

Predicción del tiempo y del clima: crónica de una revolución

por Peter Lynch*

Hoy en día, la gente tiene la posibilidad de saber con mayor antelación si debe llevarse un paraguas para afrontar un día lluvioso, gracias a una revolución en la predicción meteorológica y climática.

Los importantes avances en las predicciones meteorológicas durante el último medio siglo han reportado importantísimos beneficios para la humanidad. Los pronósticos precisos salvan muchas vidas, mientras que las alertas tempranas mitigan las peores consecuencias de los fenómenos meteorológicos extremos cuando están disponibles. Las predicciones detalladas y precisas poseen un elevado valor económico, y existen numerosos estudios que ponen de manifiesto que los beneficios de las predicciones pesan mucho más que los costes derivados de las mismas.

Los avances en la modelización climática durante los últimos cincuenta años también han sido importantes. Se han desarrollado modelos de circulación general que se han aplicado para analizar los factores que provocan cambios en nuestro clima, así como su momento probable de aparición y su intensidad.

Cuando se creó el Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo allá por 1976, el hecho de contar con una técnica de predicción a diez días vista era poco más que un sueño. El objetivo del Centro era generar pronósticos meteorológicos situados en el rango de entre cuatro y seis días. En febrero de 2010,

la “barrera de los diez días” se hizo realidad.

El nacimiento de la predicción científica

El estudio de la termodinámica (que dio un salto significativo en el siglo XIX) completó la serie de principios fundamentales que gobiernan el flujo atmosférico. En torno al año 1890, el gran meteorólogo norteamericano Cleveland Abbe reconoció que la meteorología es simplemente la aplicación de la hidrodinámica y la termodinámica a la atmósfera.

Poco tiempo después, el científico noruego Vilhelm Bjerknes analizó de forma más explícita el campo meteorológico con un plan de dos fases: en la fase de *diagnóstico*, el estado inicial de la atmósfera se determina mediante el uso de observaciones, mientras que en la fase de *pronóstico* se utilizan las leyes del movimiento para calcular cómo cambia este estado con el paso del tiempo. Bjerknes no vio posibilidad alguna de aplicar sus ideas al uso práctico.

El científico inglés Lewis Fry Richardson fue más atrevido. La predicción de Richardson equivale a la fase de pronóstico de Bjerknes. Tal y como apuntó el propio Richardson, su esquema es complicado porque la atmósfera es complicada. Dicho sistema implicaba un extraordinario volumen de cálculo numérico, bastante poco práctico en la era previa a los ordenadores, pero Richardson no se dejó intimidar. “Quizás algún día, en el futuro que se presenta borroso ante nosotros, será posible avanzar en los cálculos más rápidamente de lo

que avanzan las condiciones meteorológicas... aunque esto no es más que un sueño”, dijo en 1922. Hoy en día, las predicciones se elaboran de forma rutinaria en potentes ordenadores donde se ejecutan algoritmos muy similares a los contenidos en el esquema de Richardson. Su sueño se ha hecho realidad.

Aunque el sueño de Richardson parecía irrealizable cuando se publicó su libro, los importantes avances en las siguientes décadas sentaron las bases para el progreso.

La importante evolución de la *teoría de la meteorología* permitió adquirir un conocimiento fundamental de la dinámica atmosférica, mientras que los avances en el *análisis numérico* permitieron el diseño de algoritmos estables. La invención de la *radiosonda* y su introducción en una red mundial significó que empezaba a disponerse de observaciones puntuales de la atmósfera en tres dimensiones. Finalmente, el *ordenador* ofreció un medio para hacer frente a la gran cantidad de tareas informáticas implicadas en la predicción meteorológica.

A mediados de los años treinta, John von Neumann se interesó por los flujos de los fluidos turbulentos. Von Neumann conocía el trabajo pionero de Richardson, y comprobó que el progreso en el campo de la hidrodinámica se aceleraría si existiese un medio para resolver ecuaciones complejas. Estaba claro que era necesario disponer de una maquinaria de cálculo automático muy rápida. Von Neumann reconoció la predicción meteorológica (un problema de gran significado práctico e interés

* Director del Centro de Meteorología y Clima, Escuela de Ciencias Matemáticas, University College de Dublín (Irlanda). Correo electrónico: Peter.Lynch@ucd.ie.

Pioneros de la predicción del tiempo



Cortesía de Oliver Ashford



© Nora Rosenbaum

Lewis Fry Richardson (izquierda) y Jule Charney (derecha)

científico intrínseco) como un problema idóneo para un ordenador.

Von Neumann debatió las posibilidades de la predicción numérica del tiempo con Carl Gustaf Rossby, que hizo que Jule Charney participara en un proyecto de predicción meteorológica. Charney dirigió el proyecto de Princeton (EEUU) durante ocho años, y lideró el equipo que llevó a cabo las primeras predicciones meteorológicas por ordenador.

Los ordenadores: motor de la revolución en la predicción

Se hicieron planes para llevar a cabo la integración del único ordenador que por aquel entonces estaba disponible a finales de los años cuarenta: el ENIAC (ordenador e integrador numérico electrónico). Las integraciones del ENIAC fueron realmente innovadoras; de hecho, la predicción meteorológica se había considerado como uno de los mayores y más importantes desafíos a lo largo de la historia de la informática. Se llevaron a cabo cuatro predicciones de 24 horas, y cada una de las integraciones de 24 horas necesitó en torno a 24 horas de cálculo, es decir, el equipo contaba con la capacidad de mantener el ritmo de las condiciones meteorológicas.

Las predicciones del ENIAC se efectuaron mediante el uso de un mode-

lo altamente simplificado. Durante los años posteriores se desarrollaron muchos modelos más sofisticados y realistas.

Los modelos climáticos aumentan su sofisticación

El impacto del cambio climático tiene una gran importancia para nuestro futuro, y los modelos sobre el clima mundial constituyen el mejor medio del que disponemos para anticipar los posibles cambios.

Norma Phillips (Universidad de Princeton, EEUU) llevó a cabo la primera simulación de largo plazo de la circulación general de la atmósfera en 1956, durante aproximadamente un mes.

Tras el trabajo inicial de Phillips se desarrollaron varios modelos. El calentamiento solar, la radiación terrestre, la convección y la turbulencia a pequeña escala, y otros procesos se incluyen en la actualidad en estos modelos. Los modelos modernos contemplan los océanos, el hielo y los procesos terrestres. El modelo EC-Earth, que está siendo desarrollado por una comunidad de científicos europeos, cuenta con el Sistema de predicción integrada como base, y se utiliza para efectuar simulaciones vanguardistas de las situaciones climáticas pasadas,

presentes y futuras de la Tierra (<http://eearth.knmi.nl/>).

Los modelos atmosféricos integrales se encuentran entre los logros más importantes de la meteorología durante el siglo XX. Estos modelos se perfeccionan y amplían constantemente, y cada vez son más sofisticados y exhaustivos. Simulan la atmósfera y los océanos, así como los procesos geofísicos, químicos y biológicos, y las realimentaciones. Los modelos, ahora denominados "modelos del sistema terrestre", se aplican a la predicción meteorológica y también al estudio de la variabilidad climática y del impacto de la humanidad sobre el clima.

La predicción numérica del tiempo en la actualidad

Decir que los avances alcanzados durante el último medio siglo han sido revolucionarios no supone ninguna exageración. Gracias a este trabajo, la meteorología está hoy en día firmemente consolidada como una ciencia cuantitativa, y su valor y validez se demuestran diariamente mediante la prueba ácida de cualquier ciencia, su capacidad para pronosticar el futuro.

En la actualidad la predicción operativa se guía a partir de un amplio abanico de modelos. En la mayor parte de los centros se utiliza una combinación de modelos mundiales y locales. A modo de ejemplo, consideremos el modelo mundial del Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo. Este centro tiene el objetivo de ofrecer predicciones meteorológicas de una calidad cada vez mayor y con una antelación que va desde unos cuantos días hasta unas cuantas estaciones. El centro, operativo desde 1979, sigue desarrollando pronósticos y otros productos con una precisión y valor cada vez mayores, manteniendo así su posición como líder mundial.

El auge de la predicción por conjuntos

En la actualidad, la naturaleza caótica del flujo atmosférico se comprende bien. Este hecho impone un límite sobre la predictibilidad: los errores inevitables en la fase inicial crecen rápidamente, y hacen que la

predicción resulte inútil después de algunos días. El método más satisfactorio para superar este obstáculo consiste en llevar a cabo una serie o conjunto de predicciones, y cada una de las cuales deberá comenzar desde un estado inicial ligeramente diferente. Para tener en cuenta la incertidumbre, los parámetros físicos del modelo de predicción también se modifican de forma aleatoria. El resultado combinado se emplea para deducir cambios futuros en la atmósfera.

La predicción por conjuntos está operativa tanto en el Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo (CEPMMP) como en los Centros nacionales de predicción del medio ambiente de Washington desde principios de la década de 1990. En el CEPMMP se ejecuta un conjunto de 51 predicciones, cada una de las cuales cuenta con una resolución que equivale a la mitad de la de la predicción determinista.

Las predicciones probabilísticas han irrumpido como la vía clave para el pronóstico a medio plazo. Estas predicciones se generan y difunden para su uso en los centros operativos. El Centro europeo, por ejemplo, elabora predicciones estacionales, con un alcance de seis meses. Estas predicciones se llevan a cabo empleando un modelo acoplado atmósfera-océano, y cada mes se combina un gran número de predicciones en un conjunto.

Estas predicciones por conjuntos tienen una utilidad demostrable en las regiones tropicales. Las predicciones recientes relativas al inicio de episodios de El Niño y de La Niña han sido impresionantes. Sin embargo, en latitudes templadas, y en concreto en

el caso de la región europea, no se ha logrado una técnica importante. De hecho, la predicción estacional para latitudes medias supone uno de los principales problemas a los que nos enfrentamos hoy en día.

Desde el hielo sobre el asfalto hasta el humo de los incendios forestales, las aplicaciones abundan

Una predicción a corto plazo requiere un asesoramiento detallado que se actualice con frecuencia. Muchos Servicios Meteorológicos Nacionales ejecutan modelos de área limitada con alta resolución para ofrecer este asesoramiento en lo que a las predicciones se refiere.

El aviso oportuno de extremos meteorológicos puede ser la aplicación más importante. Gracias a estos avisos pueden salvarse muchas vidas y evitarse pérdidas de bienes. Los sectores del transporte, el consumo de energía, la construcción, el turismo y la agricultura, todos ellos sensibles a las condiciones meteorológicas, están aumentando su demanda de precisión y detalle de las predicciones a corto plazo, puesto que constantemente deben adoptarse decisiones que conllevan importantes implicaciones financieras.

La comunidad marina también utiliza la predicción numérica del tiempo. Los vientos que se pronostican se emplean para manejar los modelos de olas, que calculan la altura del nivel del mar, los oleajes y los períodos de olas. Los mapas previstos del estado de la mar y

otros productos especializados pueden generarse y distribuirse a los usuarios de forma automática.

La predicción de hielo en el asfalto se basa en modelos que emplean predicciones de temperatura, humedad, precipitación, nubosidad y otros parámetros para calcular las condiciones de la superficie del asfalto. Existen aplicaciones para llevar a cabo simulaciones de deriva de la contaminación, lluvia radiactiva, humo procedente de incendios forestales y otros fenómenos.

La aviación se beneficia notablemente del asesoramiento relativo a la predicción numérica del tiempo, con avisos de peligros como rayos, engelamiento y turbulencias en aire claro. Muchos aeropuertos reciben información desde una instalación central de predicción basada en la generación automática de pronósticos de aeródromo.

Mirando hacia el futuro

Los ordenadores han permitido dar un salto revolucionario en el campo de la predicción del tiempo. El eminente meteorólogo noruego Sverre Pettersen hizo hincapié en el hecho de que, antes del ordenador, los avances se producían con cuentagotas.

Aún se yerguen ante nosotros extraordinarios desafíos. Los cambios meteorológicos repentinos y los fenómenos meteorológicos extremos son responsables de buena parte de las desgracias que sufren los seres humanos y de los daños sobre los bienes. Estos rápidos desarrollos se presentan a escalas temporales rápidas y lentas, con complicadas interacciones entre los procesos dinámicos y

Protección del tráfico aéreo. Con la reciente erupción del volcán islandés Eyjafjallajökul, muchos servicios meteorológicos colaboraron en la elaboración de predicciones que ayudaran a las líneas aéreas a determinar si resultaba seguro volar en Europa. Diez millones de viajeros se quedaron en tierra cuando el espacio aéreo europeo se cerró durante cinco días en el mes de abril. Estos servicios de asesoramiento sobre ceniza volcánica están basados en complejos modelos de predicción.



los parámetros físicos. El cálculo de estas complejas interacciones supone un gran desafío.

La predicción inmediata es el proceso de pronosticar cambios a lo largo de períodos de unas pocas horas. La información obtenida de los modelos numéricos actuales puede quedarse corta en relación con lo que se necesita para emprender acciones eficaces y así evitar desastres. Por el momento, los mejores resultados combinan sistemáticamente productos de predicción numérica del tiempo con observaciones convencionales, imágenes de radar y de satélite, y otros datos. Sin embargo, aún queda mucho por hacer para desarrollar sistemas óptimos de predicción inmediata, y podemos mostrarnos optimistas en el sentido de que el desarrollo futuro desembocará en grandes mejoras en este campo.

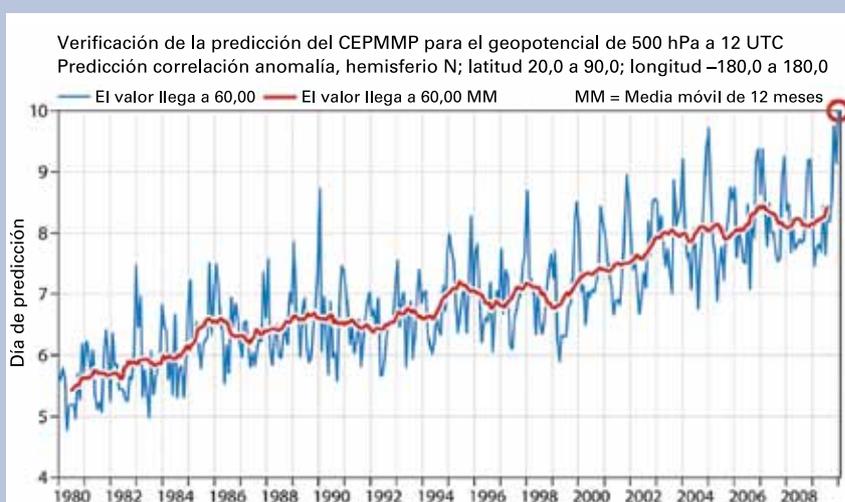
En el lado opuesto de la escala temporal, la naturaleza caótica de la atmósfera pone un límite en lo que las predicciones normales pueden lograr. Aunque la técnica de predicción por conjuntos ofrece información probabilística, hasta la fecha se ha visto que resulta complicada de utilizar en muchos casos. La interacción entre la atmósfera y el océano se convierte en un factor dominante para plazos de predicción más largos. Si bien existe una buena evolución en la predicción estacional para los trópicos, obtener predicciones que resulten útiles a largo plazo para regiones templadas sigue siendo un aspecto a considerar por parte de los responsables de llevar a cabo las simulaciones en el futuro. Otro gran reto radica en la modelización y la predicción del cambio climático, un tema que cada vez cobra

Precisión: ganando un día por década

Las predicciones han mejorado en torno a un día por década en los últimos treinta años, y en 2010 estas predicciones pueden efectuarse con una precisión de 10 días.

La técnica de predicción viene valorada por el coeficiente de correlación de la anomalía (ACC) del campo de predicción de la superficie de 500 hPa. El rango útil se calcula como el día de predicción en el que el ACC cae hasta el 60 por ciento. De media, el nivel del 60 por ciento se alcanza actualmente en torno al día 8. En febrero de 2010, el ACC mensual medio permaneció por encima del 60 por ciento durante el lapso de 10 días de la predicción determinista para el hemisferio norte.

Véase <http://www.ecmwf.int/publications/cms/get/ecmwfnews/255>



mayor importancia y es objeto de una creciente preocupación.

Los desarrollos que se han alcanzado en materia de dinámica atmosférica,

instrumentación y práctica de observación, y cálculo digital han hecho que los sueños de Bjerknes y Richardson se conviertan en una realidad cotidiana. En la actualidad, los modelos de predicción numérica del tiempo conforman el núcleo de la predicción operativa. La precisión en las predicciones ha aumentado rápidamente, y el progreso continúa desarrollándose en varios frentes.

Una enorme tarea de cálculo llevada a cabo de forma más sencilla.

Hace un siglo, las predicciones meteorológicas eran una quimera. Hoy, esas predicciones meteorológicas han roto la barrera de los diez días. Tras esta revolución se encuentra la invención de la radiosonda, amén de un progreso espectacular en la teoría meteorológica, en el análisis numérico y en la potencia de los superordenadores.

