

# Supercomputación y modelos meteorológicos

D. Santos-Muñoz<sup>1</sup>, M. L. Martín<sup>2</sup>, y M. Y. Luna<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agencia Estatal de Meteorología. C/Leonardo Prieto Castro 8. Madrid, 28040, España.

*dsantosm@aemet.es*

<sup>2</sup>Dpto. de Matemática Aplicada. E. de Ingeniería Informática. Universidad de Valladolid. Pza. Alto de los Leones, 1. Segovia 40005. España.

*mlmartin@eii.uva.es*

## RESUMEN<sup>1</sup>

El aumento de calidad y precisión de las predicciones meteorológicas va de la mano del incremento de la capacidad de cálculo mediante grandes supercomputadores.

La no linealidad y el caos determinista es la característica principal de los procesos atmosféricos. Es por esto que el uso de modelos numéricos de predicción del tiempo se hace imprescindible. La resolución espacio-temporal de estos modelos se ha ido incrementando gracias a la potencia de cálculo. Actualmente existen modelos operativos con una resolución espacial de 2.5 km y temporal horaria. En el caso de modelos de investigación donde los requerimientos de disponibilidad de las salidas no son tan exigentes se llega a resoluciones espaciales de 500 m y temporales de 10 minutos.

Una descripción de los métodos de cálculo, algoritmos y procesos físicos de los modelos meteorológicos permite entender por qué resulta imprescindible el uso de supercomputadores para la predicción meteorológica. Estas mismas bases son usadas en predicción climática para la obtención de posibles escenarios de calentamiento global indicativos de un cambio climático.

La evolución de la supercomputación desde el ENIAC hasta los actuales grandes clusters siempre ha contado como uno de sus grandes usuarios a los meteorólogos y climatólogos. Las nuevas tendencias de clusters basados en sistemas de menor consumo eléctrico, menor espacio necesario y mayor poder de cálculo permiten un mejor conocimiento de los procesos atmosféricos.

## 1. INTRODUCCIÓN

En 1904 el físico noruego Vilhelm F.K Bjerknes (1862-1951) 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 físi-

ca” (Bjerknes 1904). En este artículo Bjerknes aplicó la dinámica de fluidos y la termodinámica para expresar la evolución en el tiempo de una situación meteorológica inicial y, por tanto, abrió la posibilidad de la realización de predicciones mediante el uso de las leyes físicas. Este es el punto de partida de la predicción meteorológica mediante modelos numéricos tal y como hoy la conocemos.

Las ecuaciones que Bjerknes propuso, y que son la base de la modelización atmosférica, son un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales. La no linealidad es una característica matemática que da lugar a procesos de retroalimentación y alta 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” (función).

Estas ecuaciones, conocidas como sistema de ecuaciones primitivas, están constituidas 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 (Holton, 2012). 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 (Figura 1), y aplicar metodologías de cálculo para establecer la evolución en el tiempo de la atmósfera en cada uno de los puntos definidos. El desarrollo de estas técnicas de resolución de las ecuaciones mediante métodos numéricos se ha llevado a cabo de manera progresiva en diversas etapas y se han ido aplicando a la obtención de predicciones meteorológicas y climáticas.

---

*Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Creative Commons Attribution-Non Commercial-Non Derivs (CC BY-NC-ND) Spain 3.0. Esta licencia permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, con fines no comerciales, siempre que se cite la fuente y el autor original y no se modifique el contenido de la obra.*



Figura 1: Diversas formas de discretizar la Tierra y su atmosfera (Fuente: The COMET Program /NCAR).

En la década de los cincuenta del siglo XX, Charney, Fjørtoft y von Neumann, discípulos de Bjerknes, generaron una predicción a 24 horas con una simplificación en las ecuaciones conocida con aproximación cuasi-geostrofica. Posteriormente, Phillips en 1956 demostró mediante un modelo de dos niveles la estrecha relación existente entre la dinámica de los ciclones y la circulación global atmosférica.

Los modelos de circulación global de ecuaciones primitivas usando ecuaciones sin aproximaciones cuasi-geostroficas aparecen en la década de los 70 del siglo XX. En la década de los 80 nacen los modelos tal y como hoy los conocemos a diversas escalas espaciales tanto global como regional. La mejora de las predicciones mediante modelos numéricos es consecuencia directa del aumento de los recursos de cálculo computacional, de la densidad de las redes de observación, del incremento de la resolución espacio-temporal de los modelos, las mejoras en las metodologías de uso de los datos observacionales y a un mejor conocimiento de la dinámica y los procesos microfísicos atmosféricos.

A partir de los años 90, los modelos acoplados: atmósfera-océano, atmósfera-océano-suelo y los modelos de alta resolución espacio temporal, han permitido avanzar en el desarrollo de las técnicas de análisis, diagnóstico y predicción meteorológica (Mechoso y Arakawa, 2003).

En primer lugar, cabe destacar que hay dos enfoques desde el punto de vista del modelado atmosférico: el determinista y el probabilista. Ambos son necesarios y dan una gran información al usuario final mediante los productos generados por estos sistemas. Los productos numéricos, son la base fundamental con la que el predictor meteorológico ha de realizar sus pronósticos. Además se ayudará de otras fuentes de información, como pueden ser imágenes de satélite, para contrastar si la evolución prevista por el modelo se ajusta a lo que está teniendo lugar y establecer posibles adaptaciones y correcciones a lo que el modelo ha establecido con anterioridad para la realización del pronóstico definitivo.

Inicialmente, y debido a la gran necesidad de cálculos para resolver las ecuaciones primitivas, se optó por el desarrollo y uso de un único modelo en cada gran centro meteorológico y/o universidad. Este concepto se

conoce predicción determinista, ya que establecido el estado inicial atmosférico su evolución queda determinada de forma única por la evolución descrita por el modelo atmosférico.

Los primeros modelos deterministas que fueron desarrollados eran globales y han seguido evolucionando para ser utilizados actualmente en la realización de predicciones. Debido a que la circulación atmosférica esta simulada a lo largo de todo el globo, los hace idóneos para predicciones con validez a medio y largo plazo (a más de tres días) y para estudios climáticos, así como para fenómenos atmosféricos de gran extensión espacial.

Las grandes necesidades de cálculo numérico para cubrir todo el volumen atmosférico y los limitados recursos de supercomputación favorecieron la aparición de los modelos deterministas de área limitada. Estos modelos resuelven las ecuaciones de forma numérica en un área de interés específica, permitiendo así una mayor resolución espacio-temporal en el proceso de modelado. Los modelos de área limitada son idóneos para fenómenos de carácter más regional o local, dependiendo de la extensión del área que cubran, así como fenómenos atmosféricos que se caractericen por una mayor resolución espacio-temporal que la resuelta por un modelo global. Las predicciones a menos de tres días y fenómenos con rápidos desarrollos como el caso de tormentas son resueltas más satisfactoriamente por modelos de este tipo.

En la Figura 2 se muestran las áreas cubiertas por los modelos de área limitada del Servicio Meteorológico del Reino Unido, uno de ellos (sombreado en color rojo) tiene una extensión que permite la caracterización de fenómenos de mayor dimensión espacial y otro (en color crema) generará soluciones de carácter más local.



Figura 2: Modelos de área limitada del Servicio Meteorológico del Reino Unido, uno de ellos (sombreado en color rojo) tiene una extensión que permite la caracterización de fenómenos de mayor dimensión espacial y otro (en color crema) generará soluciones de carácter más local (Fuente UK Metoffice).

Inicialmente la mayoría de los esfuerzos de investigación y computacionales se dedicaron a producir una predicción meteorológica determinista lo más precisa posible (Tracton y Kalnay, 1993). A pesar de todo, los

modelos realizan aproximaciones debido a que algunas variables o procesos no pueden ser resueltos a las resoluciones espaciales y temporales en las que trabaja el modelo. Estos procesos han de ser resueltos de forma aproximada dando lugar a errores asociados al propio modelo. Aún asumiendo que el modelo fuese capaz de resolver de forma perfecta todos los procesos atmosféricos, sería imposible obtener la descripción perfecta de la situación atmosférica inicial con toda precisión en todo lugar.

El matemático y meteorólogo estadounidense E. N. Lorenz (1917-2008) demostró que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales de un modelo atmosférico simplificado no producen soluciones únicas sino un conjunto de posibles soluciones debido a la no linealidad de las ecuaciones. La sensibilidad a las condiciones iniciales quedó expresada en el título de su presentación en la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia en 1972: “Predictibilidad: El batir de las alas de una mariposa en Brasil puede generar un tornado en Texas” acuñando el concepto de efecto mariposa e introduciendo la teoría del caos en la predicción numérica de la atmósfera. Es por ello que la capacidad de predecir o predictibilidad de los estados futuros atmosféricos esté limitada en el tiempo, ya que los errores en las soluciones son mayores cuanto más lejano en el tiempo es el instante a predecir. Esto es debido a que los errores en la determinación de la condiciones iniciales utilizadas por los modelos se ven amplificadas (Lorenz, 1963).

La mejora en los modelos numéricos operativos o de investigación redundan en una mejor caracterización de los procesos atmosféricos, pero siempre adolecerán de limitaciones asociadas tanto a la escala de los procesos a simular como a las aproximaciones realizadas para la resolución numérica de los mismos. Otra de las limitaciones inherentes al proceso de modelización está relacionada con la disponibilidad de datos observacionales en cada punto de la atmósfera con una resolución espacio-temporal suficiente para que los procesos a modelar puedan ser resueltos de forma satisfactoria.

La generación de múltiples predicciones usando diversas metodologías, como por ejemplo la simulación numérica partiendo de condiciones iniciales ligeramente diferentes, dan lugar al concepto probabilista de la predicción. Las predicciones probabilistas permiten estimar la incertidumbre en el proceso de modelado atmosférico, y junto a las predicciones deterministas de alta resolución forman la pareja ideal para la realización de predicciones y la toma de decisiones.

Los sistemas de predicción probabilistas combinan diversas metodologías y pueden ser implementados mediante modelos globales o de área limitada. El conjunto de soluciones permite establecer la probabilidad de un estado atmosférico futuro tanto en el corto, en el medio o en el largo plazo, así como en escenarios cli-

máticos. La metodología de generación de sistemas probabilistas es conocida como sistemas de predicción por conjuntos o *ensembles*.

En la Figura 3 se representa de forma esquemática la realización de predicciones numéricas mediante un modelo determinista (a) y un sistema probabilista (b). En el caso del modelo determinista se parte de un único estado inicial atmosférico (punto azul) y se calcula su evolución mediante el modelo numérico (representado por la línea curva de color rojo) hasta alcanzar el instante temporal donde se desea obtener la predicción (punto verde). Para la realización de una predicción probabilista se parte de diversos estados atmosféricos cercanos al estado inicial (puntos de color negro) y se les hace evolucionar mediante el modelo (líneas de color negro) hasta un conjunto de estados finales que permitirán determinar la probabilidad de una predicción en ese instante.

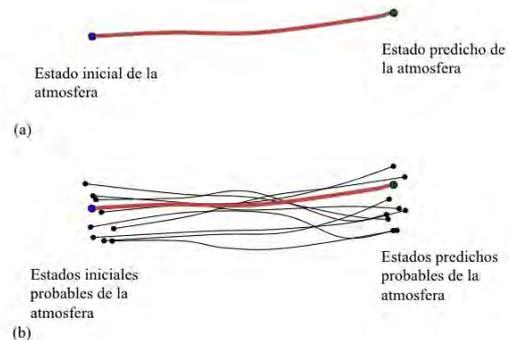


Figura 3: Representación esquemática de la realización de predicciones numéricas mediante un modelo determinista (a) y un sistema probabilista (b).

Tanto los modelos deterministas como los sistemas probabilistas siempre serán aproximaciones y tratarán de simular de forma lo más realista posible los procesos que tienen lugar en la atmósfera y sus interrelaciones con los océanos y tierra firme. Siempre habrá un grado de inexactitud y, por tanto, un grado de incertidumbre, por eso lo único que se puede tener certeza es que esa incertidumbre ha de tenerse en cuenta. La predicción meteorológica y climática mejora día tras día pero jamás podremos tener una certeza total de lo que el tiempo meteorológico nos depara en un lugar y momento determinado. Por tanto, no basta con comunicar la predicción sino es importante transmitir la incertidumbre asociada a la misma

## 2. SUPERCOMPUTACIÓN Y MODELOS METEOROLÓGICOS

La obtención de predicciones meteorológicas requieren el uso de metodologías de cálculo numérico complejas, que conllevan una gran cantidad de operaciones matemáticas. Además, existe una limitación de tiempo para las obtención de las soluciones de los modelos, ya que

solo resultan de utilidad si se obtienen con suficiente antelación al hecho a predecir. Es por esto que se comenzaron a utilizar los supercomputadores como la mejor herramienta en la predicción del tiempo.

La evolución de la supercomputación estableció una simbiosis con la modelización atmosférica desde los primeros intentos de Bjerknæs.

Aún antes, el médico y meteorólogo británico Lewis Fry Richardson hizo la primera predicción mediante cálculos manuales del 20 mayo de 1910 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*” 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 4).



Figura 4: Representación artística del concepto de *Forecast Factory* planteado por Richardson. Fuente Francois Schuiten.

El Electronic Numerical Integrator And Computer (ENIAC) fue construido en 1946 en la Universidad de Pensilvania por John Presper Eckert y John William Mauchly y es considerado el primer supercomputador. (Goldstine and Goldstine, 1946)

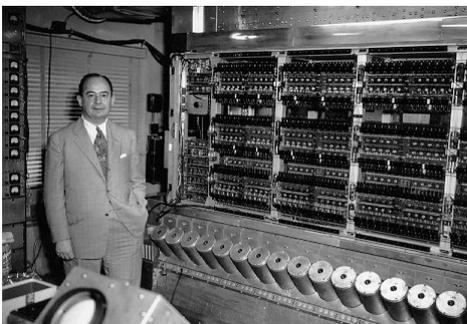


Figura 5: Von Neumann junto a una parte de ENIAC.

ENIAC ocupaba una superficie de 167 m<sup>2</sup> y tenía un peso de 27 toneladas al alojar 17468 válvulas, 7200 diodos de cristal, 1500 relés, 70000 resistencias, 10000

condensadores y cinco millones de soldaduras. Su capacidad de cálculo era de unas 5000 sumas y 300 multiplicaciones por segundo y requería la operación manual de unos 6000 interruptores (Figura 5). Usando la capacidad de cálculo de ENIAC Charney, Fjørtoft y von Neumann (1950; Platzman, 1979) realizaron la primera integración numérica de un modelo meteorológico, suponiendo un éxito y abrir la puerta a la predicción meteorológica tal y como la conocemos en la actualidad. Tras el éxito que supuso la utilización de ENIAC para fines meteorológicos la historia de la supercomputación puede contarse siguiendo la evolución de los centros especializados en la predicción numérica del tiempo.

### 3. 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 6a). En 1963 se fabricó el CDC 6600 de la era actual enfriado por freón y con una potencia de cálculo de 9 MFLOPS, o lo que es lo mismo 9x10<sup>24</sup> operaciones por segundo de coma flotante (Figura 6b).



Figura 6: Primeros supercomputadores de Control Data Corporation: (a) CDC 1604 y (b) CDC 6600.

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

### 4. SUPERCOMPUTACIÓN Y METEOROLOGÍA EN EUROPA

El nacimiento de la supercomputación comercial, permitió en el año 1975, la creación del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF [www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)) en Reading (Reino Unido). El ECMWF está formado

por 21 Estados Miembros y 13 Estados Cooperantes. El objetivo de esta institución europea es aglutinar refuerzos para producir datos y predicciones a medio plazo lo más precisas posible.

La primera versión del modelo meteorológico numérico de predicción del ECMWF fue desarrollada en un supercomputador CDC6600 de 1976 a 1978. Pese a que el CDC6600 era uno de los sistemas más potentes de la época, el modelo necesita 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 7). Se utilizaban 5 horas de CPU para producir una predicción a 10 días, lo que era 50 veces más rápido que el CDC6600.



Figura 7: Primer supercomputador Cray-1A del ECMWF. Estaba compuesto de un único procesador de 80 MHz y 8 Mb de memoria y un almacenamiento en disco de 2.4 Gb y una potencia pico teórica de 160 MFLOP.

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-MP 8/8-64, siendo el primer supercomputador del ECMWF con sistema operativo UNIX llamado UNICOS por Cray.

La llegada en 1992 del Cray C90 (Figura 8), permitió producir de forma operacional predicciones por conjuntos o *ensembles*. Estaba compuesto por 16 CPUs y 16 Gb de memoria y una potencia pico teórica de 1 GFLOPS.



Figura 8: Cray C90 del ECMWF.

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).

Desde 1996 a 2002 cuatro supercomputadores Fujitsu de la serie VP700 y VP5000 fueron utilizados en el ECMWF para la integración del sistema de predicción meteorológica, llegando a potencias de cálculo sostenidas de 300 GigaFLOPS.



Figura 9: Uno de los clusters de IBM formado por Each cluster has 768 servidores POWER7-775 conectados mediante IBM Host Fabric Interface (HFI). Cada uno tenía una potencia pico de 1.5 PFLOPS.

Desde 2002 a 2014 el ECMWF instaló simultáneamente dos clusters de supercomputación de IBM cada vez que actualizó su sistema de cálculo (Figura 9). Todos ellos eran sistemas escalares, en contraposición de 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 200 a 500%, mayores en cada nueve cluster.

En 2014, dos clusters independientes CRAY XC30 se ubicaron en salas separadas. Cuenta con sistemas de energía y enfriamiento separados para protegerlos con-

tra una amplia gama de posibles fallos. Cada subsistema consta de 19 armarios Cray XC30 equipados con procesadores Bridge Intel Ivy y alrededor de 3.500 nodos de computación de doble toma de corriente por sistema. Contienen además una serie nodos para login y para desarrollo Cray y más de 6 petabytes de almacenamiento con capacidad para intercambiar sistemas de archivos entre ambas salas.



Figura 10: Actual CRAY del ECMWF.

Los actuales clusters de Cray permitirán realizar simulaciones dos veces al día ofreciendo predicciones globales a 9 km de resolución horizontal validas hasta 15 días, además de la generación de 50+1 miembros del *ensemble* dos veces al día a 16 km de resolución horizontal (Figura 10). 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 al que pertenece, mantiene el sistema de modernización de mesoescala Harmonie.

#### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de las técnicas de resolución de las ecuaciones que rigen los movimientos atmosféricos mediante métodos numéricos se ha llevado a cabo de manera progresiva en diversas etapas y se han ido aplicando a la obtención de predicciones meteorológicas y climáticas. Todo ello, ha ido en yuxtaposición con el desarrollo de la supercomputación. Desde el ENIAC hasta los actuales grandes clusters desarrollados siempre han contado como usuarios principales a los diferentes centros mundiales de predicción meteorológica. Los procesos meteorológicos se han podido comprender y analizar mejor con la ayuda de los nuevos clusters basados en sistemas con menor consumo eléctrico y menor espacio pero con mayor poder de cálculo.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación AYA2011-29967-C05-02 y CGL2011-25327.

#### REFERENCIAS

Bjerknes, V. (1904) Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. Met. Zeit., 21, 1-7. Translation by Y. Mintz: The problem of weather forecasting as a problem in mechanics and physics. Los Angeles, 1954. Reprinted (pp 1-4) in Shapiro & Grønås, 1999.

Holton, J. R. and G. J. Hakim (2012). An Introduction to Dynamic meteorology (5 ed.) Academic Press, 552 pag.

Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. J. Atmos. Sci., 20, 130-141.

Mechoso C. R. and A. Arakawa (2003) General Circulation Models. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. J. R. Holton, J. Pyle, and J. A. Curry, Eds. Academic Press. 861-869.

Charney, Fjørtoft and von Neumann (1950) Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation *Tellus*, 2, 237-254. [PDF](#)

H. H. Goldstine, H.H. and Goldstine, A. (1946 ) The Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC) *Mathematical Tables and Other Aids to Computation* Vol. 2, No. 15 (Jul., 1946) , pp. 97-110. Published by: American Mathematical Society Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/2002620>

George W P. (1979) The ENIAC Computations of 1950 -- Gateway to Numerical Weather Prediction *Bull. Amer. Met. Soc.*, 60, 302-312. [PDF](#).

#### BIOGRAFÍAS



**Dr. Daniel Santos Muñoz** actualmente desempeña su labor investigadora en la AEMET y en el grupo Modelización Climática y Aplicaciones Medioambientales (MCAM) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), donde es miembro del grupo de Sistemas del modelo HARMONIE dentro del consorcio HIRLAM e investiga en modelado atmosférico y supercomputación.

Anteriormente ha sido investigador de Puertos del Estado, consultor científico de la fundación CENER-CIEMAT e investigador visitante en el DTC/NCAR (Boulder, CO).

Su labor docente la ha llevado a cabo en diversos cursos y masters de postgrado. Ha participado en numerosos proyectos nacionales e internacionales y tiene gran cantidad de publicaciones científicas. Para el sector privado ha realizado labores de consultoría científica y de supercomputación para la multinacional HP. También realiza divulgación científica en diversos medios

de comunicación, conferencias, cursos, en redes sociales y diversos blogs.



**Dr. Maria Luisa Martín** es Profesora Titular de la Escuela de Ingeniería Informática de la Universidad de Valladolid (UVA). Es miembro investigador del grupo MCAM de la UCM. La Dr. Martín realiza labores de investigación relacionada con variabilidad climática, *downscaling*, análisis multivariante y modelización atmosférica.

Su labor docente la ha llevado a cabo en diversos cursos y masters de postgrado tanto en la UVA como en la UCM. Ha participado en gran cantidad de proyectos tanto nacionales como internacionales y tiene numerosas publicaciones científicas. También ha realizado labores de consultoría científica para el sector privado.



**Dr. Maria Yolanda Luna** pertenece al cuerpo de Meteorólogos del Estado. Actualmente es Jefa del Departamento de Desarrollo y Aplicaciones de la AEMET. Pertenece también como miembro investigador al grupo MCAM de la UCM. La Dr. Luna es experta en análisis atmosférico desde el punto de vista sinóptico y mesoescalar, *downscaling* y análisis multivariante.

Anteriormente ha sido investigadora y profesora en la UCM. Su labor docente la ha llevado a cabo en diversos cursos y masters de postgrado. Ha participado en gran cantidad de proyectos tanto nacionales como internacionales y tiene numerosas publicaciones científicas. Para el sector privado ha realizado labores de consultoría científica.