

70° Aniversario de la operacionalización de la predicción numérica del tiempo

E. RODRÍGUEZ CAMINO, AME

Frecuentemente se asocia el inicio de la predicción numérica operativa del tiempo con la publicación del famoso artículo de Charney, Fjørtoft y von Neumann publicado en *Tellus* en 1950 en el que se propone un método para resolver de forma numérica la ecuación barotrópica de la vorticidad sobre un área limitada. Sin embargo, el término operativo implica una producción estable, continuada y diaria que no llegaría hasta aproximadamente 5 años después. El origen del resultado de esta publicación debe remontarse a cuando John von Neumann, el famoso matemático y arquitecto de los primeros ordenadores que se utilizaron inicialmente para la investigación armamentística, fue consciente de que las no linealidades asociadas al movimiento de los fluidos requerían una gran potencia computacional para su solución

y que la meteorología presentaba una oportunidad para su aplicación en tiempos de paz, retomando así el sueño de Richardson de realizar predicciones meteorológicas basadas en las ecuaciones físicas, que había permanecido latente dos decenios (Lynch 2006). Por esta razón, von Neumann se puso en contacto con diferentes responsables, entre ellos Francis Reichelderfer, entonces director del Weather Bureau de EE. UU., y el resultado fue la decisión de crear en 1947 un pequeño núcleo de científicos en el Instituto de Estudios Avanzados (IAS, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Princeton para explorar las posibilidades de esta idea. Se eligió a Jule G. Charney procedente de UCLA para dirigir este grupo. Charney conoció a Carl Gustav Rossby durante su estancia en la Universidad de Chicago y se apoyó en los estudios previos de éste para uti-

lizar en forma de pronóstico la ecuación barotrópica de la vorticidad. Además, von Neumann y Charney se conocieron por intermediación de Rossby y tuvieron la oportunidad de trabajar juntos previamente a la constitución del grupo de Princeton, que entre otros incluía a Philip Thompson, proveniente de UCLA, George Platzman, de la Universidad de Chicago, y Arnt Eliassen, de Noruega. A los dos años Eliassen se marchó a UCLA y Ragnar Fjørtoft se incorporó desde Noruega para sustituirlo. En 1951, Norman Phillips también se incorporó desde la Universidad de Chicago para sumarse a este proyecto (Nebeker 1995, Benjamin 2018).

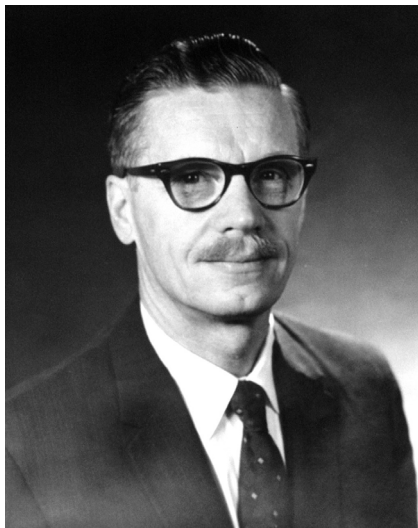
En 1950, y en el transcurso de un mes, se realizaron con éxito cuatro predicciones de hasta 24 horas y que precisaron 24 h de cálculo en el ordenador ENIAC (acrónimo de *Electronic Numerical Integrator And Computer*) situado en Aberdeen, Maryland, siendo estas cuatro predicciones las que se describen en el artículo de Charney, Fjørtoft y von Neumann, lo que distaba mucho de ser un montaje operativo. Estas predicciones resultaron ser sorprendentemente precisas, considerando lo simple de su dinámica, lo que apuntaba a la importancia de la advección no lineal de la vorticidad. Los resultados del grupo de Princeton tuvieron una repercusión considerable, de modo que, a principios de los años 50, se reconoció ampliamente que las predicciones generadas con ordenador basadas en las ecuaciones filtradas, para eliminar los modos de gravedad y acústicos, representaban un nuevo enfoque prometedor para el problema de las predicciones meteorológicas, incluido el del desarrollo baroclínico. Utilizando un modelo cuasi-geostrófico de tres niveles, el grupo de Princeton también probó diversos casos significativos de ciclogénesis. Estos intentos no tuvieron todos el mismo éxito lo que les condujo a considerar versiones más precisas de las ecuaciones filtradas e incluso a considerar seriamente el uso de las ecuaciones primitivas hidrostáticas a pesar de que permitieran las ondas gravitatorias.



Histórica fotografía tomada en el año 1950 junto al ENIAC en Aberdeen (Maryland, EE. UU.) justo después de completar la primera predicción numérica del tiempo que tuvo éxito. De izquierda a derecha: Harry Wexler, John von Neumann, M. H. Frankel, Jerome Namias, John Freeman, Ragnar Fjørtoft, Francis Reichelderfer y Jule Charney (fuente: MIT Museum)

A la vista de los positivos resultados del grupo de Princeton, el Weather Bureau, la Fuerza Aérea y la Marina de EE. UU. crearon en 1954 una nueva Unidad Conjunta de Predicción Numérica del Tiempo (JNWPU, por sus siglas en inglés) en Washington D.C., con un ordenador IBM 701 dedicado a esta tarea y con el mandato específico de desarrollar una capacidad operativa de predicción numérica del tiempo que estuviera disponible para aplicaciones de pronóstico tanto civiles como militares. George Cressman fue nombrado director de la JNWPU siendo Frederick Shuman y Joseph Smagorinsky otros dos destacados miembros de la Unidad. El propósito de la JNWPU era el de convertir en un procedimiento automatizado los métodos de pronóstico desarrollados a través de la investigación en predicción numérica del tiempo.

El IBM 701 fue instalado a principios de 1955 y la primera predicción a 36 h que se realizó correspondió a las condiciones iniciales de 15:00 Z del 18 de abril de 1955. El Weather Bureau emitió su primera predicción operativa en mayo de 1955 basada en el modelo baroclínico de 3 niveles desarrollado por el grupo de Princeton. Mientras tanto, el grupo de Meteorología de Princeton se disolvió en 1956, Charney y Phillips se fueron al MIT mientras que Fjörtoft ya había regresado con anterioridad a Noruega (Harper et al. 2008). Al principio las predicciones numéricas no pudieron mejorar las predicciones manuales, entre otros problemas por el excesivo desarrollo de las borrascas y por no ser capaces de poder suministrar información útil a los predictores operativos. Las primeras operaciones con el IBM 701 en 1955 dependían de métodos manuales de análisis para el establecimiento de las condiciones iniciales y de comunicaciones muy primitivas. Los datos observacionales se transcribían manualmente a partir de las salidas del teletipo y se analizaban manualmente mediante métodos tradicionales, luego se superponía una transparencia con los puntos de la cuadrícula del modelo y un analista interpolaba y leía los valores en los puntos de la cuadrícula a un operador de perforación de tarjetas. La recopilación y preparación de datos, la perforación de tarjetas y la verificación manual de la entrada requerían alrededor de 10



George Cressman (arriba, fuente: NOAA Digital Collection) y Joseph Smagorinsky (abajo, fuente: Franklin Institute) dos de los principales artífices de la operacionalización de la predicción numérica del tiempo en EE. UU.

h a partir del instante nominal de datos, lo que significaba que los productos no estaban disponibles para su uso hasta 12 h después. Aunque hubo momentos de desánimo, la estrategia que se siguió fue clave para el éxito final que llegó tras varias tentativas y cambios que cristalizaron alrededor de 1958 en un sistema estable y satisfactorio con una nueva máquina IBM 704 más potente que incorporó entre otras mejoras un sistema automático de gestión datos y de análisis de las condiciones iniciales volviéndose finalmente a una versión mejorada del modelo barotrópico de Princeton (Shuman 1989). A partir de 1958, los predictores del Weather Bureau comenzaron a recibir las

predicciones numéricas en tiempo real. Algunos de los productos numéricos superaban ya en 1960 la calidad de los calculados manualmente, especialmente para las predicciones en altura. Todavía en estos primeros años los modelos, dada su simplicidad e insuficiente resolución, no eran capaces de generar predicciones a nivel de superficie mejores que las generadas manualmente por los predictores. Tras dos años de operaciones, y dada la diversidad de intereses del *Weather Bureau*, la Marina y la Fuerza Aérea, la JNWPU se disolvió en tres organizaciones que desarrollaron sus propios modelos: National Meteorological Center (Weather Bureau), Global Weather Central (Fuerza Aérea) y Fleet Numerical Oceanography Centre (Marina) (Shuman 1989; Harper et al. 2007).

Sin embargo, no fueron los Estados Unidos la primera nación en producir predicciones numéricas diarias en tiempo real. Este honor le corresponde a Suecia y a sus diferentes instituciones meteorológicas [Instituto de Meteorología de la Universidad de Estocolmo (MISU), Centro Meteorológico Militar de la Fuerza Aérea (MVC), Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI)]. Bajo la dirección de Bert Bolin, el equipo, que incluía también a Rossby que había regresado a Suecia desde EE. UU., inició en septiembre de 1954 integraciones diarias con un modelo barotrópico utilizando un ordenador de diseño sueco, el BESK (acrónimo de *Binär Elektronisk SekvensKalkylator* [Calculador Secuencial Electrónico Binario]), varios meses antes que los americanos.

La primera predicción operativa en tiempo real hasta 72 h fue realizada con motivo de unas maniobras militares en Suecia a finales de septiembre y principios de octubre de 1954, comenzando la producción operativa en diciembre de 1954, 6 meses antes que el inicio de las operaciones por parte del Weather Bureau. Podemos pues marcar esta fecha como el inicio de la predicción numérica operativa. Al igual que en el caso de las predicciones numéricas de la JNWPU, una parte significativa del tiempo se necesitaba para la recopilación y preparación de los datos, el cálculo manual de las condiciones iniciales, etc. Según su cálculo se precisaban aproximadamente 6h 30m distribuidos en las siguientes tareas:

70º Aniversario de la operacionalización de la predicción numérica del tiempo



Bert Bolin (izquierda, fuente: National Geographic) y Carl-Gustav Rossby (derecha; fuente: Wikipedia), principales responsables de la operacionalización de la predicción numérica del tiempo en Suecia

- ✓ Comprobación y transcripción de los datos a mapas 1h 30m
- ✓ Elaboración manual del mapa del análisis de 500 mb 1h 30m
- ✓ Lectura de los valores analizados en los puntos de rejilla 1h 20m
- ✓ Grabación de las tarjetas con los datos iniciales 40m
- ✓ Comprobación y corrección 20m
- ✓ Tiempo de cálculo en el ordenador para la predicción 40m
- ✓ Representación gráfica de las predicciones 30m

Como se ve, el tiempo de cálculo de la predicción apenas representaba el 10 % del total de las tareas conducentes a generar una predicción numérica operativa del tiempo. En los siguientes años se avanzó significativamente en lo que actualmente se denomina asimilación de datos que incluye además un control de calidad de las observaciones. Todos los detalles de la iniciativa sueca, incluidos la relación --no siempre fácil-- entre las instituciones meteorológicas suecas, y los viajes, visitas y estancias con sus homólogos americanos han sido reconstruidos en detalle por Persson (2005).

Desde estas pioneras predicciones numéricas operativas en 1955, los modelos numéricos han progresado significativamente pasando desde el uso de ecuaciones filtradas, bien sea barotrópicas o baroclínicas, a la utilización de ecuaciones primitivas primero hidrostáticas y más recientemente no hidrostáticas. El aumento de la resolución y de la complejidad de las parametrizaciones físicas ha avanzado en paralelo con el desarrollo y disponibilidad de ordenadores cada vez más potentes.

Desde los inicios de la predicción numérica del tiempo fue claro que se nece-

sitaba de un método para controlar qué datos observacionales habría que conservar y cuáles (sospechosos) eliminar antes de ejecutar el modelo. Pronto se vio que a medida que se enfrentaban a una avalancha de información observacional, los sistemas de asimilación de datos seguirían siendo fundamentales para el éxito de la predicción numérica del tiempo. La asimilación de datos ha evolucionado, en particular en los últimos tres decenios, desde un simple sistema de gestión de datos e interpolaciones a un enfoque matemático complejo centrado en extraer la información crítica de las observaciones utilizadas para inicializar los modelos. Los esquemas de análisis pasaron de una base empírica a una teórica en la

década de 1980. La introducción de técnicas de asimilación variacional ha permitido utilizar todas las observaciones incluidas las que no se relacionan linealmente con las variables meteorológicas que se precisan inicializar para integrar un modelo numérico. El uso directo de radiancias obtenidas por satélite dentro de los sistemas variacionales de asimilación de datos produjo mejoras significativas en la capacidad de pronóstico para los hemisferios norte y sur. Los avances en la modelización requieren de la inicialización de variables que van mucho más allá del viento, la temperatura y la presión superficial. Los modelos actuales necesitan información sobre nubes, ozono y otros gases, aerosoles y variables de superficie, como la humedad del suelo y la cubierta de nieve. El aumento del número de observaciones diarias que deben asimilarse para inicializar los modelos ha crecido exponencialmente en los últimos años, singularmente las de los sensores a bordo de satélites. El desafío para el futuro será conciliar la potencia informática con las mejoras técnicas necesarias para



Bert Bolin (izquierda) muestra a Ragnar Fjørtoft (centro) y George Corby (derecha) un ejemplo de producción totalmente automática de una predicción basada en el modelo barotrópico integrado en el ordenador BESK (fuente: Persson 2005)

asimilar con éxito todos estos nuevos datos sin aumentar significativamente los tiempos de ejecución. Las técnicas de asimilación de datos basadas en asimilación cuatridimensional o en filtros de Kalman por conjuntos han permitido reducir las fuentes de errores y aumentar la precisión de las predicciones, así como utilizar ingentes cantidades de datos con alta resolución.

Hasta principios de los años 90s los centros operativos de predicción numérica del tiempo calculaban un único pronóstico que se inicializaba con la mejor estimación de las condiciones iniciales. Sin embargo, con la introducción de la predicción *ensemble* (o por conjuntos) que se basa no en una única predicción sino en un conjunto de predicciones, cada una de ellas inicializada con condiciones iniciales ligeramente perturbadas, a partir de las cuales se puede producir mejores predicciones y lo que es más importante una estimación de su incertidumbre. La media del conjunto de predicciones es generalmente más precisa que un único pronóstico determinista y muestra una mayor consistencia entre las distintas ejecuciones sucesivas, y la dispersión de las soluciones proporciona información sobre los errores y la incertidumbre del pronóstico. Las predicciones por conjuntos proporcionan a los predictores operativos un método objetivo para considerar una variedad de escenarios atmosféricos que complementa los métodos subjetivos existentes. Las predicciones por conjuntos son actualmente reconocidas como indispensables para los predictores operativos y han promovido una ruptura con el pensamiento puramente determinista en la predicción operativa (Palmer 2018). La paulatina mejora de la predicción numérica del tiempo, incluyendo la predicción por conjuntos, ha llegado a ser calificada como una revolución silenciosa (*quiet revolution*, en inglés) en el área de las ciencias físicas comparable a otras revoluciones científicas recientes como la simulación del cerebro humano o la evolución inicial del universo (Bauer et al. 2015).

La predicción numérica meteorológica del tiempo está cambiando de forma acelerada, además de por la evolución de la ciencia subyacente, por las nuevas oportunidades en la tecnología digital y

por la emergencia de una vasta comunidad de investigación en aprendizaje automático (*machine learning*). En este contexto, se han desarrollado modelos numéricos de predicción basados en datos (actualmente reanálisis) en lugar de las ecuaciones que describen el fluido atmosférico. Los reanálisis se están convirtiendo en los datos indispensables para el entrenamiento de nuevos algoritmos de predicción basados en datos. Este nuevo entorno está cambiando las estrategias de los servicios meteorológicos a la vez que se abre la puerta a nuevos actores como las empresas tecnológicas con grandes capacidades informáticas y de manejo de datos (Rodríguez Camino 2024; Bauer 2024).

En definitiva, podemos conmemorar en 2025 a la vez el 75 aniversario de la muy conocida primera predicción numérica del tiempo que tuvo éxito y el 70 aniversario de la menos conocida operacionalización de la predicción numérica del tiempo que tuvo su comienzo a finales de 1954 en Suecia y mediados de 1955 en EE. UU. Sin embargo, todavía tuvieron que pasar bastantes años hasta que los predictores operativos fueron abandonando paulatinamente los métodos clásicos de predicción basados en un análisis manual detallado juntamente con métodos gráficos basados en advección y fueron sustituyéndolos por la utilización y explotación masiva de las salidas de los modelos numéricos (Benjamin et al. 2019).

Mientras que los protagonistas del desarrollo inicial de las bases teóricas de la predicción numérica del tiempo han sido con frecuencia reconocidos, no ha sucedido lo mismo con los responsables de su operacionalización que contribuyeron significativamente a resolver muchos problemas prácticos. Entre estos últimos podemos destacar a Cressman por parte de EE. UU. y a Bolin por parte de Suecia. El mismo Cressman desarrolló el método de análisis basado en correcciones sucesivas que se ha utilizado ampliamente en predicción numérica del tiempo, llegando a ser director del National Weather Service (heredero del Weather Bureau) entre 1965 y 1979 contribuyendo significativamente a su modernización. Bolin, por su parte, desde el MISU promovió la cooperación internacional para la investigación meteorológica siendo el Informe

Brundland y el IPCC las iniciativas más conocidas y reconocidas a las que él contribuyó de forma esencial para que pudieran llegar a ver la luz.

Referencias

- Bauer, P., A. Thorpe, and G. Brunet, 2015: The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525, 47–57, <https://doi.org/10.1038/nature14956>
- Bauer, P., 2024: What if? Numerical weather prediction at the crossroads. *Journal of the European Meteorological Society*, Volume 1, 100002, <https://doi.org/10.1016/j.jemets.2024.100002>
- Benjamin, S. G., J. M. Brown, G. Brunet, P. Lynch, K. Saito, and T. W. Schlatter, 2018: 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications. *Meteor. Monogr.*, 59, 13.1–13.67, <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHSD-18-0020.1>
- Charney, J. G., Fjörtoft, R., & von Neumann, J. (1950). Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus*, 2(4), 237–254, <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>
- Harper, K., L. W. Uccellini, E. Kalnay, K. Carey, and L. Morone (2007). 50th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 88, 639–650, <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-5-639>
- Lynch, P. (2006). *The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream*. Cambridge University Press, ISBN: 978-0521857291.
- Nebeker, F. (1995). *Calculating the Weather, Meteorology in the 20th Century*, San Diego, California, Academic Press.
- Palmer, T. (2018). The ECMWF ensemble prediction system: looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 145, 12–24, <https://doi.org/10.1002/qj.3383>
- Persson, A. (2005). Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: An historical introduction. Part I: Internationalism and engineering NWP in Sweden, 1952–69. *Meteor. Appl.*, 12, 135–159, <https://doi.org/10.1017/S1350482705001593>
- Rodríguez Camino, E. (2024). Predicción numérica del tiempo: ¿basada en leyes o en datos? *Tiempo y Clima (Boletín de la AME)*, 5, 83, 9–13, <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/2645>
- Shuman, F. G. (1989). History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *Wea. Forecasting*, 4, 286–296, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1989\)004%3C0286:HONWPA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1989)004%3C0286:HONWPA%3E2.0.CO;2)
- Smagorjnsky, J. (1983). The Beginnings of Numerical Weather Prediction and General Circulation Modeling: Early Recollections, *Advances in Geophysics*, 25, 3–37, [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60170-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60170-3)