

Supercomputación: un factor clave en la evolución de la predicción del tiempo

11

DOI: [10.31978/014-18-009-X.11](https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.11)

DANIEL SANTOS-MUÑOZ

Project Leader for System, High Resolution Limited Area Model (HIRLAM), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)

ANEXO DE RAMÓN SUÁREZ CUBILLO

Ingeniero de sistemas Big Data, PRAGSIS

The sciences do not try to explain, they hardly even try to interpret, they mainly make models. By a model is meant a mathematical construct which, with the addition of certain verbal interpretations, describes observed phenomena. The justification of such a mathematical construct is solely and precisely that it is expected to work - that is correctly to describe phenomena from a reasonably wide area. Furthermore, it must satisfy certain esthetic criteria - that is, in relation to how much it describes, it must be rather simple.

Method in the Physical Sciences, in The Unity of Knowledge, 1955, ed. L. G. Leary – JOHN VON NEUMANN

La predicción del tiempo ha ido siempre de la mano de la necesidad de realizar cálculos numéricos, por lo que los más grandes computadores del mundo han sido grandes aliados de los meteorólogos.

Palabras clave: supercomputación, computación de alto rendimiento, big data.

Imagen parte superior: BEATRIZ BURGUETE AZNAR, madre del editor de este libro, con el primer supercomputador en España, IBM 1620, Laboratorio de Automática UCM-CSIC, 1962.



Figura 11.1: Representación artística del concepto de fábrica de predicciones planteado por RICHARDSON. Fuente: FRANCOIS SCHUITEN.

11.1 Contexto histórico

La meteorología como ciencia es relativamente joven. La primera predicción meteorológica, con base científica, se atribuye al almirante ROBERT FITZROY en 1860 [9]. El almirante de la Marina Real Británica, además de comandar el HMS *Beagle*, el navío en el que CHARLES DARWIN realizó sus viajes alrededor del mundo, hizo grandes progresos en la predicción del tiempo. FITZROY utilizaba medidas de presión en diversos puntos transmitidas mediante telégrafo para obtener patrones atmosféricos, que le permitieron lograr mayor precisión que sus contemporáneos en sus predicciones. Su gran labor se vio reflejada al publicarse diariamente sus partes meteorológicos en el *London Times* a partir del 1 de agosto de 1861. Desde esa fecha se considera a FITZROY fundador del *MetOffice* (Servicio Meteorológico del Reino Unido).

No fue hasta la llegada del siglo XX, cuando el físico noruego VILHELM F. K. BJERKNES (1862-1951) sentó las bases que permiten expresar la evolución en el tiempo a partir de una situación meteorológica inicial utilizando leyes físicas y, por tanto, abrió la posibilidad de la realización de predicciones mediante *cálculos numéricos*. En 1904 BJERKNES publicó un

artículo en alemán cuyo título puede ser traducido como *El problema de la predicción del tiempo desde el punto de vista de la mecánica y la física* [2, 3]. En este artículo BJERKNES aplicaba la dinámica de fluidos y la termodinámica para expresar la evolución en el tiempo de una situación meteorológica inicial. Este es el punto de partida de la predicción meteorológica mediante modelos numéricos tal y como hoy la conocemos en la actualidad.

Las ecuaciones que BJERKNES propuso y que son la base de la *modelización atmosférica* (cap. 10 en la página 129), son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales. La no linealidad es una característica matemática que da lugar a procesos de retroalimentación y gran sensibilidad a los cambios en la condición inicial del problema. Debido a la no linealidad, matemáticamente se establece que el conjunto de ecuaciones no tiene solución analítica, es decir, que la solución al sistema no puede expresarse por una «fórmula matemática» o función (cap. 5 en la página 49).

Estas ecuaciones, conocidas como sistema de *ecuaciones primitivas* (sec. 10.4 en la página 135), está constituido por la ecuación de estado de los gases ideales, la ecuación termodinámica de la energía, la ecuación de continuidad o conservación de masa y la

ecuación de momento de una partícula o burbuja de aire [7]. Debido a la no existencia de una solución analítica se emplean métodos numéricos para su resolución. Estos métodos se basan en dividir el espacio y el tiempo en puntos discretos mediante el empleo de rejillas tridimensionales y aplicar metodologías de cálculo para establecer la evolución en el tiempo de la atmósfera en cada uno de los puntos definidos.

Pero la necesidad de un elevado número de operaciones matemáticas llevó a que, hasta la llegada de los grandes computadores, las predicciones del tiempo se basasen en la simple observación y la aplicación de unas reglas básicas para estimar su evolución. Este tipo de predicción, puramente observacional, no era muy diferente a la que podría realizar cualquier persona que llevara a cabo actividades aire libre, por ejemplo pastores o agricultores. En España son conocidos métodos de predicción basados en creencias y observaciones del tiempo como *Las Cabañuelas* o el *Calendario Zaragozano*. También la cultura popular reflejada en el refranero está llena de menciones al tiempo y reglas para tratar de hacer predicciones meteorológicas. Muchas de estas reglas funcionan localmente, porque tienen una base científica, aunque la cultura popular del refranero lo desconozca.

Aún sin supercomputadores, hubo esfuerzos titánicos reseñables para aplicar la metodología de BJERKNES a la predicción. El médico y meteorólogo británico LEWIS FRY RICHARDSON hizo la primera predicción mediante cálculos manuales el 20 de mayo de 1910. Para ello realizó manualmente los cálculos durante seis semanas, y predijo un aumento de 145 hPa en la presión en superficie en 6 h cometiendo un gran error en su predicción. El propio RICHARDSON en 1922 publicó *Weather Prediction by Numerical Process* [12] donde introdujo la idea de la necesidad del cálculo numérico en paralelo para la realización de predicciones meteorológicas. Para ello acuñó el concepto de *forecast factory* y estimó la necesidad de 64 000 HPU (Human Processing Units) para hacer viable una buena predicción meteorológica (Figura 11.1 en la página anterior).

El siguiente gran salto en la predicción meteorológica se dio en el momento en el que aparecieron los primeros ordenadores. Ya no era necesario hacer cálculos manualmente, los ordenadores comenzaban a hacerlos por nosotros. Esto permitió aumentar la complejidad

de los cálculos y el número de datos a tratar reduciendo en una mejora de las predicciones meteorológicas.

La primera predicción por ordenador se ejecutó en 1950, en el primer supercomputador que hubo en el mundo. El *Electronic Numerical Integrator And Computer* (ENIAC) fue construido en 1946 en la Universidad de Pensilvania por JOHN PRESER ECKERT y JOHN WILLIAM MAUCHLY [6]. ENIAC ocupaba una superficie de 167 m² y tenía un peso de 27 toneladas al alojar 17 468 válvulas, 7 200 diodos de cristal, 1 500 relés, 70 000 resistencias, 10 000 condensadores y cinco millones de soldaduras. Su capacidad de cálculo era de unas 5 000 sumas y 300 multiplicaciones por segundo y requería la operación manual de unos 6 000 interruptores (Figura 11.2).

Usando la capacidad de cálculo de ENIAC, CHARNEY, FJØRTOFT y VON NEUMANN [4, 11] realizaron la primera integración numérica de un modelo meteorológico, suponiendo un éxito y abrir una de las puertas a la predicción meteorológica tal y como la conocemos en la actualidad.

Desde ese momento, la previsión meteorológica siempre ha estado estrechamente relacionada con los mayores supercomputadores que habido en el mundo. Actualmente todos los grandes centros meteorológicos cuentan con superordenadores que les permiten hacer los cálculos y procesar miles de millones de datos en tiempos cada vez más ajustados a las necesidades de los meteorólogos.

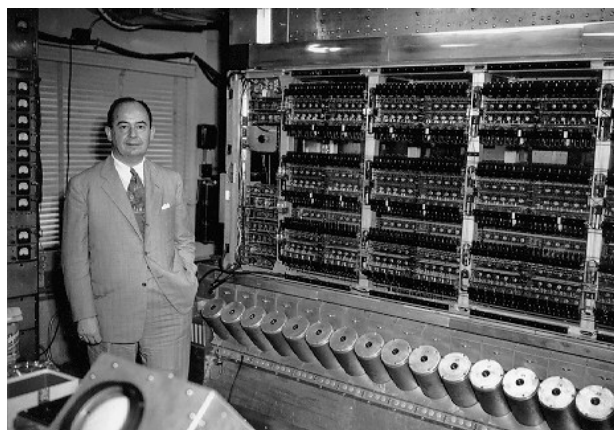


Figura 11.2: El matemático, físico, científico de la computación y polímata JON VON NEUMANN (NEUMANN JÁNOS LAJOS) junto a una parte del primer superordenador ENIAC.



Figura 11.3: Primeros supercomputadores de Control Data Corporation CDC 1604 (izquierda) y CDC 6600 (derecha).

11.2 Cray, el padre de la supercomputación

SEYMOUR CRAY (1925-1996) es considerado el padre de la supercomputación moderna. En 1957 creó *Control Data Corporation* (CDC) que fue la compañía que construyó el primer supercomputador comercial de transistores, el CDC 1604 (Figura 11.3 izquierda). En 1963 se fabricó el CDC 6600 de la era actual enfriado por freón y con una potencia de cálculo de 9 MFLOPS (Mega FLOPS), o lo que es lo mismo 9×10^6 operaciones por segundo de coma flotante (Figura 11.3 derecha).

Posteriormente apareció en el mercado el primer supercomputador de 4 procesadores y memoria compartida, el CDC 8600. Ya en 1972 CDC detuvo el desarrollo de supercomputadores y SEYMOUR CRAY creó la actual *Cray Research Inc.* (<http://www.cray.com>).

11.3 La supercomputación en el ECMWF como ejemplo de evolución

El nacimiento de la supercomputación comercial permitió, en el año 1975, la creación del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo, *European Centre for Medium-range Weather Forecasts* (ECMWF, <https://www.ecmwf.int>, cap. 19 en la página 289) en Reading (Reino Unido). El ECMWF está formado por 21 estados miembros y 13 estados cooperantes. El objetivo de esta institución europea es aglutinar recursos para producir datos y predicciones a medio plazo lo más precisas posible.

La primera versión del modelo numérico de predicción del ECMWF fue desarrollada en un supercomputador CDC6600 durante los años 1976 al 1978. Pese

a que el CDC6600 era uno de los sistemas más potentes de la época, el modelo necesitaba 12 días para producir 10 días de predicción.

La primera predicción en tiempo real para medio plazo fue realizada en junio de 1979, para lo cual se utilizó un *Cray-1A* (Figura 11.4). Se utilizaban 5 horas de CPU para producir una predicción a 10 días, 50 veces más rápido que el CDC6600. El Cray-1A fue reemplazado por un *Cray X-MP/22* en 1984 y éste por un *Cray X-MP/48* en 1986. Posteriormente, en 1990, el X-MP/48 fue cambiado por un Y-MP8/8-64, siendo el primer supercomputador del ECMWF con sistema operativo UNIX llamado *UNICOS* por Cray.



Figura 11.4: Primer supercomputador Cray-1A del ECMWF. Estaba compuesto de un único procesador a 80 MHz, 8 MB de memoria, un almacenamiento en disco de 2.4 GB y una potencia pico teórica de 160 MFLOPS.



Figura 11.5: Cray C90 del ECMWF. Estaba compuesto por 16 CPU, 16 GB de memoria y una potencia pico teórica de 1 GFLOPS.

La llegada en 1992 del Cray C90 (Figura 11.5), permitió producir de forma operacional predicciones por conjuntos o ensembles.

Hasta 1994 la arquitectura de todos los supercomputadores del ECMWF se basaba en sistemas de *memoria compartida*. La instalación ese año de un Cray T3D supuso el paso a sistemas de *memoria distribuida* y, por tanto, la recodificación de gran parte del modelo de predicción meteorológica para el uso de computación en paralelo mediante paso de mensajes (Message Passing Interface, MPI).

Durante los años 1996 a 2002 cuatro supercomputadores Fujitsu de la serie VP700 y VP5000 fueron utilizados para la integración del sistema de predicción meteorológica, llegando a potencias de cálculo sostenidas de 300 GFLOPS.

Entre los años 2002-2014 el ECMWF instaló simultáneamente dos clusters de supercomputación de IBM cada vez que actualizó su sistema de cálculo (Figura 11.6). Todos ellos eran sistemas de *procesadores escalares*, en contraposición a los *procesadores vectoriales* anteriormente usados. Durante estos años se impuso el uso de redes de baja latencia, como InfiniBand DDR, junto con un incremento progresivo del número de servidores y procesadores, lo que llevó a capacidades de cálculo de entre el 200 al 500 % superiores en cada nuevo cluster.



Figura 11.6: Uno de los clusters de IBM formado por 768 servidores POWER7-775 conectados mediante IBM Host Fabric Interface (HFI). Cada uno tenía una potencia pico de 1.5 PFLOPS.

En 2014, dos clusters independientes Cray XC30 se ubicaron en salas separadas. Contaban con sistemas de energía y enfriamiento separados para protegerlos contra una amplia gama de posibles fallos. Cada subsistema constaba de 19 armarios Cray XC30 equipados con procesadores Bridge Intel Ivy ubicados en 3 505 nodos de cómputo que contenían un total de 84 120 núcleos de cómputo. Contenían además una serie nodos para *login* y para desarrollo y más de 6 petabytes de almacenamiento con capacidad para intercambiar sistemas de archivos entre ambas salas.

En 2015, Cray y el ECMWF decidieron extender su colaboración hasta el año 2020, por lo que a principios de 2016, los XC30 fueron actualizados a la nueva generación de procesadores de Intel, incrementando la memoria y la capacidad de almacenamiento.



Figura 11.7: Uno de los clusters de Cray XC40 formado por 1 805 nodos y 64 980 cores de cómputo. Cada uno tenía una potencia pico de 4 250 TFLOPS.



Figura 11.8: Superordenadores anteriores al actual en AEMET/INM: Cray C94 (1994-2003), Cray SV1 (2004-2008) y Cray X1e (2005-2016).

Esta nueva evolución, denominada XC40, solo incrementó los nodos de cómputo a 3 610, pero gracias a los procesadores Broadwell, el número de núcleos creció hasta los 129 960. La potencia pico teórica actual ronda los 8 500 TFLOPS (Figura 11.7 en la página anterior).

Los clusters del ECMWF también dan servicio a los países miembros, entre los que se incluye España que, junto a los miembros del consorcio HIRLAM (<https://www.hirlam.org>) al que pertenece (cap. 20 en la página 301), mantiene el sistema de modernización de mesoescala HARMONIE-AROME (ver sec. 20.4 en la página 310).

11.4 La supercomputación en AEMET

El antiguo Instituto Nacional de Meteorología (INM), actual Agencia Estatal de Meteorología (AEMET),

durante la década de 1980 tuvo su primer gran ordenador, un 360 para propósito general donde no se ejecutaba ningún modelo numérico de predicción. A finales de los 80 llegó un *Fujitsu* FACOM M-760 donde ya se ejecutó el primer modelo de área limitada, denominado LAM-91.

En el periodo 1994-2002 el antiguo INM dispuso de un Cray C94 con 4 *procesadores vectoriales* y un 1 GByte de memoria. A partir de 2002 dos Cray, primero un SV1 y posteriormente un X1E fueron la base para el cálculo de las predicciones. El Cray SV1, con 16 procesadores y 16 GB de memoria fue el superordenador donde ya se ejecutaba el modelo de área limitada HIRLAM (sec. 20.3 en la página 310). La capacidad de cálculo se incrementó con la adquisición de un Cray X1E, que tenía un rendimiento teórico de 2.2 TFLOPS. Para ello utilizaba 16 nodos y un total de 128 procesadores y 512 GB de memoria.



Figura 11.9: Sistema Bull de AEMET en la actualidad (2017) formado por 324 nodos, 648 procesadores, 7 776 cores, 31.5 TB de memoria y con un rendimiento pico teórico de 168 TFLOPS.

En la actualidad (2017) **AEMET** dispone de un sistema Bull con 18 chasis Bullx B710, cada uno con 18 nodos de 2 procesadores Intel Xeon 2697 V2 Ivy Bridge de 12 cores a 2.7 GHz con un total de 324 nodos, 180 de ellos con 128 GB de memoria y 144 con 64 GB de memoria, ambas DDR3 (Figura 11.9), en total 324 nodos, 648 procesadores, 7 776 cores, 31.5 TB de memoria y con un rendimiento pico teórico de 168 **TFLOPS**. El sistema es enfriado mediante refrigeración líquida de alta eficiencia energética, gracias a su sistema *free cooling*, que refrigera mediante un circuito de agua sin apenas consumo eléctrico si la temperatura ambiente está por debajo de 26 °C. El rendimiento pico teórico de 168 **TFLOPS** lleva una media de consumo eléctrico de alrededor de 60 KWh.

En este sistema se ejecuta el modelo HARMONIE-AROME (sec. 20.4 en la página 310) ocho veces al día y está prevista la implementación de un sistema de predicción por conjuntos a corto plazo denominado AEMET-γSREPS (cap. 22 en la página 333).

11.5 Terminología asociada a la supercomputación

Los siguientes términos son utilizados de forma habitual en el lenguaje de los grandes ordenadores:

Sistemas de memoria compartida. Los sistemas de memoria compartida permiten mantener registros en un área común a varias unidades de procesamiento. En esta memoria se puede trabajar en paralelo utilizando hilos de procesamiento.

Sistemas de memoria distribuida. Los sistemas de memoria distribuida no permiten mantener registros en un área común de memoria a varias unidades de procesamiento. En esta memoria se puede trabajar en paralelo utilizando software de paso de mensajes.

Sistemas híbridos. Los sistemas híbridos son actualmente los mayoritarios teniendo capacidad de funcionar en paralelo conjuntamente como sistemas de memoria distribuida (paso de mensajes) y sistemas de memoria compartida (hilos).

Procesadores escalares. En los procesadores escalares cada instrucción de un procesador escalar opera sobre un dato cada vez.

Procesadores vectoriales. En los procesadores vectoriales una sola instrucción opera simultáneamente sobre un conjunto de datos.

Escalabilidad. Es la capacidad de un código de ejecutarse cada vez más rápido al aumentar la capacidad de cálculo. La mayoría de los códigos tienen un límite asintótico donde el aumento de la capacidad no produce menores tiempos de ejecución.

FLOPS. Del inglés *floating point operations per second*, operaciones de coma flotante por segundo, es una medida del rendimiento de un ordenador, especialmente en supercomputación. Los ordenadores personales suelen operar a unos cuantos **GFLOPS** mientras que los más rápidos supercomputadores del planeta alcanzan varias decenas de **PFLOPS**.

11.6 Anexo: Big Data

RAMÓN SUÁREZ CUBILLO

Ingeniero de sistemas Big Data, PRAGSIS

El hombre siempre se las ha ingeniado para almacenar información en diferentes medios con objeto de realizar posteriores análisis. Fue a mediados de los 90 y debido a los avances tecnológicos cuando comenzó a ser más rentable almacenar sobre medios digitales que sobre papel. Desde entonces, la capacidad de procesamiento y velocidad de acceso a los datos digitales no ha dejado de multiplicarse según la ley de MOORE (ver caja) y en paralelo el número de herramientas de acceso y de análisis de datos. Sin embargo, incluso los mayores ordenadores son insuficientes para cubrir algunas necesidades de tratamiento de datos, tanto comerciales como científicas. Esta insuficiencia, producida por la incapacidad de adquirir, almacenar o procesar gran cantidad de información, hizo necesario un nuevo enfoque: *Big Data*.

La ley de MOORE expresa que aproximadamente cada dos años se duplica el número de transistores en un microprocesador y se puede aplicar a la velocidad de CPU y de transmisión de datos y a la cantidad de memoria de las computadoras.

El término Big Data se aplica al procesamiento de datos en cantidades tales que se encuentran más allá de la capacidad del *hardware* y *software* usado para producir

resultados dentro de un tiempo razonable. El concepto *tiempo razonable* es impreciso, pero indica que el objetivo es disminuir ese tiempo. El modo de hacerlo consiste en utilizar en paralelo varios ordenadores allí donde uno solo no puede ofrecer la capacidad necesaria de almacenamiento y cómputo, lo que se conoce como almacenamiento y computación distribuidos.

El **almacenamiento distribuido** no es estrictamente necesario. Hay aplicaciones, como *Spark*, que permiten realizar **análisis sobre datos al vuelo**. Estos datos se analizan en tiempo real sin necesidad de almacenar, como por ejemplo análisis sobre las costumbres de millones de usuarios basados en *logs* de navegación por internet.

Los ordenadores individuales son llamados entonces *nodos* y realizan diferentes funciones formando parte de un *cluster*, conjunto de nodos que funciona como un todo. La principal ventaja de los *clusters* radica en la *escalabilidad* horizontal. Este término describe la capacidad de permitir crecer añadiendo más nodos y, como consecuencia, la capacidad de aumentar la cantidad de almacenamiento y/o disminuir el tiempo de proceso de una manera sencilla y hasta tamaños que ya han alcanzado decenas de miles de nodos.

Almacenamiento distribuido. Entre los diferentes sistemas de almacenamiento distribuido, el más extendido es HDFS (ver caja). Los datos se almacenan en bloques de un tamaño definido y son replicados varias veces en nodos de almacenamiento llamados *datano-*

des. Otro tipo de nodos, los *namenodes*, controlan la ubicación de las réplicas de cada bloque en los diferentes nodos. Como consecuencia, estos sistemas tienen cierta tolerancia a fallos (no se pierden datos aunque un nodo falle) y ofrecen altos rendimientos al ser posible acceder al dato simultáneamente desde varios nodos.

Hadoop Distributed File System (HDFS) [1], escrito en *Java* para el *framework Hadoop*, debe su popularidad a que está concebido para ser ejecutado sobre *commodity hardware*, es decir, no requiere superordenadores, por lo que es posible desplegar ecosistemas de decenas de nodos a un coste bajo para estas escalas.

Computación distribuida. El paradigma más aplicado en la actualidad es *MapReduce* [10]. Se trata de un modelo de programación en paralelo desarrollado inicialmente para *Yahoo!* y de amplia difusión al tener una implementación en código abierto (*Open Source*). Su nombre se debe a sus dos principales funciones: *Map* y *Reduce*.

Map es una tarea que se paraleliza entre varios nodos. Cada tarea *Map* recoge una parte de la entrada de datos (pares de valores), devolviendo una lista de pares. Estas listas se ordenan, se agrupan por claves y finalmente se combinan.

Reduce recibe los datos obtenidos de la fase *Map* para devolver un valor reducido único para cada clave. Cada tarea *Reduce*, ejecutada en paralelo, produce un archivo de salida.

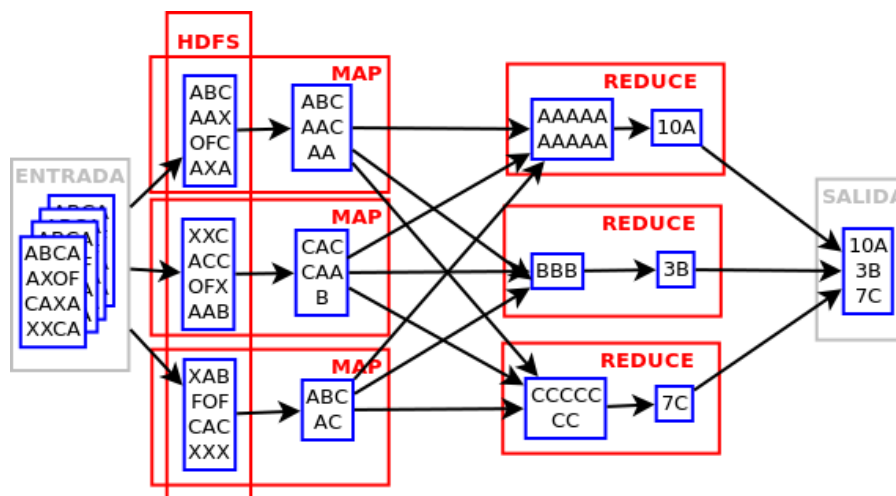


Figura 11.10: Esquema conceptual de Big Data.

Sobre esta arquitectura hay en continua evolución un ecosistema de aplicaciones que permiten gestionar *clusters*, orquestar cargas y procesos, realizar análisis de datos, visualizar resultados y, en general, interactuar con los sistemas del *cluster* y entre ellas. En 2017 hay centenares de aplicaciones formando parte de un *ecosistema Big Data* en continuo crecimiento [1, 5, 8, 10] (ver Figura 11.10 en la página anterior). Ésto, unido a la capacidad de escalar horizontalmente, permiten aventurar que nos encontramos sólo al co-

mienzo de un nuevo camino en el que queda mucho por recorrer.

11.7 Anexo: algunas personalidades relacionadas

Para finalizar este capítulo la Figura 11.11 presenta una selección cronológica de personalidades vinculadas a la predicción numérica y la supercomputación.



VILHELM FRIMAN KOREN BJERKNES (1862-1951), físico y meteorólogo noruego, revolucionó la meteorología planteando las ecuaciones primitivas que usan los modelos atmosféricos y dirigiendo la escuela de Bergen, contribuyendo así a construir los cimientos de la actual predicción del tiempo.



CHARNEY (1917-1981), meteorólogo estadounidense, considerado padre de la meteorología dinámica moderna, desarrolló las ecuaciones de la vorticidad quasi-geostrófica para resolver ondas planetarias y la teoría de la Inestabilidad Baroclina. Lideró el equipo que integró la primera predicción numérica en 1950 [4].



RAGNAR FJØRTOFT (1913-1998), meteorólogo noruego, formó parte del equipo de Princeton que en 1950 llevó a cabo la primera predicción numérica del tiempo de la historia con un ordenador ENIAC [4].



LEWIS FRY RICHARDSON (1881-1953), matemático, físico, meteorólogo y psicólogo británico, pionero en aplicar técnicas computacionales no sólo a la predicción del tiempo, sino también al estudio de las causas de las guerras y cómo prevenirlas.



NEUMANN JÁNOS LAJOS O JOHN VON MEUMANN (1903-1957), matemático, físico, experto en computación y erudito húngaro-estadounidense, contribuyó enormemente en numerosos campos dentro de sus disciplinas y fue pieza clave en el primer equipo que integró la primera predicción numérica en 1950 un superordenador ENIAC [4].

Figura 11.11: Personalidades en supercomputación y predicción numérica del tiempo.

11.8 Referencias

- [1] APACHE SOFTWARE FOUNDATION. *Hadoop*. URL: <https://hadoop.apache.org> (citado en páginas 152, 153).
- [2] BJERKNES, Vilhelm. “Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik”. En: *Meteor. Z.* 21 (1904), páginas 1-7 (citado en página 146).
- [3] BJERKNES, Vilhelm. “The problem of weather forecasting as a problem in mechanics and physics”. En: *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*. American Meteorological Society, 1999, páginas 1-4 (citado en página 146).
- [4] CHARNEY, Jules G, FJÖRTOFT, Ragnar y NEUMANN, J von. “Numerical integration of the barotropic vorticity equation”. En: *Tellus* 2.4 (1950), páginas 237-254. DOI: [10.3402/tellusa.v2i4.8607](https://doi.org/10.3402/tellusa.v2i4.8607) (citado en páginas 147, 153).
- [5] CLOUDERA. *Machine Learning | Analytics | Cloud - Cloudera*. URL: <https://www.cloudera.com/> (visitado 11-12-2017) (citado en página 153).
- [6] GOLDSTINE, Herman H y GOLDSTINE, Adele. “The electronic numerical integrator and computer (ENIAC)”. En: *Mathematical Tables and Other Aids to Computation* 2.15 (1946), páginas 97-110 (citado en página 147).
- [7] HOLTON, James R. y HAKIM, Gregory J. *An introduction to dynamic meteorology*. Volumen 88. Academic press, 2012. ISBN: 0123848679 (citado en página 147).
- [8] HORTONWORKS. *Data Management Platform, Solutions and Big Data Analysis | Hortonworks*. URL: <https://es.hortonworks.com/> (visitado 11-12-2017) (citado en página 153).
- [9] LYNCH, Peter. “The origins of computer weather prediction and climate modeling”. En: *Journal of Computational Physics* 227.7 (2008), páginas 3431-3444 (citado en página 146).
- [10] MAPR. *The Only Converged Data Platform | MapR*. URL: <https://mapr.com/> (visitado 11-12-2017) (citado en páginas 152, 153).
- [11] PLATZMAN, George W. “The ENIAC computations of 1950-gateway to numerical weather prediction”. En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 60.4 (1979), páginas 302-312 (citado en página 147).
- [12] RICHARDSON, Lewis F. *Weather Prediction by Numerical Process*. New York, 2007, página 236. ISBN: 9780521680448 (citado en página 147).

