

# **El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la Mecánica y la Física**

Vilhem Bjerknes

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

FUENTE: Bjerknes, V. 2000: *El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la Mecánica y la Física*. Traducción de Joaquín Pelkowski. Meteorol. Colomb. 2:117-120. ISSN 0124 6984. Bogotá, D.C. Colombia

TRABAJO ORIGINAL: *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkt der Mechanik und der Physik*. Meteorologische Zeitschrift, 211 7.1904.

---

De ser verdad, como cree cada hombre que piensa científicamente, que los estados atmosféricos posteriores se desarrollan de los anteriores según leyes físicas, entonces se puede entender que las condiciones necesarias y suficientes para una solución racional del problema de pronóstico en meteorología son estos requisitos:

- Es preciso conocer con suficiente precisión el estado de la atmósfera en un instante dado.
- Es preciso conocer con suficiente precisión las leyes que rigen la evolución de un estado atmosférico hacia otro.

## **I**

El conocimiento del estado de la atmósfera en instantes adecuados, fijados por convenio general, es la tarea de la meteorología observacional. Para los propósitos de un pronóstico racional del tiempo, la resolución de esta tarea no ha sido suficientemente completa. Hay dos lagunas particularmente sensibles. En primer lugar, las estaciones que contribuyen a mantener el servicio meteorológico diario están ubicadas en tierra. En los mares, que cubren cuatro quintos de la superficie terrestre, y que por lo tanto ejercen una influencia arrolladora, todavía no se efectúan observaciones en beneficio del servicio meteorológico diario. Además, las observaciones que se procesan para los servicios regulares de meteorología provienen solamente de la superficie del suelo, y falta todo dato del estado de las capas de aire superiores.

Los medios técnicos que nos permitirán colmar ambas lagunas están ya en nuestro poder. Con la ayuda de la radiotelegrafía se incluirán, en el ámbito de las estaciones, los barcos de vapor con rutas fijas, los cuales pueden enviar diariamente telegramas meteorológicos. Y con los grandes progresos de la meteorología aeronáutica en los últimos años, será posible realizar observaciones de las capas superiores, desde estaciones en superficie y, sobre el mar, desde estaciones volantes.

Cabe esperar, pues, que el tiempo está por llegar, en que se podrá disponer, ya sea diariamente o en determinados días, de un diagnóstico completo del estado de la atmósfera. Entonces se habrá cumplido la primera condición de un pronóstico racional.

## II

Se plantea entonces la segunda cuestión: ¿hasta qué punto conocemos con suficiente cabalidad las leyes que rigen el desarrollo de un estado atmosférico a otro?

Los procesos atmosféricos son una mezcla de procesos mecánicos y físicos. Para cada uno de estos procesos podemos formular ecuaciones matemáticas de acuerdo con principios mecánicos o físicos. Nuestro conocimiento de las leyes, conforme a las cuales evolucionan los procesos atmosféricos, será suficiente si de dicha forma se pueden establecer tantas ecuaciones, mutuamente independientes, como incógnitas haya. El estado de la atmósfera en un instante arbitrario estará determinado, en un sentido meteorológico, si podemos calcular la velocidad, la densidad, la presión, la temperatura y la humedad del aire para ese instante y para cada punto. Por ser la velocidad un vector, cuya representación requiere tres componentes escalares, son siete las variables que habrá que calcular.

Para este cálculo de las variables podemos establecer las siguientes ecuaciones:

- Las tres ecuaciones hidrodinámicas del movimiento. Son éstas relaciones diferenciales entre las tres componentes de la velocidad, la densidad y la presión.
- La ecuación de continuidad, que representa el principio de la conservación de la masa a lo largo del movimiento. Esta ecuación también es una relación diferencial, pero ahora sólo entre las componentes de la velocidad y la densidad.
- La ecuación de estado del aire atmosférico; es ésta una ecuación finita, es decir, algebraica, entre la densidad, la presión, la temperatura y la humedad de una masa arbitraria de aire.

Dos ecuaciones diferenciales, basadas en los dos principios de la teoría mecánica del calor (termodinámica), que describen cómo varía la energía y la entropía de una masa arbitraria de aire. Estas ecuaciones no introducen nuevas incógnitas, puesto que tanto la energía como la entropía son funciones de las mismas variables que las que intervienen en la ecuación de estado, asociando las variaciones de unas variables con otras, supuestamente conocidas: por un lado, el trabajo efectuado por una masa de aire, el cual se determina mediante las mismas variables que intervienen en las ecuaciones dinámicas, y por otro lado, las cantidades de calor recibidas desde afuera o entregadas hacia el exterior, calculables a partir de los datos físicos relacionados con la absorción, la emisión, y el calentamiento del aire por contacto con la superficie del suelo.

Es de resaltar que una simplificación esencial del problema se logra si no se tienen en cuenta ni la condensación ni la evaporación del agua, de modo que el vapor de agua contenido en la masa de aire puede considerarse como componente constante. El problema tiene entonces una variable menos, y podemos prescindir de una ecuación, a saber, la que resulta del segundo principio de la termodinámica. Por otro lado, si

tuviésemos que trabajar con varios componentes variables de la atmósfera, el segundo principio daría una ecuación para cada constituyente.

Para el cálculo de las siete variables que normalmente figuran como dependientes, podemos, pues, formular siete ecuaciones mutuamente independientes. Hasta donde es posible entender actualmente el problema, hemos de concluir que poseemos un conocimiento suficiente de las leyes que rigen los procesos atmosféricos, como para basar en él una predicción racional del tiempo. Claro está que también hay que reconocer que habrá factores que, debido a la imperfección de nuestros conocimientos, han pasado inadvertidos. Es concebible que intervengan efectos cósmicos de índole desconocida. También sabemos que los grandes fenómenos atmosféricos van acompañados de una larga serie de fenómenos subalternos (o parafenómenos), como por ejemplo los de naturaleza eléctrica y óptica, y la pregunta es hasta qué punto algunos de estos fenómenos concomitantes pueden retroactuar apreciablemente sobre el curso de los procesos atmosféricos. Por supuesto existen retroacciones. El arco iris, por ejemplo, modificará la repartición de la energía solar incidente, y las tensiones eléctricas influyen de manera conocida en los procesos de condensación. No obstante, carecemos de todo indicio respecto a una retroacción mayor de estas manifestaciones sobre los procesos atmosféricos. De todos modos, el método científico consiste en empezar por el problema más sencillo entre los que se presentan como relevantes, y en nuestro caso es precisamente el que hemos planteado, a saber, la solución de un sistema de siete ecuaciones y siete incógnitas.

### III

De las siete ecuaciones, sólo una, la ecuación de estado, es algebraica. Las demás son ecuaciones diferenciales parciales. De las siete incógnitas se puede eliminar una mediante la ecuación de estado, y la tarea consiste en integrar seis ecuaciones parciales con seis incógnitas, aplicando las condiciones iniciales que resultan de la observación del estado inicial de la atmósfera.

Sin embargo, no se podrá tratar de una integración analítica rigurosa del sistema de ecuaciones. Tan sólo el cálculo del movimiento de tres puntos, bajo la influencia mutua de una ley tan simple como la de Newton, supera, como es sabido, en mucho, los recursos contemporáneos del análisis matemático. Para los movimientos mucho más complicados de todos los puntos de la atmósfera no se puede esperar naturalmente nada. Pero aun si pudiésemos consignar la solución analítica exacta, de poco serviría. Porque para ser de utilidad práctica, la solución tendría que ser clara y por lo tanto, omitir un sinnúmero de detalles, presentes en cada solución exacta. La predicción sólo debe ocuparse de relaciones medias sobre espacios más extensos y tiempos más largos, digamos, por ejemplo, de grado por grado latitudinal, y de hora en hora, y no de milímetro por milímetro y segundo en segundo.

Por consiguiente, abandonaremos toda tentativa de buscar una solución por métodos analíticos, y el problema de la predicción meteorológica lo concebiremos de la siguiente forma práctica:

En base a las observaciones realizadas, se representa el estado inicial de la atmósfera por medio de cierto número de mapas, los cuales indican la distribución de las siete

variables de capa en capa atmosférica. Con estos mapas como puntos de partida, se han de dibujar nuevos mapas similares, los cuales representarán el nuevo estado, y así de una hora a otra.

Para la solución del problema en esta forma se requieren métodos gráficos o gráfico computacionales, los cuales se han de deducir ya sea de las ecuaciones diferenciales parciales, ya sea de los principios físico-dinámicos sobre los que se basan aquéllas. No hay razón para dudar de antemano de la posibilidad de elaborar tales métodos. Todo dependerá del éxito con que se logre descomponer el complicadísimo problema en una serie de problemas parciales, tal que ninguno presente dificultades insuperables.

## IV

Para lograr esta descomposición en problemas parciales, hemos de acudir al principio general del cálculo infinitesimal de muchas variables. Con este objetivo en mente, es posible sustituir las variaciones simultáneas de varias variables por variaciones sucesivas de sendas variables o de sendos grupos de variables. Al pasar a intervalos infinitesimales, se obtienen los métodos exactos del cálculo infinitesimal. Pero si los intervalos se mantienen finitos, se obtienen los métodos aproximados del cálculo finito de las diferencias y de la integración mecánica, de los cuales hemos de servirnos en la solución de nuestro problema.

Sin embargo, no se debe aplicar este principio a ciegas, ya que la utilidad práctica del método dependerá del agrupamiento natural de las variables, conducente a problemas parciales físico matemáticos bien definidos y claros. Sobre todo la primera descomposición será fundamental, y habrá de hacerse, en lo que se refiere al problema principal, a lo largo de una línea de separación natural.

Efectivamente, tal línea divisoria existe; se ciñe a la línea limítrofe entre los procesos exclusivamente dinámicos y los exclusivamente físicos, de todos los que conforman la multitud de los procesos atmosféricos. La división a lo largo de esta demarcación proporciona una descomposición del problema principal en problemas parciales meramente hidrodinámicos y problemas puramente termodinámicos.

El empalme que une los problemas hidrodinámico y termodinámico puede desligarse muy fácilmente; tanto es así, que de hecho los hidrodinámicos teóricos se han servido generalmente de esta posibilidad, para evitar de esa manera cualquier contacto serio con la meteorología. El vínculo lo proporciona la ecuación de estado. Si se supone que la temperatura y la humedad no intervienen en ella, se tiene la ecuación «suplementaria % comúnmente aplicada por los hidrodinámicos, en la que se relacionan solamente la densidad y la presión. Ello conduce a un estudio circunstancial de los movimientos de los fluidos, y una consideración explícita de los procesos termodinámicos queda automáticamente omitida.

En lugar de eliminar por completo la humedad y la temperatura de la ecuación de estado, podemos considerarlas como magnitudes fijadas durante intervalos temporales más bien cortos, con valores deducidos ya sean de las observaciones, ya sea de cálculos realizados previamente. Una vez resuelto el problema dinámico para dichos intervalos de tiempo, se pasa al cálculo de nuevos valores de temperatura y humedad según

métodos puramente termodinámicos. Los nuevos valores se consideran como dados en la solución del problema dinámico para el siguiente intervalo

## V

Se ha indicado así la regla general de cómo empezar por simplificar el problema principal. Al implementarla en la práctica hay varias opciones, según las hipótesis que se introduzcan sobre la temperatura y la humedad. Pero en esta discusión general no es preciso detenernos en esto.

La siguiente cuestión central es decidir hasta qué punto es posible resolver aisladamente y de manera suficientemente simple cada uno de los dos problemas parciales, el hidrodinámico y el termodinámico.

Contemplemos primero el problema hidrodinámico, que constituye, propiamente hablando, el problema principal; pues las ecuaciones dinámicas son las verdaderas ecuaciones de pronóstico. Sólo en virtud de ellas es que se introduce el tiempo como variable independiente, ya que las ecuaciones termodinámicas no la incluyen.

El problema hidrodinámico se presta ahora maravillosamente para la solución gráfica. En lugar de calcular a partir de las tres ecuaciones dinámicas, se introducen sencillas construcciones de paralelogramos, en un número apropiado de puntos selectos, mientras que para los puntos intermedios se completa la información mediante interpolación gráfica o a ojo. La dificultad principal radica en aquella limitación de la libertad de movimiento que resulta de la ecuación de continuidad y de las condiciones de frontera. Para comprobar si la ecuación de continuidad se cumple o no, es posible implementarla usando también métodos gráficos, con los que, además, se puede tener en cuenta la topografía de la superficie terrestre, elaborando la construcción sobre mapas que la representan de la manera habitual.

La solución del problema parcial hidrodinámico no ofrece, pues, grandes dificultades matemáticas. Mas existe, y hemos de tenerla en cuenta, una laguna sensible, respecto a nuestro conocimiento, muy deficiente por lo demás, de la resistencia viscosa contra los movimientos aéreos, resistencia que depende de las diferencias de velocidad infinitesimales, mientras que los meteorólogos están obligados a operar con movimientos promediados, de extensas masas de aire. Por eso no se pueden utilizar los términos de fricción en las ecuaciones hidrodinámicas, con sus coeficientes obtenidos en el laboratorio, sino que se ha de recurrir a los resultados empíricos, relativos a la resistencia efectiva de grandes masas al movimiento. Ya poseemos suficientes datos de esta clase como para llevar a cabo los primeros conatos de un cálculo previo de los movimientos del aire, y dichos conatos permitirán con el tiempo realizar las correcciones y adiciones necesarias.

El problema parcial termodinámico es bastante más sencillo, en su aspecto matemático, que el hidrodinámico. Del problema hidrodinámico resuelto se extrae solamente el trabajo efectuado por las masas de aire durante los desplazamientos que tuvieron lugar. Con esta información, y conociendo además las cantidades de calor absorbidas y emitidas durante el intervalo de tiempo correspondiente, se calcula, de acuerdo con conocidos principios termodinámicos, la nueva distribución de temperatura y humedad.

Los cálculos no son, matemáticamente hablando, más difíciles que cálculos análogos basados en experimentos de laboratorio, donde las masas de aire se encuentran en reposo en un recinto cerrado. Existen extensos trabajos preparatorios a través de las investigaciones de Hertz, von Bezold y otros.

Al igual que en el problema hidrodinámico, la dificultad principal estriba en la naturaleza fragmentaria de nuestros conocimientos acerca de distintos factores que intervienen en el cálculo. Las estimaciones de las cantidades de calor que ganan o pierden las masas de aire, resultantes de una diferencia entre la absorción y la emisión, así como las estimaciones de las masas de aire que se evaporan en las superficies marinas o de las masas que tras condensación en las nubes caen efectivamente como lluvia, no dejarán de ser muy inciertas al principio. Pero poseemos suficiente información para llevar a cabo tentativamente los primeros cálculos, y mediante una labor continua, será posible encontrar gradualmente valores más exactos de las constantes del problema, según que se trate de tierras y mares distintos, de diferentes alturas en la atmósfera, diferentes situaciones meteorológicas, distintos grados de nubosidad etc.

## VI

Podemos estar seguros de que en el camino insinuado no tropezaremos con dificultades matemáticas insuperables.

Tan pronto se hayan elaborado los métodos gráficos y realizado las tablas accesorias necesarias, probablemente se podrán llevar a cabo las operaciones individuales. El número de operaciones individuales no tiene tampoco por qué ser exageradamente grande. El número dependerá de la longitud de los intervalos temporales involucrados en la solución del problema parcial. Cuanto más pequeños sean esos intervalos, tanto más engorroso el trabajo, pero también tanto más exacto el resultado; cuanto más grandes se seleccionen los intervalos, tanto más rápido se logrará el objetivo, pero a costa de la exactitud. La experiencia proporcionará criterios definitivos acerca del intervalo adecuado. Aun si se aspira a una gran precisión, cabe suponer que intervalos de una hora resulten aceptables en la mayoría de los casos. Pues sólo excepcionalmente cubrirán las masas de aire, en una hora, distancias mayores que un grado geográfico, y sólo excepcionalmente se curvarán las trayectorias más o menos fuertemente en el mismo tiempo. Así se cumplen las condiciones, bajo las cuales se puede efectuar la construcción de un paralelogramo con sus segmentos rectos. Con suficiente experiencia, y aprovechando instinto y la medida del ojo, probablemente será fácil operar con intervalos de tiempo más grandes, como por ejemplo de seis horas. Para un pronóstico de 24 horas, se tendría que llevar a cabo la construcción hidrodinámica cuatro veces, y unas tantas veces el cálculo de corrección de la temperatura y la humedad.

Parece posible, pues, que algún día en el futuro se pueda aplicar un método de este género en el servicio meteorológico diario. Sea como sea, tarde o temprano se ha de iniciar un estudio científico más profundo de los procesos atmosféricos, de acuerdo con un método basado en las leyes de la mecánica y la física; lo cual llevará necesariamente a un método como el que hemos esbozado aquí.

Si se concede esto, se tiene con ello también un plan general para la investigación dinámico-meteorológica.

La tarea principal de la meteorología observacional consistirá en llevar a cabo regularmente observaciones simultáneas en todas las partes de la atmósfera, en superficie como en altura, en tierra como sobre el mar.

La tarea primordial de la meteorología teórica consistirá en elaborar, apoyándose sobre estas observaciones, una imagen, ojalá panorámica, del estado físico y dinámico de la atmósfera en el momento de las observaciones. Esta imagen ha de tener una forma apropiada, para servir de punto de partida a un pronóstico del tiempo según el método racional dinámico físico.

Tan sólo esta tarea preliminar tiene una envergadura nada despreciable, por cuanto es, naturalmente, más laborioso representar el estado de la atmósfera en todas las alturas que sólo en superficie, como se hace en la actualidad. A eso hay que añadir que nuestro acceso a las capas superiores del aire será siempre muy limitado. Por eso hay que exigir que se aprovechen al máximo las observaciones de aquellas capas. De las magnitudes directamente observables se han de calcular, lo más ampliamente posible, todos los datos accesibles sobre las que no se pueden observar. Para ello se tendrá que aprovechar las relaciones físicas que existen entre las distintas magnitudes. Incluso si se desea construir una imagen coherente del estado de la atmósfera a partir de esporádicas observaciones, es necesario aplicar extensamente métodos dinámico-físicos.

Finalmente, la segunda y suprema tarea de la meteorología teórica consistirá, partiendo de esta representación del estado de la atmósfera, en confeccionar las representaciones de los futuros estados, ya sea por el método esbozado, ya sea por otros métodos de la misma índole. La compaginación de esas representaciones, con las que posteriormente serán suministradas por las observaciones, no sólo facilitará, por un lado, el control general de la calidad del método, sino, por otro, la corrección de los valores de las constantes, como también ofrecerá indicaciones de cómo mejorar el esquema.

Volveré sobre los puntos principales de este programa en ocasiones futuras.