cultivo de la filosofía al margen de las ciencias y de éstas al margen de aquella. Los saberes científicos admitían que un mismo individuo cultivase a lo largo de su vida diferentes disciplinas, canon del sabio ilustrado. De ahí que el binomio conocimiento y avance instrumental animase al desarrollo de la ciencia moderna y, por ende, al de la meteorología.

Como fruto de este contexto **Hadley** en 1735 propone el mecanismo atmosférico de autosostenimiento de los vientos alisios posteriormente conocido en su honor como circulación unicelular de Hadley, factor determinante de la circulación general de la atmósfera, que describía los alisios como circulaciones térmicas modificadas por la rotación terrestre. Más adelante, D’Alembert y Euler

sientan las bases de la hidrodinámica. **D'Alembert** (1744) enunciando las ecuaciones de las "mareas de aire" en referencia a los vientos, y, en 1752, **Euler** formulando las ecuaciones del movimiento en la forma que hoy son familiares a los físicos y que supuso un "*gran avance científico en la dinámica de fluidos*", al referenciar los cálculos a un sistema no inercial o acelerado (que incumple las leyes del movimiento de Newton).

Llama la atención el caso paradigmático de **sabio ilustrado** del eminente filósofo **Kant** con su teoría de los vientos, en 1756, recogida en su *Physische Geographie*, primer manual de meteorología y climatología, o de **Dalton**, fundador de la teoría atómica moderna, que recupera seis décadas después la olvidada teoría de Hadley en su *Meteorological Observations and Essays*, donde reconocía con una honestidad infrecuente la prioridad de Hadley en el descubrimiento, pese a haberla deducido independientemente de este.

Laplace (1749-1827), considerado el "Newton francés", recoge en 1776, persuadido por la *física newtoniana*, el aforismo: "... *hemos de considerar el estado actual del universo como efecto de su estado anterior y como la causa del que ha de seguirle*", donde el **azar** es solo un fenómeno aparente, yendo más allá que el propio Newton al significar que en el mundo físico todo es predecible en sí. El **mecanicismo laplaciano** inspira la ciencia teórica del siglo XIX, como consecuencia del impulso aportado por la teoría de las ecuaciones diferenciales ordinarias, uno de cuyos frutos de índole metafísica es la concepción de un mundo determinista, el laplaciano, que se va infiltrando lenta, rezagada y paulatinamente en el campo de la previsión meteorológica, consiguiendo con ello que la **meteorología** se establezca como **ciencia exacta**.

En la otra vertiente del conocimiento, la empírica, domina entretanto, en la **primera mitad** del siglo XIX, la climatología y nace la **cartografía sinóptica**, que se proyecta hasta la mitad del XX, permitiendo comparar las observaciones meteorológicas realizadas simultáneamente a lo largo de una amplia zona. Se brindaba como instrumento básico para la investigación científica, pero no para informar sobre la evolución atmosférica en un plazo de utilidad práctica. Hacia **mediados**, con el impulso aportado por el **telégrafo** (Morse, 1840) que constituyó un **hito universal y, muy especial, en la meteorología**, se produjeron rápidos avances que conformaron la teoría térmica de los ciclones, y con ella la meteorología sinóptica, que permitió relacionar la presión y el campo de vientos en superficie. A **finales del siglo**, los pronósticos basados en mapas sinópticos se consideraban el fundamento más exacto, aunque en gran parte subjetivo, del arte de predecir el tiempo.

Se observan, no obstante, **graves limitaciones en la previsión meteorológica sinóptica** al no poder incorporar aún las características y

propiedades termodinámicas identificadoras del estado de la atmósfera pues, por entonces, la física atmosférica marchaba aún rezagada respecto a otras ramas de la física. A pesar de la importancia de la observación en el progreso de la ciencia, es la **teoría** la que constituye su esencia y la que **permite unificar** todas sus ramas de conocimiento.

En aquel tiempo la Física admitía ya aislar los campos de estudio. Pero la atmósfera demanda integrar todas las influencias. Y, no solo eso, sino que la atmósfera por su propia idiosincrasia **esquiva el laboratorio** y, por si fuera poco, la tecnología de la época se encuentra en un estado incipiente de desarrollo de la observación, inexcusable e inaplazable, en los niveles altos de una atmósfera 3D, por lo que constituye una asignatura fundamental aún pendiente.

LA CENTURIA 1850-1950

Pues bien, con estos mimbres, entramos en la centuria, que podríamos denominar “prodigiosa”, que comienza hacia 1850 y que supone para muchos, entre los que me incluyo, el nacimiento de la **moderna meteorología teórica**.

Las ecuaciones eulerianas de la hidrodinámica permitieron incorporar la física newtoniana en forma de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales a la atmósfera. Por otra parte, se consigue destilar la información termodinámica derivada de su primer principio, formulado en 1824 por Carnot, permitiendo con ello completar la formulación integral de las ecuaciones, nuestro laboratorio, atributo clave de la ciencia atmosférica, que marca el **nacimiento de la meteorología como disciplina científica**.

Basándose en la ecuación general del movimiento de Laplace y, a sabiendas ya del efecto de Coriolis (confirmado por la experiencia del péndulo de Foucault en 1851), William **Ferrel**:

- Actualiza y contextualiza (en 1859) la formulación matemática de los movimientos atmosféricos.
- Introduce (en 1878) el concepto de viento térmico que permite adentrarse en la tercera dimensión espacial, es decir, incorporar cierta estructura tridimensional a la atmósfera.
- Deduce así mismo la existencia de una segunda célula meridional, distinguida con su nombre, con dirección de transporte de aire contraria a la de Hadley.

En este torrente de ideas el eminente científico Hermann **von Helmholtz**, cuyas contribuciones a la dinámica de vórtices fueron decisivas, encauza en 1858 el estudio de la vorticidad (elemento cuantificador de la rotación del fluido) y crea una serie de elegantes teoremas sobre las inestabilidades atmosféricas, incorporando el concepto de temperatura potencial y proponiendo un modelo de circulación de la atmósfera sin intercambios turbulentos.

En una conferencia sobre ciclones y tempestades pronunciada, en 1875, manifiesta que en el *horizonte científico persiste el azar* como una realidad de lo defectuoso que es nuestro conocimiento (y de la limitación de nuestra capacidad).

En el tránsito al siglo XX surge un científico excepcional, el noruego Vilhelm **Bjerknes** (1862-1951), colaborador del eminente físico Heinrich Rudolf **Hertz**, descubridor del efecto fotoeléctrico y de la propagación de las ondas electromagnéticas, a su vez discípulo de Helmholtz.

Bjerknes traslada a la meteorología sus sólidos conocimientos en física teórica y muy especialmente en dinámica de fluidos que le permiten enunciar en 1897 su famoso teorema de la circulación atmosférica, más consumado que los de Kelvin y Helmholtz, y percatarse de su estado *solenoidal*, en la que el flujo tiende a rotar en torno a un eje, consiguiendo con ello forjar el concepto de *circulación* no solo como medida del movimiento rotatorio del fluido sino también de su dirección, positiva para la ciclónica y negativa para la anticiclónica. Su poderoso y hegemónico teorema consagra la **integración de la meteorología en la física**, y llega a ser reconocido mundialmente como **padre de la meteorología moderna**.

“Los teoremas de circulación crearon el **vínculo** entre la hidrodinámica clásica y la termodinámica clásica asentando los cimientos de la *hidrodinámica física*” o simplemente hidrodinámica en la actualidad.

No menos importante fue su **manifiesto**, en 1904, que constituye un **revolucionario** planteamiento del pronóstico meteorológico como un *problema matemático de valores iniciales partiendo de la observación tridimensional de la atmósfera*, es decir, implantando la forma matemática de resolver un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales para predecir cómo cambiará la atmósfera con el tiempo sometida a unas condiciones iniciales específicas. Adviértase que ha transcurrido casi un siglo desde Laplace para que el problema del pronóstico del tiempo meteorológico se identifique con un problema de valores iniciales de la física clásica. Sin embargo, su talento le permite percatarse y advertir de la imposibilidad de resolverlo mediante soluciones analíticas, aunque lo intenta (sin éxito) por “métodos de cálculo gráficos”, sin abandonar la técnica basada en mapas del tiempo. Sería, empero, la **aproximación precursora, la semilla, de la predicción numérica posterior**.

En los 20 del siglo XX, con su equipo de jóvenes colaboradores, muchos de los cuales también ocupan un lugar destacado en la historia de la meteorología, su hijo Jakob ("Jack"), Carl Gustav Rossby, Thor Bergeron, Havor Solberg y otros meteorólogos que formaban la llamada "escuela noruega o de Bergen", desarrollaron la teoría de la evolución de los ciclones, de sus masas de aire y de los frentes asociados, que conformaban la **teoría del frente polar** o simplemente teoría frontal, por la cual *“un ciclón nace como una onda incipiente en un frente, se convierte propiamente en ciclón y completa su ciclo vital sucumbiendo por oclusión”*. Esta teoría constituyó la *“entidad vital generadora del tiempo meteorológico”*, su columna vertebral, y supuso otra aportación fundamental que adquirió dimensiones internacionales.

Jack Bjerknes siguió perfeccionando la estructura 3D del ciclón a partir de 1940 en el Departamento de Meteorología de UCLA hasta su muerte en 1975 convirtiéndolo en un centro de investigación puntera y “exportador” de modelos de predicción numérica.

En los 30, al hacerse viable la utilización de radiosondas transportados por globos capaces de transmitir las medidas de presión, temperatura y humedad, se inicia, durante y poco después de la segunda guerra mundial, la creación de redes de estaciones de observación meteorológica en las capas altas del aire, que permitieron por primera vez la confección de mapas de los niveles superiores de todo el hemisferio norte.

Rossby, coetáneo de Jack, introduce el efecto centrífugo de la rotación terrestre sobre los movimientos relativos que le conduce a un modelo de circulación general de la atmósfera basado en tres circulaciones convectivas, dispuestas meridionalmente en cada hemisferio, que se acepta como una descripción cualitativa de la circulación en la atmósfera terrestre y, en seguida, dirige su investigación a las ondas largas atmosféricas (a gran escala) consideradas estas como los elementos motrices del tiempo, consiguiendo que su famosa expresión, junto a su modelo barotrópico, formen la base de la meteorología y oceanografía, de gran trascendencia en física.

En resumen, se podría afirmar que si **Helmholtz** fue uno de los científicos más destacados y significativos del **XIX**, pudiendo reclamar para sí el título de **precursor de la meteorología moderna**, Vilhem **Bjerknes** es, sin duda alguna, uno de los más importantes meteorólogos, si no el que más, del siglo **XX**, **pionero de la meteorología moderna**.

Formando parte de esta centuria, en los albores del XX, es imprescindible y obligatorio destacar la contribución de Lewis F. **Richardson**, que fue el primer científico que afrontó en 1910 la predicción numérica a través de las ecuaciones de la física, si bien de forma todavía “manual”. En este fecundo marco de carácter

analítico es inevitable no solo citar, sino realzar su trascendental obra “*Predicción del tiempo por procesos numéricos*” que plasma el **método numérico** de resolución de las ecuaciones meteorológicas (las primitivas, las originales, las completas). Genial, brillante, “simplemente” se había adelantado varios decenios a su tiempo.

Las ecuaciones que utilizó para su ambiciosa tarea eran “innecesariamente completas”, pues con ellas lamentablemente se reproducían toda clase de ruidos meteorológicos, ondas acústicas... y hasta la fluctuación del aire producida por el aleteo de las mariposas.

Su aplicación a un caso concreto tan simple actualmente como el pronóstico de la presión del aire en superficie, en aquellos tiempos de escasez de datos observacionales y de capacidad de cálculo (eran manuales), fue un rotundo fracaso; no obstante, su estrategia sentó las **bases inequívocas** de la actual predicción numérica del tiempo, constituyendo un **hito** de superación y evolución científica.

Desde Richardson el interés por la predicción numérica del tiempo fue decayendo hasta que en los años 50 se anima gracias a la expansión de las observaciones meteorológicas y al desarrollo de los primeros computadores que permiten situar otro punto inflexión hacia una nueva era, la de la predicción numérica del tiempo contemporánea.

No hay que olvidar la crucial aportación, en 1928, de Courant, Friedrichs y Levy, cuyas iniciales **CFL** son hoy día una referencia en **análisis numérico**, que van unidas al método de resolución de las ecuaciones en derivadas parciales por diferencias finitas que, garantizando la estabilidad de cálculo, supuso un enorme empujón a la resolución numérica del problema de la predicción del tiempo.

Durante el periodo entre guerras Rossby introduce a su vez un cambio radical que abre una vía a la predicción numérica empleando como variable fundamental, en lugar de la presión, la componente vertical de la vorticidad con la que consigue, con su modelo barotrópico, una ecuación **simplificada** que filtra el ruido atmosférico, para el pronóstico solo del movimiento medio troposférico, pero realista para los medios disponibles entonces.

1950... PREDICCIÓN NUMÉRICA CONTEMPORÁNEA

En efecto, en 1946 entra en escena el primer y mayor integrador numérico electrónico del mundo, ENIAC, capaz de resolver la tediosa integración matemática, necesaria para predecir el tiempo.

Nace el ideal de John von Neumann. Brillante polímata del siglo XX que considera que “el pronóstico del tiempo simulando la dinámica de la atmósfera es, *por excelencia*, un problema científico propio a resolver por medio de un gran computador”. Plantea los siguientes escenarios:

El A, consistente en integrar las ecuaciones primitivas, representa una cuestión de enorme complejidad que plantearía problemas similares al de Richardson al tener que resolver numéricamente las ecuaciones completas o primitivas del movimiento. El escenario B, contemplaba integrar el sistema cuasigeostrofico baroclínico (de complejidad intermedia), lo que aún demandaba excesiva capacidad computacional, y, por último, un tercer escenario C, dedicado a resolver la ecuación de vorticidad barotrópica, de complejidad asumible, cuyos resultados iniciales fueron muy satisfactorios.

En efecto, cuatro años más tarde, en 1950, von Neumann se pone manos a la obra en el Instituto de Estudios Avanzados (IAS) de Princeton cuyo director, también del archiconocido proyecto Manhattan, era Robert Oppenheimer, con un equipo compuesto por el propio von Neumann y diversos meteorólogos, entre los que se encontraban Charney y Fjörtoft, y cuya consecuencia fue el logro de un ENIAC mejorado que produjo el primer pronóstico del tiempo por medio de técnicas de predicción numérica, eso sí, bajo el escenario simplificado C que imponía la hipótesis barotrópica, muy restrictiva respecto al planteamiento inicial de Richardson, cuya virtud era reducir el sistema a una única ecuación diferencial para la vorticidad, que no reproducía, obviamente, estructura vertical alguna de la atmósfera. **¡El proceso de cálculo les llevó, no obstante, más tiempo que el alcance del pronóstico que se pretendía!**

A partir de **1960**, con ordenadores IBM 360, se consiguen ya predicciones operativas en tres niveles de la atmósfera, relajando la **hipótesis barotrópica** bajo un principio básico de filtrado de las ecuaciones hidrodinámicas (de complejidad intermedia, escenario B), que elimina el ruido. La creación de una teoría de predicción a corto plazo se cimentó posteriormente en este principio.

Simultáneamente se acrecentaba la capacidad observacional. En **1960** se inicia la vertiginosa y fructífera carrera de los primeros **satélites meteorológicos polares** (Tiros I) y el **geoestacionario** (ATS I) que abrían un horizonte de mejoras inimaginable.

Fue sobre todo a partir de **1970** con la llegada de los procesadores vectoriales y su notoria potencia de cálculo cuando se consiguen relajar las hipótesis anteriores y que la atención recaiga en las **ecuaciones primitivas** (escenario A), aportando resultados en 10 niveles y “*haciendo realidad el sueño de Richardson*”.

Concurrentemente, se estandarizan y organizan en redes los radares meteorológicos, abriéndose una perspectiva enorme de progreso en meteorología.

Paralelamente, se iban resolviendo los problemas de falibilidad de los datos y de diseño de esquemas de integración que permitían que los modelos de ecuaciones primitivas, los de la clase A, fuesen al menos computacionalmente tan económicos como los modelos filtrados y, por supuesto, que corriesen al menos tan rápidamente como los procesos atmosféricos para poder ser usados en predicción operativa diaria en los servicios meteorológicos nacionales. Hoy día todos los modelos numéricos operativos son de este género.

Durante mucho tiempo la idea de que en el universo existía un orden total y continuo fue algo innegable; de hecho, hasta hace muy poco, nuestra cultura de la predecibilidad ha estado impregnada de mecanicismo, con la obsesión de predecir cualquier fenómeno desde una perspectiva determinista. Pero, en tiempos recientes surge el **nuevo paradigma** de contemplar la realidad desde un enfoque holístico, en donde cualquier factor, por pequeño que parezca, puede afectar al comportamiento y la evolución de la naturaleza.

Uno de los primeros en comprender que la mecánica clásica encerraba en sí misma la semilla de lo impredecible fue Edward **Lorentz** (catedrático de Meteorología en el MIT). En 1963, mientras trabaja en predicción numérica del tiempo, observa que la evolución del clima, gobernada por ecuaciones no lineales, muestra un comportamiento caótico aun cuando sus leyes son plenamente deterministas como consecuencia de que una diminuta modificación de los datos iniciales conduce a un resultado en absoluto similar al original. Del entendimiento de estos factores y sus relaciones surge el cambio de modelo epistemológico en el que **el azar y lo no predecible juegan un papel fundamental**.

Para enfocar y tratar este cuerpo de conocimiento se crean los **SPC (sistemas de predicción por conjuntos)** que permiten obtener un agregado de pronósticos, tantos como perturbaciones del estado inicial de la atmósfera provoquemos, hecho que requiere enormes capacidades computacionales.

El esparcimiento o disgregación de los pronósticos se va haciendo mayor a medida que se alarga el alcance predictivo hasta “inundar” por completo todo el dominio, momento en el que carecería ya de sentido hablar de capacidad predictiva.

Recientemente ha surgido una nueva disciplina: la **meteorología planetaria**. Se considera una generalización de la meteorología terrestre cuyo objeto de estudio es universal y aplicable a los distintos planetas (recordemos la definición tan intuitiva de meteorología aportada por Catalá de Alemany en 1986). El estudio de las atmósferas planetarias fomenta un espacio creativo muy amplio

que aborda el estudio e investigación de la composición, presión superficial, densidad, circulación general, temperatura, viento, actividad erosionadora de la atmósfera, transporte de energía y perfiles en altura de temperatura, densidad y presión, entre otros aspectos.

LÍMITES Y PERSPECTIVAS DE LA PREDICCIÓN DEL TIEMPO

A pesar de las continuas mejoras de los pronósticos meteorológicos realizados con los modelos numéricos hay que rendirse a la evidencia de la imposibilidad de lograr predicciones precisas más allá de un cierto límite. **La existencia de este límite se debe a varias razones:** las imperfecciones ligadas a la computabilidad de los modelos numéricos que simulan la atmósfera; las incertidumbres inherentes a las medidas necesarias para determinar el estado inicial, y, con ello, la sensibilidad a los datos iniciales que presentan los sistemas no lineales, reflejada en el atractor extraño o de Lorentz, y el carácter no lineal intrínseco del modelo, arraigado en la misma naturaleza de las operaciones a realizar.

Los modelos de predicción numérica globales en 1975 estaban en su infancia con capacidad de pronóstico que no alcanzaba tres días. Hoy día se acercan a la semana.

¿Qué nos deparará el futuro dentro de unos 15 años? Cuestión difícil de contestar porque el devenir científico y tecnológico es inimaginable. Aunque resulta aventurado extrapolar tendencias hasta **2030**, si lo hiciéramos, nos llevaría a una reducción del tamaño de malla horizontal de hasta algún kilómetro y a un aumento de capacidad predictiva adicional de dos días, respectivamente.

La investigación meteorológica en este ámbito se encuentra en el momento actual en las fronteras del conocimiento que pasa por adoptar la aproximación integrada del sistema terrestre (envoltorio fluido e **interacciones** con sus límites), hacia un **sistema de predicción numérica ambiental** de formidable complejidad científica en la que juega un papel esencial la doble estrategia de, por una parte, la **alineación** hacia un sistema de predicción numérica terrestre o global y, por otra, la de **asimilación** de datos meteorológicos, para generar las condiciones iniciales óptimas. De facto, las técnicas de **asimilación de datos**, que tienen su origen en meteorología, y son la aspiración en cualquier otra disciplina, ya están siendo trasplantadas a otras ramas de la ciencia, de cuyo resultado conjunto se espera un horizonte muy fructífero en predicción.

Todo ello decantará avances realmente notables no solo en el medio plazo (hasta 10 días) sino en las escalas mensual y estacional. Y no solo esto, si

fortalecemos la solidez de esta aproximación, conseguiremos también predecir patrones a gran escala y transiciones de regímenes atmosféricos hasta con cuatro semanas de adelanto y anomalías a escala global hasta con un año de antelación, y avanzar también en el conocimiento de la meteorología de otros planetas.

El **futuro** exige y exigirá el avance en las siguientes líneas de actuación, todas ellas de gran envergadura: la **científica**, la **observacional**, pues quien no hace observación no mejora la ciencia, y la **computacional**, ya que sin laboratorio no hay ciencia. La supercomputación es la encargada de arrancar y hacer caminar los modelos numéricos, nuestro laboratorio de simulación y predicción.

Las eficiencias observacional y computacional son los principales aliados de los científicos para construir mejores modelos predictivos para representar, explicar y pronosticar los fenómenos de carácter meteorológico, de extraordinaria complejidad. Por ello, su perfeccionamiento conducirá a una ciencia meteorológica aún más sólida, extensa y, por tanto, de mayor utilidad y aplicabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

BUIZZA, R., (2002). Chaos and weather prediction. Meteorological Training Course Lecture Series. ECMWF.

CATALÁ DE ALEMANY, J., (1986). Diccionario de Meteorología. *Ed. Alhambra*.

CHARNEY, J. G., R. FJØRTOFT AND J. VON NEUMANN, (1950): Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus*, 2, 237-254.

JAMES, I., (2002). Remarkable mathematicians. From Euler to von Neumann. *Cambridge University Press*.

LORENZ, E. N., (1963). Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141.

LORENZ, E. N., (1994). The essence of chaos. *University of Washington Press*, Seattle.

MARTÍNEZ, G. M., VALERO, F., AND VÁZQUEZ, L. (2009). Characterization of the Martian Convective Boundary Layer. *J. Atmos. Sci.*, 66, 2044-2058.

NEWTON, I., (2011). Principios matemáticos de la filosofía natural. *Editorial Tecnos*. Madrid.

OLCINA, J., (2014). Enseñanzas climáticas en la obra de Kant. *Anales de Geografía*, 34 (8), 119-162.

PALOMARES, M., (2012). Semblanzas de Vilhelm Bjerknes y su legado. Capítulo II: Reconciliando Física y Meteorología (1904-1917). <http://www.divulgameteo.es>

PELKOWSKI, J., (2000). Prólogo a los ensayos de un precursor y un alarife de la predicción moderna del tiempo. *Rev. Meteorología Colombiana*, 2, 111-115.

PLATZMAN, G. W., 1979: The ENIAC computations of 1950 -gateway to numerical weather prediction. *Bull. Amer. Met. Soc.*, 60, 302-312.

RICHARDSON, L. F., (1922): Weather Prediction by Numerical Process. *Cambridge University Press*, Dover, New York.

VIÑAS, J. M., (2014). Hitos de la meteorología en imágenes. Repositorio Arcimís. *Ed. Agencia Estatal de Meteorología*.

WIIN-NIELSEN, A., (1991): The birth of numerical weather prediction. *Tellus* 43A-B, 36-52.