

¿Qué tiempo va a hacer?

Mikel Lezaun

Resumen

¿Qué tiempo va a hacer? Desde la más remota antigüedad, el hombre ha intentado predecir el tiempo atmosférico, para tratar de librarse de sus efectos perniciosos o aprovecharse de sus beneficios. Actualmente, para predecir el tiempo se utilizan ordenadores superpotentes a los que hay que proporcionar un gran número de medidas, muchas leyes de la mecánica y de la física y, también, muchas matemáticas, a veces muy recientes. En este artículo se hace una introducción histórica de la meteorología, y se presentan los principios fundamentales de la predicción numérica del tiempo que realizan los distintos servicios meteorológicos. Se termina el artículo analizando la cuestión de hasta qué plazo es posible predecir el tiempo y con las predicciones climáticas.

Abstract

What's the weather going to be like? Ever since the most ancient times, people have tried to predict the weather so as to protect themselves from its inclemencies or make the most of its beneficial effects. Super-computers are now used in forecasting: they need to be provided with enormous numbers of measurements, many laws of mechanics and physics and a great deal of mathematics, some of it very recent. This article presents a historical introduction to meteorology, covering the basic principles of numerical weather forecasting used by various meteorological services. The article ends with an analysis of how far in advance the weather can be predicted, and looks at climate predictions.

1.- Notas históricas

En su acepción más sencilla e inmediata, la meteorología es la ciencia que trata de los meteoros, vocablo de etimología griega que significa alto o elevado en el aire. A Aristóteles (384-322 a.C.) y su libro *Meteorológica* se debe la consideración de la meteorología como parte de la filosofía natural. Aristóteles fue prácticamente la única autoridad en meteorología teórica hasta René Descartes (1596-1650), que con su apéndice al *Discurso del Método* titulado *Les Météores*, dio un nuevo impulso al estudio teórico de la meteorología.

En siglo XVII, E. Torricelli (1608-1647) inventó el barómetro para medir la presión, G. Galileo (1564-1642) puso a punto el termómetro para medir la temperatura, y se inventaron aparatos para medir la humedad y la fuerza y dirección del viento. Estos logros tecnológicos supusieron un enorme avance pues permitieron saltar desde una meteorología cualitativa a una meteorología cuantitativa. Para la utilización universal de los datos meteorológicos recogidos, fue necesario realizar un largo proceso de estandarización de los protocolos de medida, de las escalas, de los

registros y difusión de los datos, proceso que culminó a mediados del siglo XIX con la creación de las sociedades meteorológicas nacionales. Desde entonces, estas sociedades son las que se encargan de hacer todas esas tareas. En el siglo XIX hubo una verdadera fiebre por recopilar todo tipo de datos meteorológicos. La gran cantidad de datos dio origen a la *Climatología* como ciencia estadística. Recordemos que el clima es el tiempo promedio, y la probabilidad de ocurrencia de sus valores extremos, en una región y en una época determinadas.

Paralelamente a toda esta actividad empírica, a partir del siglo XVII, el desarrollo de estudios teóricos permitió explicar muchos fenómenos meteorológicos. Esto propició que en el siglo XIX, numerosos científicos comenzaran a defender que la meteorología era una rama de la física aplicada, que denominaron *Meteorología Dinámica*.

Si se compara con las matemáticas o con la astronomía, la meteorología como ciencia es relativamente joven. Ahora bien, como preocupación humana se remonta a tiempos inmemoriales. La forma de vida prehistórica, recolectora y cazadora, dependía de los caprichos del tiempo, y el hombre fue desarrollando poco a poco una sensibilidad casi intuitiva para las condiciones atmosféricas. Para la predicción del tiempo a corto plazo, uno de los primeros avances fue darse cuenta de que ciertos fenómenos naturales como el aspecto del cielo, los vientos, las migraciones de aves, etc., son indicativos del tiempo venidero. Este saber meteorológico terminó expresándose en forma de numerosos refranes, que todavía hoy perduran en todas las culturas y países. Citaremos como ejemplo:

Si la nube es negra, cuídate de la piedra.

Cielo empedrado, suelo mojado.

Cielo de lanas, si no llueve hoy lloverá mañana.

Por otro lado, en el neolítico, los agricultores sedentarios comprendieron que de la observación del cielo podían predecir la llegada del período cálido, húmedo o frío (estaciones), y por tanto de la época más adecuada para la siembra de determinadas semillas.

2.- Predicción del tiempo hasta el siglo XX

Las predicciones basadas en signos naturales y recogidas en refranes son muy antiguas. Ahora bien, los primeros hombres del tiempo profesionales fueron los astrólogos. Claudio Ptolomeo (90-168), que en su libro *Tetrabiblos* basó la predicción del tiempo en los astros, fue la principal autoridad en *astrometeorología* durante toda la Edad Media. Como ejemplo, Juan de Toledo predijo para el año 1186 un cataclismo universal, consecuencia de los fuertes vientos que se iban a desatar debido a la conjunción de los siete planetas clásicos en el signo de Libra, sin que llegado ese año ocurriera nada destacable. Con la invención de la imprenta en el siglo XV, hasta el siglo XIX se publicaron muchísimos libros dedicados a ese tipo

de predicciones. Ni que decir tiene que todos los intentos de relacionar los cambios atmosféricos con los astros o con las fases de la luna han resultado infructuosos. Aunque todavía tengan muchos defensores, ninguna de las presuntas relaciones resiste un tratamiento estadístico serio. En los siglos XVIII y XIX se hicieron muy populares los *almanaques* del tiempo, que con una terminología más o menos general y ambigua, pretendían predecir el tiempo de todo el año siguiente. Todavía hoy perduran algunos, como por ejemplo El Calendario Zaragozano, fundado en 1840.

A mediados del siglo XIX, un nuevo avance técnico, como fue la invención del telégrafo, impulsó la creación por las distintas sociedades meteorológicas de numerosas estaciones de observación, con el fin de conocer el tiempo presente en una amplia zona geográfica. Esto permitió dibujar mapas del tiempo actual, especialmente los mapas de isobaras, e hizo posible la introducción de un nuevo método de predicción del tiempo, denominado *método sinóptico*. Esencialmente, este método consistía en dibujar los mapas previstos para el día siguiente, estimando, a partir de mapas del tiempo actual, cómo se iban a mover los distintos fenómenos meteorológicos (centros de bajas o altas presiones, etc.) detectados. Para ello, los hombres del tiempo se basaban en su experiencia, en unas pocas reglas empíricas, en su conocimiento de la meteorología local, y no utilizaban prácticamente ninguno de los resultados teóricos ya conocidos. Esta forma de proceder, experimental, sin base teórica, hacía que el método sinóptico fuera poco apreciado por muchos meteorólogos, tanto teóricos como empíricos. De todos modos, hay que resaltar que las predicciones del tiempo siempre han contado con una gran demanda popular, y todos los medios de comunicación han dedicado y dedican un espacio a las predicciones del tiempo del día o días siguientes.

Uno de los hitos más significativos en el desarrollo moderno de la meteorología práctica se produjo en tiempos de la Primera Guerra Mundial, cuando un grupo de meteorólogos noruegos encabezados por V. Bjerknes descubrió que las grandes masas de aire caliente o frío se desplazan sin mezclarse. También, detectaron que sobre el polo norte hay una gran masa de aire frío cuya frontera de separación con las masas de aire más caliente avanza o retrocede hacia el sur como lo hace un frente de ejército, de ahí que introdujeran los nombres de *frente polar*, *frente frío* y *frente caliente*, y que la interacción entre masas de aire genera los *ciclones*, tormentas típicas del hemisferio norte.

3.- Antecedentes de la predicción numérica del tiempo

Vilhelm Bjerknes (1862-1951), meteorólogo noruego fundador de la Escuela de Bergen, defendió que la predicción del tiempo es un problema de valores iniciales en el sentido matemático del término. Así, si se tienen los valores de las variables meteorológicas en el instante actual, si se tienen las ecuaciones de la dinámica atmosférica y si se es capaz de resolverlas, se obtendrán los valores de las variables meteorológicas del día siguiente, y en definitiva la predicción del tiempo. Ahora bien, Bjerknes conocía muy bien las dificultades que entrañaba la resolución de esas ecuaciones en derivadas parciales, debido a que conforman un sistema no lineal.

Lewis Fry Richardson (1881-1953), matemático inglés, ideó un método en diferencias finitas para resolver de forma aproximada el sistema primitivo de siete ecuaciones con siete incógnitas (las tres componentes de la velocidad, la presión, la densidad, la temperatura y la humedad del aire) de la dinámica atmosférica introducido por Bjerkness. Durante la I Guerra Mundial, Richardson puso en práctica su método resolviendo “a mano” el sistema aproximado centrado en una pequeña región de Alemania. Aunque la predicción que obtuvo estaba muy lejos de lo que había ocurrido, Richardson publicó su experiencia en un libro que en su época se hizo muy célebre, titulado *Weather Prediction by Numerical Process*.

Carl-Gustav Rossby (1898-1957), meteorólogo danés formado en la escuela de Bergen, se alejó de la omnipresente presión y se centró en el viento, en concreto en la componente vertical de la vorticidad. Rossby dedujo una ecuación simplificada de la vorticidad, y obtuvo una solución ondulatoria que se correspondía con ondas ya observadas en la parte alta de la atmósfera mediante globos sonda. Desde entonces esas ondas se denominaron ondas de Rossby. Esta conjunción de la solución de una ecuación con un fenómeno observado tuvo mucha influencia en los meteorólogos prácticos para que cambiaran su percepción de que la meteorología dinámica tenía muy poco interés para su trabajo.

Cuando gracias al impulso del matemático americano de origen húngaro John von Neumann (1903-1957) se construyó en 1946 la computadora ENIAC, von Neumann eligió la predicción del tiempo para mostrar con un problema práctico importante el potencial revolucionario de los ordenadores. Así, en 1950, Von Neumann y los meteorólogos Jule Charney (1917-1981), americano, y Ragnar Fjørtoft (1913-1998), noruego, realizaron en la ENIAC la primera predicción numérica del tiempo, consistente en resolver de forma aproximada una ecuación sencilla con significado meteorológico, en concreto, una ecuación de la altura de la capa de la atmósfera que está a 500 milibares de presión. Esta experiencia histórica resultó exitosa y marca el punto de partida de la predicción numérica del tiempo.

4.- La predicción numérica del tiempo

Desde mediados de los años 1970, todos los servicios meteorológicos realizan las predicciones del tiempo a partir de la resolución numérica de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales, las cuales traducen las leyes generales de la física aplicadas a la atmósfera.

4.1 Ecuaciones de la dinámica atmosférica

Las ecuaciones de la dinámica atmosférica son siete:

- *Las tres ecuaciones de conservación del momento cinético (se trata de una ecuación vectorial con tres componentes)*. Esta ecuación es la aplicación de la segunda ley de Newton (fuerza igual a masa por aceleración) a una pequeña parcela de aire.

- *La ecuación de continuidad, que traduce la ley de conservación que afirma que cuando se sigue una parcela de aire en su movimiento, la masa de la parcela se conserva.*
- *La ecuación de conservación de la humedad específica de vapor de agua. Esta ecuación indica que la cantidad de agua contenida en una parcela de aire que se sigue en su movimiento se conserva, excepto cuando hay fuentes o pérdidas de vapor de agua, debidas a la evaporación o condensación, deposición o sublimación, deposición o emisión de la superficie terrestre, y producción o pérdida fotoquímica.*
- *La ecuación de conservación de la energía, que expresa que la tasa de calor por unidad de masa aplicada a una parcela de aire (debido a la evaporación, fundición, calentamiento solar o calentamiento infrarrojo), se utiliza para aumentar la energía interna o para producir trabajo de expansión.*
- *La ecuación de estado de los gases perfectos. Se puede asumir que la atmósfera es un gas perfecto, por lo que la presión, la densidad y la temperatura están relacionadas por la ecuación de los gases perfectos.*

Se tiene así siete ecuaciones con siete incógnitas (las tres componentes de la velocidad del viento, la presión, la densidad, la humedad específica y la temperatura), las cuales gobiernan la evolución de la atmósfera. Junto con las condiciones iniciales y las condiciones de contorno conforman un problema tratable desde el punto de vista matemático.

4.2 Principales procesos físicos. Parametrizaciones físicas

La parte física del modelo debe recoger los distintos intercambios energéticos entre la atmósfera y las fuentes externas. Los principales procesos físicos que intervienen en la atmósfera son: la radiación (tanto la recibida directamente del sol como la infrarrojo que emite la Tierra calentada por el sol), la convección, los intercambios de la atmósfera con la superficie terrestre (diferentes en los océanos, en los polos, en zonas con mucha vegetación o en los desiertos, etc.), la turbulencia, la condensación a gran escala, y las ondas gravitatorias orográficas. Ya sea por su naturaleza física o por las escalas consideradas, todos esos procesos no están tratados de forma explícita en las ecuaciones de la parte dinámica del modelo. Por ello se tienen que parametrizar, es decir, se tiene que determinar e introducir el efecto medio de esos procesos en las ecuaciones dinámicas del modelo meteorológico.

4.3 Resolución numérica

El sistema de ecuaciones de la dinámica atmosférica, con las correspondientes condiciones iniciales y de contorno, no se puede resolver obteniendo una solución expresada mediante fórmulas matemáticas explícitas. La dificultad esencial reside en el carácter no lineal de las ecuaciones. Ahora bien, este problema se puede abordar con métodos numéricos, convirtiendo el problema continuo en uno discreto,

para luego resolverlo en un ordenador y obtener así una solución aproximada. Este proceso de resolución consta de varias etapas.

Discretización del espacio

Dado que es imposible especificar los valores de las variables en todos los puntos de la atmósfera (¡son infinitos!), se divide la atmósfera en cajas y se considera que en cada una de las cajas las variables meteorológicas valen lo mismo. Se pasa así de una atmósfera continua a una atmósfera con un número finito de componentes. Según los modelos y los plazos de las predicciones, el número de estas cajas puede ser muy grande, ya que sus dimensiones horizontales pueden ir desde diez a unas pocas centenas de kilómetros, y los niveles de altura desde la veintena hasta sesenta.

Discretización de las ecuaciones

Las ecuaciones de la dinámica atmosférica son ecuaciones diferenciales, por lo que están definidas en una atmósfera continua. Su adaptación a una atmósfera y tiempo discretos requiere discretizarlas, sustituir, por ejemplo, las derivadas parciales por diferencias finitas. Se obtiene así un gran sistema de ecuaciones algebraicas con un número finito muy grande de variables, que se resolverá avanzando paso a paso en intervalos de algunos minutos, utilizando un ordenador. Su solución nos dará el valor de las siete variables meteorológicas en tiempos posteriores. Naturalmente, cuanto menor sean las dimensiones de las cajas, la aproximación será mejor, y mayor y más costoso el problema a resolver. Como por otro lado los cálculos hay que hacerlos de forma mucho más rápida que la propia evolución de la atmósfera, siempre hay que buscar un compromiso entre la calidad de la solución aproximada y el tiempo que se tarda en su obtención.

Asimilación de datos

Para arrancar el proceso de resolución, se necesita conocer el estado de la atmósfera en un instante inicial de partida, más exactamente el valor de las magnitudes meteorológicas en todas las cajas en el instante t igual a cero. Para determinar esos valores se dispone de una extensa red de recogida de datos meteorológicos repartida por toda la atmósfera. Atendiendo a la forma de recoger los datos, las observaciones meteorológicas se pueden clasificar en dos grupos:

- *Observaciones "in situ", obtenidas por estaciones que recogen los datos del lugar en el que están ubicadas. Las hay de dos tipos: observaciones en superficie —recogidas por estaciones automáticas en tierra, boyas marinas, barcos mercantes, etc.— y observaciones en altura, obtenidas por globos sonda y por aviones.*
- *Observaciones obtenidas por aparatos a distancia (teledetección), como son las de los cinco satélites geoestacionarios, las de los dos satélites polares y las de los radares meteorológicos.*

Hay que resaltar que las estaciones meteorológicas terrestres no están igualmente distribuidas por toda la superficie del globo, en unas zonas son mucho más abundantes que en otras, y que proporcionan pocos datos en altitud. En cuanto a los satélites de órbita polar, están continuamente dando vueltas barriendo toda la tierra, por lo que sus medidas no están obtenidas en todos los puntos en el mismo instante. Además, los satélites miden cantidades sobre todo el espesor de la atmósfera. Por otro lado, en el instante inicial se necesita disponer de los valores de las variables meteorológicas en todas las cajas en que hemos dividido la atmósfera. El proceso de pasar de los datos observados a los valores de las variables meteorológicas en las cajas, se denomina *asimilación de datos*. Este proceso es complicado ya que hay que tratar los datos recogidos para que en ese instante inicial, todas las variables meteorológicas estén relacionadas entre sí, pues forman un estado de la atmósfera.

Condiciones de contorno

Si no se fijan condiciones de contorno —valores de las distintas magnitudes en la frontera del dominio de resolución— el problema sigue sin poder resolverse. En los modelos globales para toda la atmósfera, la frontera del dominio de integración obviamente está formada por las superficies inferior y superior de la atmósfera. En esos casos, resolviendo las distintas ecuaciones de forma sucesiva, las condiciones de contorno no presentan especiales dificultades. En los modelos regionales, en los que el dominio de integración está limitado lateralmente, una opción ampliamente utilizada consiste en tomar como condiciones de contorno los valores obtenidos de la resolución de un modelo global. Se dice entonces que el modelo regional está anidado en el global.

El Análisis Numérico tiene como finalidad saber resolver ecuaciones y realizar los cálculos hasta el final, es decir hasta la obtención de valores numéricos precisos en el menor tiempo y esfuerzo posibles. El Análisis Numérico es indispensable para que la simulación no sea sinónimo de simulacro, y para evaluar la incertidumbre de las previsiones.

Una vez descritos los principios generales de la resolución numérica, pasaremos a describir brevemente algunos modelos numéricos operativos utilizados por los servicios meteorológicos para la predicción del tiempo.

5.- Modelos numéricos operativos de predicción del tiempo

El objetivo más importante de la predicción del tiempo es conocer, con la máxima antelación y con el máximo detalle posibles, el desencadenamiento de fenómenos adversos, es decir de tipos de tiempo que pueden causar graves daños a la sociedad.

Para la predicción del tiempo a medio plazo (entre dos y diez días) se utilizan modelos numéricos globales de toda la atmósfera. El modelo más desarrollado es el

del ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast) con sede en Reading y que agrupa a 18 países, entre ellos España. Actualmente la resolución horizontal del modelo, es decir las dimensiones horizontales de la caja, es de 40 Km. y tiene 60 niveles de altura. Cuando se quieren hacer predicciones para un plazo de hasta dos o tres días, por ejemplo para España, se utilizan modelos regionales, que tienen mayor resolución que los globales. Por ejemplo, el Instituto Nacional de Meteorología (INM) es miembro del consorcio formado por los Servicios Meteorológicos Nacionales de Noruega, Suecia, Dinamarca, Finlandia, Islandia, Holanda, Irlanda y España, que ha desarrollado el modelo operativo regional HIRLAM (High Resolution Limited Area Model). El dominio del modelo HIRLAM-INM es un cuadrado centrado en España de unos 5000 Km. de lado, con una resolución espacial de 17 Km. y 40 niveles de altitud. Las condiciones de contorno laterales se obtienen de la solución del modelo global proporcionada por el ECMWF. Con este modelo, el INM hace cuatro veces al día predicciones de hasta 48 horas. El INM también integra una versión con una resolución de 5 Km. anidada en la anterior, con la que realiza predicciones de hasta 24 horas.

La predicción “inmediata”, que va desde ahora mismo hasta tres, seis o incluso doce horas, reposa directamente en la observación de los fenómenos, y en la capacidad de los pronosticadores para interpretar los datos de observación. Todos los servicios meteorológicos realizan una continua vigilancia de la evolución de la atmósfera en tiempo real, para advertir la aparición de determinados fenómenos en el lugar que ocurren.

Para resolver en poco tiempo varias veces al día los modelos numéricos de predicción, se requiere la utilización de los ordenadores más potentes que existen. Para dar una idea de las dimensiones de este problema, a modo de ejemplo diremos que Météo-France, que dispone del modelo global ARPEGE y el regional anidado en el anterior ALADIN, cada día trata alrededor de millón y medio de datos, y que en su sede situada en Toulouse, entre ingenieros, técnicos e investigadores trabajan unas 250 personas.

El resultado de los modelos de predicción numérica del tiempo son los valores de las variables meteorológicas en las cajas en que hemos dividido la atmósfera. A partir de esos valores se realiza lo que se denomina “postprocesado del modelo”, que básicamente consiste en representar en mapas geográficos los campos meteorológicos bidimensionales obtenidos al resolver el modelo, para que puedan ser utilizados por los hombres del tiempo. Ahora bien, el proceso de predicción no acaba con los resultados del modelo, es indispensable la destreza de los hombres del tiempo encargados de la predicción quienes, como grandes conocedores del clima regional y de los límites de los modelos, ajustan e incluso modifican los resultados de la simulación, y los traducen a términos de tiempo observable: intensidad de las precipitaciones, temperaturas máxima y mínima del día, posible aparición de nieblas, de tormentas, de ráfagas de viento, etc.

Desde el inicio de la utilización de modelos numéricos, la calidad de las predicciones meteorológicas no ha dejado de mejorar. Hoy en día la fiabilidad de las previsiones para plazos de un día o dos es superior al 90 %, y para plazos de 4 a 5

días del 75 %. Se constata también que en los últimos 20 años, en cada década se ha obtenido una mejoría de 24 horas, es decir que el nivel actual de buenas previsiones es el mismo que el que se tenía hace diez años para un plazo de 24 horas menos.

6.- Límites de la predictibilidad del tiempo

Los resultados de una predicción numérica dependen de las simplificaciones que se hayan hecho para obtener el sistema de ecuaciones matemáticas del modelo, de las parametrizaciones físicas adoptadas, de los efectos de la discretización y de la numerización utilizada, de la eficacia y extensión de la red de observación, y de la asimilación de los datos para obtener el estado inicial. Todos estos procesos son fuente de incertidumbre, de errores en las predicciones, y son objeto de permanentes estudios que conducen a continuas mejoras. En 1963, el meteorólogo Edward Lorenz hizo un descubrimiento fundamental, ya que mostró que *incluso con un modelo perfecto y condiciones iniciales casi perfectas, la naturaleza caótica de la atmósfera hace que los pronósticos pierdan toda validez más allá de diez días*. Dicho de otra forma, la atmósfera es un sistema caótico, ya que todo error sobre el estado meteorológico en el instante inicial, por pequeño que sea, se amplifica rápidamente con el transcurso del tiempo, tan rápidamente que una predicción para un plazo de más de diez días pierde todo su significado. Lorenz probó esto con un sistema muy sencillo derivado de las ecuaciones de la dinámica atmosférica, denominado sistema de Lorenz. La gran sensibilidad a largo plazo de la solución con respecto de las condiciones iniciales, el denominado carácter caótico, lo plasmó Lorenz en lo que denominó *efecto mariposa*, que se ha hecho muy popular.

Las predicciones numéricas descritas anteriormente se califican como deterministas, ya que emplean un sólo modelo y una sola integración. Estas predicciones son capaces de dar previsiones del tiempo de hasta diez días, pero su fiabilidad decrece mucho cuando la previsión va más allá de cinco días. Para superar esta limitación en el plazo de predicción debida a la incertidumbre en las condiciones iniciales, una opción muy desarrollada es la denominada *predicción por conjuntos*. Esta técnica consiste en realizar un conjunto de predicciones a partir de datos iniciales obtenidos perturbando la asimilación de datos, y a partir de ellas obtener una predicción promedio, o especificar la probabilidad de ocurrencia de sucesos futuros del tiempo. Así, la predicción deja de ser determinista para pasar a ser de tipo probabilístico. Además del elevado coste de realizar todo un conjunto de predicciones para una misma fecha y lugar, un problema fundamental es reconocer las zonas geográficas en las que pequeñas modificaciones de los datos producen mayores variaciones en las soluciones, es decir, cómo elegir las distintas pero igualmente verosímiles condiciones iniciales de forma que de alguna manera se cubra toda la gama de posibles soluciones. El ECMWF es pionero en el desarrollo y uso de esta técnica para predicciones de más de cuatro días, y actualmente realiza predicciones con un conjunto de cincuenta condiciones iniciales obtenidas mediante pequeñas variaciones de la asimilación de datos. A partir de los resultados de las

distintas predicciones numéricas, se obtienen distribuciones de probabilidad de ocurrencia de fenómenos en diferentes zonas de la Tierra.

La predicción *estacional* es la que se hace para un plazo de entre uno y seis meses. Aquí también el ECMWF ha sido pionero en desarrollar un modelo adecuado a esos plazos de predicción. En estos modelos se utilizan técnicas de predicción por conjuntos, y con la información resultante se trata de prever si el tiempo se apartará o no del régimen climático del lugar considerado. Se dirá así, por ejemplo, que el próximo verano será más caluroso y seco que lo habitual.

7.- Las predicciones climáticas

Hemos dicho antes que el clima es el tiempo promedio, son la temperatura o las precipitaciones promedio en determinado lugar y período de tiempo, por ejemplo en Canarias en el mes de febrero. Por tanto, para la predicción del clima habrá que utilizar predicciones estadísticas. La predicción del clima es muy importante: nuestro clima futuro está amenazado por las emisiones de gases debidas a las actividades humanas, y es necesario prever el efecto a largo plazo de esas perturbaciones. La disciplina matemática que proporciona las herramientas para estudiar el comportamiento a largo plazo es la *Teoría de Sistemas Dinámicos*. Esta teoría permite saber cuales son los regímenes de tiempo más previsibles (los atractores en terminología matemática), y cuales son los más inestables. En las situaciones de inestabilidad, una buena herramienta sería la modelización probabilística del clima, es decir el diseño de modelos que tengan explícitamente en cuenta el carácter aleatorio de la predicción. Este tipo de modelos, todavía en pañales, tienen que desarrollarse a partir de resultados muy recientes de la teoría de ecuaciones en derivadas parciales estocásticas y de la estadística.

Los modelos numéricos de predicción del clima se parecen como hermanos a los modelos de predicción del tiempo. La principal diferencia proviene del hecho de que las variaciones climáticas tienen lugar en grandes escalas de tiempo, lo que implica que no se pueden despreciar las interacciones entre la atmósfera, los océanos, las grandes capas de hielo marino, e incluso la biosfera. Por ello, un modelo del clima debe combinar un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo de los hielos marinos, y un modelo de la biosfera. Más allá de la complejidad informática de esa construcción, aparecen problemas matemáticos serios relativos a la manera adecuada de acoplar esos dominios, y a la especificación de las condiciones en las interfaces atmósfera-océano, atmósfera-hielos, etc. Además, como la integración para grandes períodos de tiempo exige que las cajas en que se divide la atmósfera sean grandes, de 200 a 300 kilómetros de lado, es necesario evaluar el efecto estadístico, en la escala de la caja, de los procesos que se producen a escalas mucho más pequeñas. En cualquier caso, todas estas materias todavía están en mantillas, quedan por hacer muchos desarrollos y avances matemáticos.

A modo de conclusión, insistiremos en que detrás de los pronósticos del tiempo, desde hace muchos años no están ni las cabañuelas, ni las témporas, ni la

figura del fraile encapuchado que señala el tipo de tiempo que va a hacer. Están ordenadores superpotentes a los que hay que proporcionar un gran número de medidas, hoy en día la mayor parte de ellas obtenidas por satélites, muchas leyes de la mecánica y de la física, y también, muchas matemáticas, a veces muy recientes.

Para terminar, las palabras de Miguel Azpiroz (1916-1965) en su discurso de ingreso en la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona: *La gente que, a pesar de todo, está dispuesta siempre a dejarse engañar muy a gusto, como dice un proverbio latino, seguirá creyendo en los intuitivos de esta ciencia, como también ocurre en Biología o en Medicina, y en las predicciones realizadas con recursos extremadamente simples. Forma parte de la naturaleza humana el querer saber, de modo inmediato, a qué atenerse en todos los aspectos que afectan a su ámbito vital, antes que el comprender las dificultades de cualquier problema que requiere una formación especializada; y adopta esta actitud incluso en cuestiones de mayor categoría cultural o humana, sin que nadie se asombre por ello.*

Bibliografía

- F. Atger, J. Coiffier, J. Pailleaux, J. F. Geleyn, E. Legrand (2000): La météorologie, 8^e série, n^o 30, juin 2000, (Spécial Prévision numérique du temps).
- C. Basdevant (2002) : “Le temps qu’il fera”. En L’explosion des mathématiques, 7-10. Société mathématique de France y Société de mathématique appliquées et industrielles.
- Instituto Nacional de Meteorología. <http://www.inm.es>
- E. Kalnay (2003): Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge University Press, Cambridge.
- M. Lezaun (2002): “Predicciones del Tiempo y Matemáticas”. Boletín de la Sociedad Española de Matemática Aplicada 22, 59-98.
- E. Lorenz (1993): The Essence of Chaos. University of Washington Press, Seattle. (Traducción en español La esencia del caos. Editorial Debate, Madrid, 2000).
- Météo France, <http://www.meteofrance.com>
- F. Nebeker (1995): Calculating the Weather. Meteorology in the 20th Century. Academic Press, San Diego.
- Société Météorologique de France. <http://www.smf.asso.fr>

Mikel Lezaun es Catedrático de Matemática Aplicada en la *Universidad del País Vasco* (España) y Vicepresidente de la Sociedad Española de Matemática Aplicada. Autor de artículos de investigación en Mecánica de Fluidos, ha dirigido distintos proyectos de investigación aplicada para empresas. En el año 2002, su trabajo Predicciones del Tiempo y Matemáticas fue galardonado con el III Premio SEMA de Divulgación en Matemática Aplicada.
E-mail: mepleitm@lg.ehu.es