



## El Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo

# 19

DOI: [10.31978/014-18-009-X.19](https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.19)

DELIA GUTIÉRREZ RUBIO

Área de Información Meteorológica y Climatológica, *Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)*

ANNA GHELLI

*International Liaison Officer, ECMWF*

Our 2025 ambition raises the international bar. Given the greater likelihood of life-threatening climate change impacts on the Earth's weather, we will harness rapidly advancing data availability and technology to stretch the accuracy and range of predictions further and faster. [...] ECMWF is a shining example of the value of European and global cooperation in the scientific field, and one which has tangible benefits day in, day out for dozens of national economies and millions of people's daily lives.

*Plan estratégico 2016-2025* – FLORENCE RABIER, Directora General del ECMWF

El Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo es puntero a nivel mundial en la predicción numérica, y su estrategia de futuro apuesta decididamente por la predicción probabilista. Nos proponemos contar en qué consiste este organismo, quiénes lo integran, cómo se trabaja allí (y dónde es allí) y qué se hace. Qué son el IFS, el HRES, el ENS, y por qué son tan reconocidos en el mundo de la predicción meteorológica. Cómo funciona el sistema de predicción por conjuntos del Centro Europeo y por qué la estrategia del centro se vuelca en un ambicioso desarrollo de dicho sistema. Cuál es la participación española en la institución. La «brecha de género» que aqueja al mundo científico en general y meteorológico en particular, ¿se refleja también en un organismo tan prestigioso como éste? Y, como el propio presidente del organismo, lo resumimos todo en dos palabras: «*Más colaboración*».

**Palabras clave:** Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo, CEPPM, European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF, sistema integrado de predicción IFS, modelo determinista ECHRES del ECMWF, sistema de predicción por conjuntos ECENS del ECMWF.

---

Imagen parte superior: a la entrada del Centro Europeo, una curiosa tradición ha hecho acumular patitos de goma, que casi se han institucionalizado como mascota del centro. Si vas a Reading, puedes contribuir y dejar tu patito. Fotografía: DELIA GUTIÉRREZ.



Figura 19.1: Todos los viernes, la plantilla del centro se reúne en la «Weather Room» para discutir, en un ambiente informal y distendido, los eventos e incidencias más significativos de la semana pasada y las previsiones. A la derecha, ERVIN ZSOTER (Hungría), dando el «briefing» en la Weather Room. Fotografías: DELIA GUTIÉRREZ.

## 19.1 El Centro Europeo o ECMWF

El **European Centre for Medium-range Weather Forecasts -Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio- (ECMWF)** es una organización intergubernamental formada, a fecha de enero de 2016, por 34 estados miembros o colaboradores (32 europeos, Marruecos e Israel), y con sede en Reading (Reino Unido). Fue fundado en 1975 con el objetivo de sumar recursos para producir mejores datos y pronósticos a medio plazo. Se trata de un centro tanto de investigación como de servicios operativos de predicción numérica del tiempo en un amplio abanico de escalas. Sus productos y recursos de supercomputación están a disposición de los servicios meteorológicos de los estados miembros, y también facilita servicios comerciales para todo el mundo. Desde 2014 es la entidad europea que brinda dos de los servicios del programa *Copernicus* (<http://copernicus.eu/>), de siete años de duración. Anteriormente llamado *Global Monitoring for Environment and Security*, Copernicus es un proyecto dirigido conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por la Unión Europea a través de la Agencia Europea de Medio Ambiente, con el objeto de brindar una completa, continua y autónoma capacidad de observación terrestre de alta calidad cuyos resultados sean accesibles libremente por la comunidad científica.

Facilitar formación a los científicos de los países miembros y colaboradores es también una actividad esencial de la organización. La formación se orienta a la predicción numérica y al uso de los citados servicios de supercomputación del centro, así como de los productos elaborados.

En el centro trabajan unas 350 personas de más de 30 países, en un ambiente de colaboración, cosmopolita y acogedor. En un curso de formación típico participan de 20 a 25 alumnos procedentes de al menos 10 países, a los que se suman una decena, aproximadamente, de profesores -investigadores del Centro Europeo-, también de orígenes diversos. La lengua utilizada es un *euro-english* con casi todos los acentos posibles.

La mentalidad abierta y flexible en este centro, cuyos resultados son punteros a nivel mundial, se pone de manifiesto de muchas formas. Por ejemplo, los empleados tienen a su disposición una mesa de ping-pong, un gimnasio y otras facilidades para practicar deporte durante su jornada laboral. El ECMWF es una de esas instituciones donde la rigidez y el control han sido sustituidos por una flexibilidad que los resultados demuestran como muy productiva. Las Figuras 19.1 y 19.2 muestran, respectivamente, el *Weather Room* y los paneles meteorológicos en el vestíbulo.

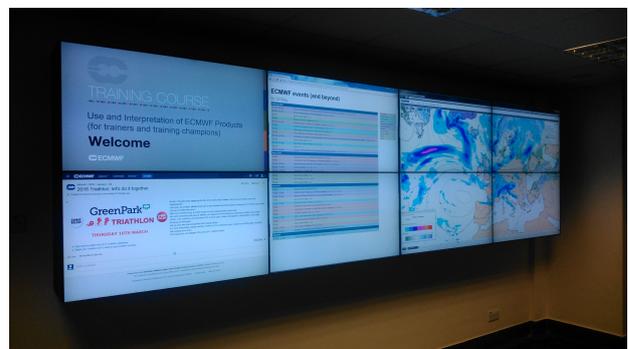


Figura 19.2: Paneles a la entrada del Centro, incluyendo una bienvenida al curso de formación para formadores (enero de 2016). Fotografía: DELIA GUTIÉRREZ.

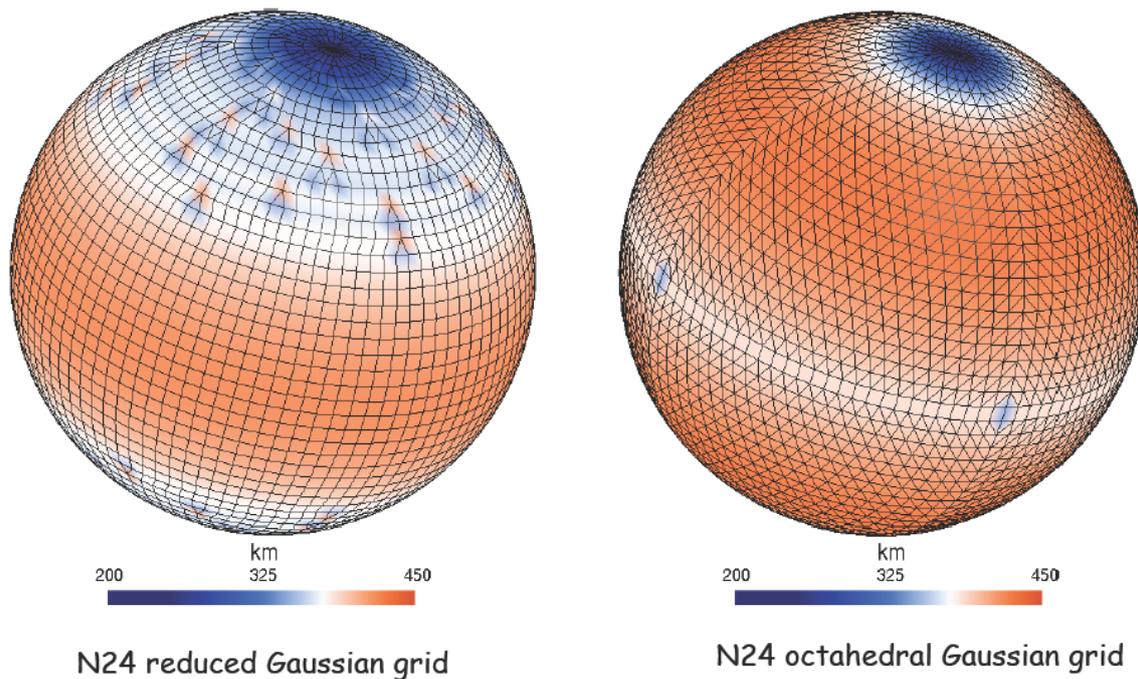


Figura 19.3: A la izquierda, malla del modelo determinista hasta 2016, y a la derecha la malla octaedral del nuevo modelo determinista. ECMWF.

## 19.2 El Sistema Integrado de Predicción o IFS

Los sistemas predictivos del ECMWF se hallan integrados en el llamado Sistema Integrado de Predicción, IFS [10] que consta de una serie de componentes para la modelización atmosférica, como el modelo determinista de alta resolución, HRES-IFS o ECHRES y el sistema de predicción por conjuntos, ENS-IFS o ECENS.

Dos veces al día el Centro Europeo integra un modelo numérico determinista de escala global, denominado HRES por *high resolution* (también ECHRES o HRES-IFS) es un modelo *espectral* (cap. 10.4 en la página 135). En 2016 aumentó su resolución de 16 km a 9 km, una resolución sin precedentes para modelos globales (ver Anexo A en la página 927 para las resoluciones y orografías). Tiene un alcance temporal de 10 días y 137 niveles en la vertical. La versión de 2016 incluye otras mejoras, como una malla octaedral cúbica (Figura 19.3), para que la resolución útil sea más alta y más uniforme en todo el globo.

El modelo ECHRES está reconocido como uno de

los mejores del mundo. En la Figura 19.4 en la página siguiente se muestran dos gráficas comparativas de calidad entre los mejores modelos globales, contrastando las calidades de las predicciones de altura geopotencial en 500 hPa en el hemisferio norte en zonas extratropicales.

**Naturaleza espectral del modelo HRES-IFS.** La dinámica del modelo HRES-IFS trabaja con ondas atmosféricas en el llamado *espacio espectral*, mientras que sus parametrizaciones físicas trabajan en el *espacio físico*. Mediante *transformaciones de FOURIER* la dinámica y la física intercambian datos entre un espacio y otro. En el espacio espectral hablamos de *número de ondas resuelto* por la dinámica (resolución espectral) y en el espacio físico hablamos usualmente de distancias (resolución nominal u horizontal). La versión de 2016 del modelo HRES-IFS o ECHRES, manteniendo un número de ondas de 1279 en el espacio espectral, pasó de trabajar en una rejilla física *gaussiana reducida N640* a una rejilla física *gaussiana octaedral O1280*. Se denota que ha pasado de  $T_L 1279/N640$  a  $T_{CO} 1279/O1280$ . En el espacio físico, aumentó su resolución horizontal de 16 a 9 km, manteniendo sus niveles verticales en 137 y un paso de tiempo de 450 s.

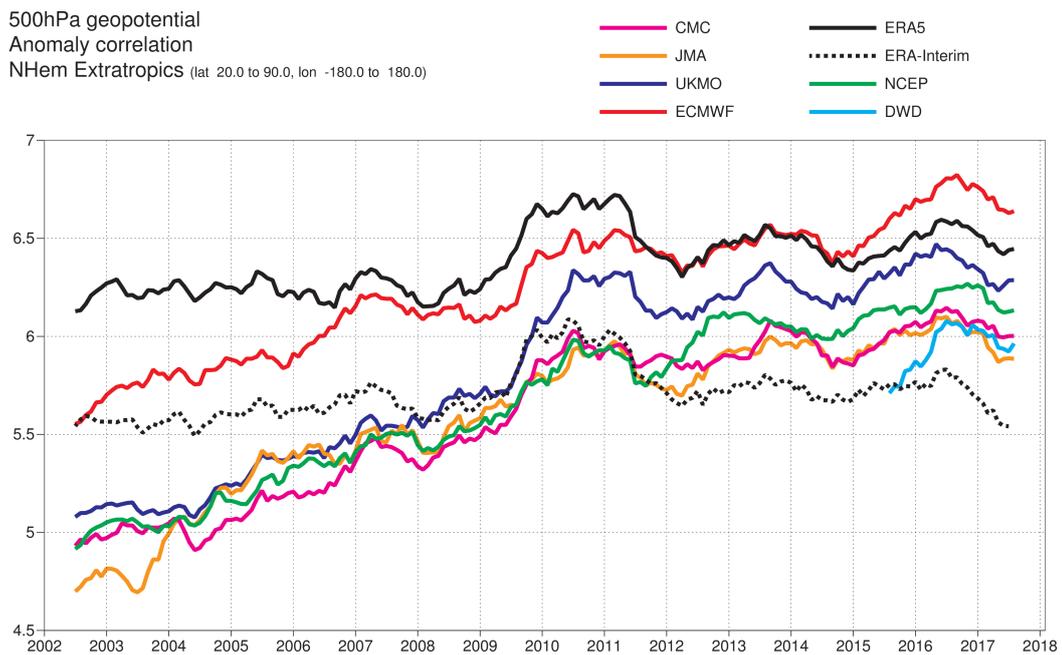
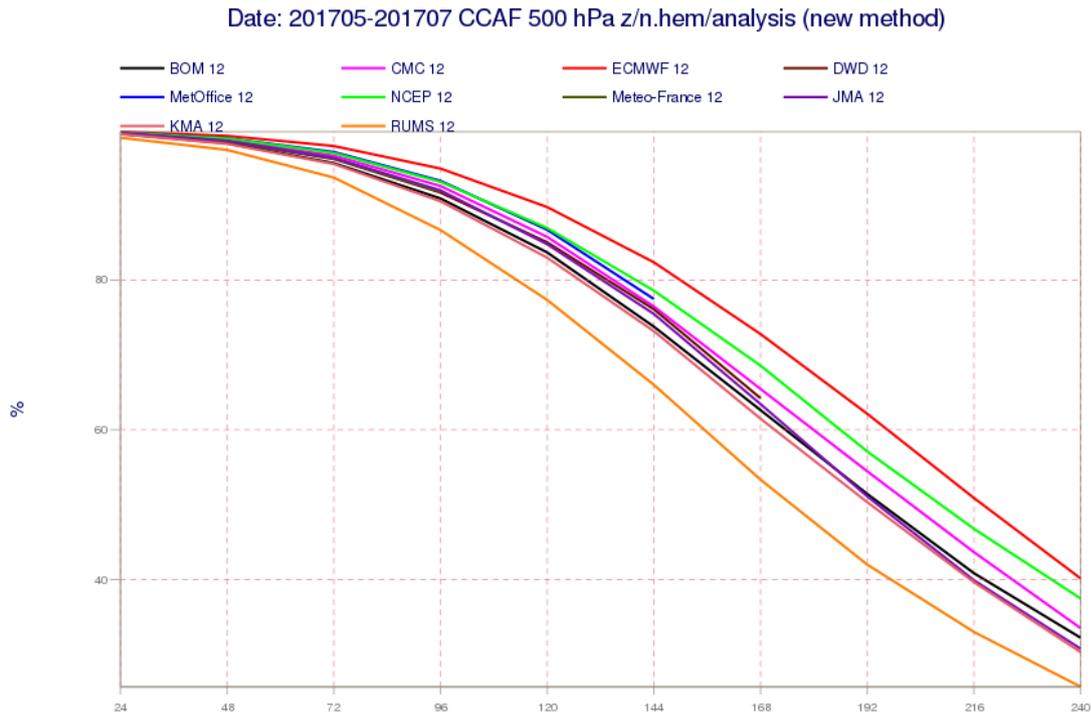


Figura 19.4: Comparativa de calidades de las predicciones de altura geopotencial en 500 hPa en el hemisferio norte para distintos modelos globales. Arriba: decaimiento de la calidad con el alcance predictivo (sec. 15.2.5 en la página 213) en MJJ de 2017. Abajo: serie temporal de límite de predecibilidad (sec. 15.2.5 en la página 213) desde 2002 hasta ahora (2018). Aunque el modelo del Centro Europeo, en rojo, tiende a permanecer en general en las mejores posiciones para latitudes medias y para variables meteorológicas de carácter dinámico como ésta y así se plasma en la figura inferior; en la figura superior el modelo americano del NCEP está algo más cerca del europeo del ECMWF. Si se dibujaran barras de error, las diferencias tendrían una significación más precisa. ECMWF.

Profundizando en la Figura 19.4 en la página anterior, la gráfica superior muestra un promedio en mayo, junio y julio de 2017 del decaimiento de calidad según el alcance predictivo de 24, 48, 72 horas, etc. (sec. 15.2.5 en la página 213), en términos del llamado *coeficiente de correlación de anomalías* (sec. 15.2.3 en la página 211, cuanto más alto, más consistente es la anomalía del modelo con la anomalía de las observaciones). En la gráfica inferior podemos ver una serie temporal de límite de predecibilidad (sec. 15.3 en la página 216, una medida de hasta cuántos días son razonables las predicciones, cuantos más días, mejor), a lo largo de los años 2002 a 2018. Normalmente el ECHRES, en rojo, tiende a permanecer en las mejores posiciones para latitudes medias y para variables meteorológicas de carácter dinámico como es la altura geopotencial. En la figura inferior, ECHRES está en cabeza a lo largo de todo el periodo, con límites de predecibilidad desde 5.5 hasta algo más de 6.5 días. En la figura superior, el modelo europeo del ECMWF también presenta la mejor calidad, pero el americano del NCEP le sigue con una diferencia menos significativa, sobre todo en los primeros y últimos alcances predictivos. Hay que señalar que, para estos resultados, se verifica cada modelo utilizando su propio análisis (e. g. para verificar ECHRES se usa el análisis construido con ECHRES, y para verificar GFS del NCEP se usa el análisis del GFS; si se usara el mismo análisis para todos, saldría beneficiado el modelo correspondiente a ese análisis). Pero, sobre todo, hay que señalar que, para diferentes parámetros y alcances predictivos, modelos de tanta calidad pueden presentar resultados con diferencias en calidad de distintas significaciones.

La *componente de modelización de la circulación atmosférica* incluye, además del modelo HRES, otros elementos como el *sistema de predicción por conjuntos* a medio plazo (hasta 15 días, ECENS, sección 19.3) y extendido (hasta un mes), el sistema de *asimilación* de datos 4DVAR y el *ensemble* de asimilación de datos EDA, la *predicción estacional* y por último las *repredicciones*, que son la base de la *climatología del modelo* (sec. 27.7.1 en la página 419), a partir de la cual y, con el sistema de predicción por conjuntos (sec. 19.3 y cap. 13 en la página 165), podemos obtener indicadores del carácter extremo de los valores previstos, indicadores como el *Extreme Forecast Index*, EFI (sec. 27.7.2), o el *Shift of Tail*, SOT (sec. 27.7.3). Como veremos al hablar de los planes de futuro, la apuesta del ECMWF para la década 2016-2025 por el *sistema de predicción por conjuntos* –que celebraba su 25 aniversario en septiembre de 2017– es

inequívoca, apuntando a *describir la variedad de escenarios posibles y la probabilidad de ocurrencia de cada uno*, con el objetivo de aumentar los estándares de calidad y fiabilidad de las predicciones operativas.

Además de esta componente atmosférica, en el Centro Europeo se realiza también *modelización de la circulación oceánica* (NEMO), *modelización del oleaje* (WAVE), así como *reanálisis* atmosférico y de oleaje, que es de enorme interés para el análisis del clima. El Sistema Tierra es un sistema complejo, con diversos componentes que interaccionan mutuamente entre sí, de ahí la importancia de modelizar estos componentes y simular las interacciones entre ellos. El modelo de oleaje está acoplado con el atmosférico para obtener resultados más realistas.

Un sistema de dos supercomputadores sostiene toda la ingente capacidad de cálculo que el IFS requiere. Cada supercomputador consta de más de 8000 computadores conectados. En 2016 se encontraban en las posiciones 47 y 48 del ranking mundial de computación. El Centro de Supercomputación también incluye un *sistema de archivo*, *Meteorological Archival and Retrieval System* (MARS), el mayor archivo meteorológico del mundo, que en junio de 2016 almacenaba más de 100 petabytes y aumentaba unos 120 terabytes cada día. Cuando se visita el centro, es impactante ver a los robots desplazarse con velocidad y precisión para localizar las cintas, respondiendo a las solicitudes de los usuarios. Como mencionaremos más adelante, la estrategia de futuro del Centro Europeo tiene muy presente la *supercomputación* (sec. 11.3 en la página 148).

## 19.3 El Sistema de Predicción por Conjuntos del ECMWF (ECENS o ENS-IFS)

La formación que el Centro Europeo imparte a sus usuarios incide muy especialmente, desde hace ya años, en el uso e interpretación de los productos del *sistema de predicción por conjuntos*, Ensemble Prediction System, ENS, también denominado ECENS o ENS-IFS [13]. La razón por la que este sistema es ya imprescindible es que sabemos que, por mucho que mejoren los modelos numéricos del tiempo, *las predicciones meteorológicas siempre van a llevar inherente un factor de incertidumbre*. Esto es así, en primer lugar, porque las ecuaciones que se utilizan para simular la atmósfera corresponden a un sistema

físico de los denominados *caóticos*: entre otras propiedades, cualquier cambio, por pequeño que sea, en las condiciones iniciales del sistema se amplifica en el tiempo, llevando a resultados completamente diferentes [2, 5]. Por tanto, como no es posible determinar el estado inicial de la atmósfera con una precisión absoluta (hasta el aleteo de una mariposa lo perturba...), contamos con una fuente de incertidumbre inexorable. A esta se suma una segunda fuente de error, como es la propia limitación de los modelos numéricos que, por muy buenos que sean, solo pueden hacer una simulación aproximada del complejo sistema de procesos atmosféricos. En resumen, son dos los factores que influyen en la calidad de una predicción: la incertidumbre en las condiciones iniciales de la atmósfera y las aproximaciones utilizadas por los modelos para representar los procesos físicos que ocurren en la misma (Figura 19.5). Estos dos factores dan lugar a errores, que se amplifican al avanzar en el alcance temporal de la predicción. Por tanto, puesto que las predicciones llevan una incertidumbre inherente, la predicción moderna consiste no sólo en dar un pronóstico (una única predicción determinista), sino en cuantificar esta incertidumbre. El *sistema de predicción por conjuntos* es la herramienta para estimar el margen de error de nuestra predicción.

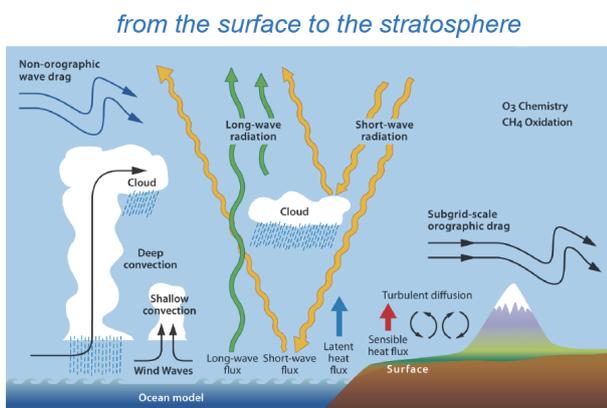


Figura 19.5: Conjunto de procesos físicos que un modelo numérico del tiempo debe parametrizar. ECMWF.

El ENS se hizo plenamente operativo en 1992, y desde entonces ha experimentado mejoras sustanciales en la formulación del modelo, la asimilación de datos y la cuantificación de las incertidumbres. En 2010 se mejoró la simulación de las incertidumbres en las condiciones iniciales con la inclusión de perturbaciones definidas por el método llamado *Ensemble of Data Assimilations*, EDA [3, 9] y se revisaron a fondo los esquemas usados para simular las incertidumbres de los modelos. El sistema actual consiste en un conjunto

de 51 *miembros* que calculan predicciones a partir de condiciones iniciales perturbadas. Estos 51 modelos tienen una resolución menor que el HRES, pues, de lo contrario, las necesidades computacionales serían insostenibles. Los 51 modelos se integran 2 veces al día, con un alcance de hasta 15 días, y una resolución horizontal que es ya de 18 km (A principios de 2016 era de 32 km hasta el décimo día de alcance, y de 64 km para los últimos 5 días) y con 91 niveles verticales. Existe además una versión *extendida*, el *ENS Extended*, con alcances desde el día 16 al 46 y una resolución horizontal de 36 km. Como veremos, la hoja de ruta hasta 2025 del Centro pasa por continuar mejorando, de manera radical, el ECENS.

**Naturaleza espectral del ENS-IFS o ECENS.** La versión de 2016 del sistema de predicción por conjuntos, ENS-IFS o ECENS, mantuvo el número de ondas en 639 en el espacio espectral y pasó de trabajar en una rejilla física *gaussiana reducida* N320 a una rejilla física *gaussiana octaedral* O640, lo que se denota como que ha pasado de  $T_L639/N320$  a  $T_{CO}639/O640$ . En el espacio físico su resolución horizontal ha pasado de 32 km a 18 km. Sus niveles verticales se mantuvieron en 91 y el paso de tiempo en 720 s.

El ECENS representa la incertidumbre en las condiciones iniciales mediante un conjunto de 51 modelos (el de control, que es la versión de menor resolución del HRES, y 50 modelos perturbados), cada uno de ellos con condiciones iniciales similares, pero no idénticas, que permiten representar el estado inicial de la atmósfera lo mejor posible. Las primeras configuraciones del ENS asumían que la incertidumbre en el pronóstico estaba dominada por el error o la incertidumbre en las condiciones iniciales [7]. Algunos estudios habían demostrado que, cuando dos modelos difieren en sus pronósticos, eran las diferencias en el análisis inicial, más que las diferencias en la formulación de los modelos, lo que resultaba crítico para explicar los distintos resultados. Estudios posteriores demostraron que los errores aleatorios de los modelos debidos a las parametrizaciones físicas y los efectos de los procesos de escala inferior a la del *grid* (la *malla* de puntos del modelo) también afectaban a la calidad del pronóstico. En noviembre de 2010 se introdujeron en el ENS dos esquemas que representan estas incertidumbres del modelo: el esquema *Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies*, SPPT [4, 14] y el esquema *Stochastic Kinetic Energy Backscatter*, SKEB [1, 16]. Las parametrizaciones estocásticas usadas en el

ECMWF tienen un importante impacto positivo en la calidad de la predicción [17].

Al principio, la técnica usada para realizar las perturbaciones iniciales al modelo era la denominada *Vectores Singulares*, de acuerdo con los trabajos de LORENZ [12] y FARRELL [6], quienes demostraron que este tipo de perturbaciones dominan la dinámica del sistema en intervalos de tiempo finitos. Más tarde, el sistema EDA [9], se ha unido a los vectores singulares, trabajando conjuntamente en la actualidad con ambas técnicas para generar las perturbaciones iniciales [3, 11].

El sistema EDA perturba con *ruido estocástico* los valores iniciales procedentes de las observaciones. La varianza de las perturbaciones viene dada por la varianza estimada del error de las observaciones que se usa en la asimilación de datos. Adicionalmente, las incertidumbres del modelo se representan en el EDA usando el esquema SPPT. Los miembros del EDA son producto de la perturbación de todas las observaciones y del campo de temperatura de la superficie del mar, usando el esquema SPPT que perturba la tendencia de todos los procesos físicos parametrizados, de modo que simula un error aleatorio del modelo. Si todas las fuentes de error relevantes estuvieran bien representadas en el EDA, este sistema debería facilitar una muestra fiable de la distribución de las incertidumbres iniciales. No obstante, los experimentos de predicción

llevados a cabo usando solo las perturbaciones iniciales EDA no han podido representar correctamente todas las fuentes de incertidumbre. Por tanto, se propuso [3] una aproximación híbrida al problema, combinando las perturbaciones EDA y las de los *Vectores Singulares*. Las perturbaciones EDA representan los errores que se han desarrollado en el pasado, mientras que las basadas en los *Vectores Singulares* representan las estructuras que pueden dominar el error en el futuro, aproximadamente del día 2 en adelante.

Como salida del ECENS, en lugar de tener una predicción, tenemos 51, llamadas *miembros*, que nos muestran un abanico de escenarios atmosféricos plausibles. Cuando la dispersión de los pronósticos es pequeña, y es razonablemente consistente con la determinista de mayor resolución, entonces sabemos que la *predecibilidad* (cap. 12 en la página 155) es grande. En cambio, una gran dispersión de los resultados nos indicará que la incertidumbre es muy alta, y una inconsistencia con el modelo determinista de mayor resolución nos indica que la resolución juega un papel crítico y por tanto debemos mirar el ENS con precaución (ver Figura 19.6). La proporción de miembros del *ensemble* que prevé unas condiciones determinadas, indica la probabilidad de que ocurra. Estos aspectos se describen en profundidad y detalle en el capítulo 27 y también en la Guía de usuarios de los productos del ECMWF [15].

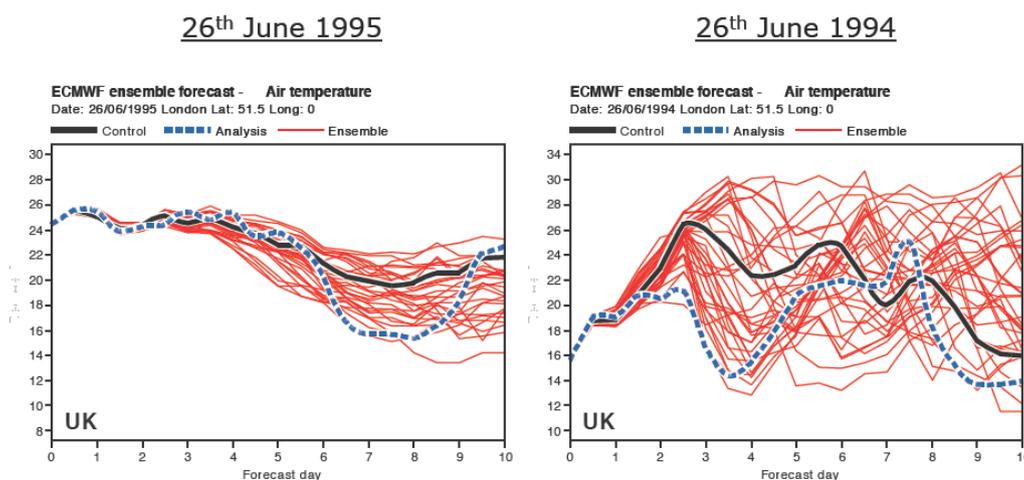


Figura 19.6: Predecibilidad dependiente del flujo: predicciones de temperatura para Londres en dos episodios de distinta predecibilidad. Se muestran los 51 miembros en rojo y negro y los valores observados en azul. Cuando las predicciones de los distintos miembros se parecen más (izquierda), hay menos dispersión y la atmósfera es más predecible. Por el contrario, cuando la dispersión es mayor (derecha), hay más incertidumbre en el pronóstico ECMWF.

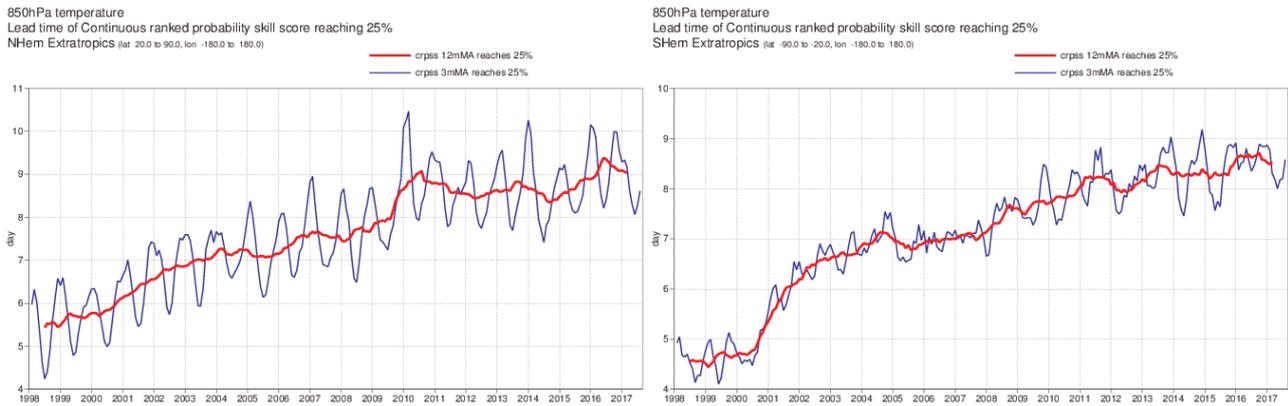


Figura 19.7: Evolución con el tiempo de la calidad del modelo en zonas extratropicales, a la izquierda en el hemisferio norte y la derecha en el sur. Ver texto. ECMWF.

Los resultados de los 51 miembros del ENS se pueden mostrar uno a uno (51 sellos), pero normalmente se trabaja con una variedad de productos derivados: escenarios agrupados (*clusters* o *grupos*, y *supergrupos*), mapas de probabilidad (por ejemplo, los mapas de probabilidad de precipitación de la **Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)**), meteogramas, media del ensemble y dispersión, índice EFI (*Extreme Forecast Index*), etc.

Para evaluar la calidad de los sistemas de predicción por conjuntos, un indicador habitualmente utilizado es el CRPSS (*Continuous Ranked Probability Skill Score*, sec 15.9.9 en la página 232). Este índice evalúa la función de distribución acumulada del pronóstico frente a un sistema de referencia no calificado, es decir, aquel que no presenta pericia, habilidad o destreza (en inglés, *skill*, sec. 15.2.4 en la página 212) como es el reanálisis basado en la climatología del modelo, ERA-Interim [8]. La Figura 19.7 muestra, para cada mes, el alcance de la predicción (eje vertical) para el cual la media móvil de 3 meses (línea azul) o la media móvil de 12 meses (línea roja) -centradas en este mes- del CRPSS, aplicado a la predicción de temperatura a 850hPa del ECENS, cae por debajo del 25%. Este umbral se considera apropiado por el subgrupo de verificación del Comité Asesor Técnico del ECMWF y viene a señalar el límite de predecibilidad u horizonte de predicción razonable o, dicho con terminología común, «hasta cuántos días son fiables las predicciones». Por ejemplo, durante 2010, en periodos de 3 meses-línea azul- se alcanzó el horizonte de 10 días en el Hemisferio Norte (HN) y el de 8 días en el Hemisferio Sur (HS) pero, en el año 2010 en conjunto-línea roja- se alcanzó el de 9 días en el HN y casi el de 8 días en el HS. La tendencia muestra una continua mejora, con registros particularmente altos en el año 2010, que fue un año dominado por

una NAO (North Atlantic Oscillation, ver sec. 29.2.2 en la página 485) fuerte, que contribuyó a aumentar la predecibilidad de la atmósfera en los extratropicos. Es interesante señalar que en 2016 el CRPSS alcanzó niveles similares a los de 2010, a pesar de que no se dio una NAO intensa.

La Figura 19.8 en la página siguiente evidencia claramente la mejoría que supone el ENS (y son datos con la versión de 2014, de peor resolución que la actual) para la predicción a medio plazo. En este contexto, parece evidente que las predicciones modernas deben abandonar el lenguaje determinista para pasar a informar de cuáles son los escenarios posibles y cuáles las probabilidades, pues de este modo aumenta el valor relativo del uso del sistema predictivo y se facilita al usuario la posibilidad de tomar mejores decisiones. Como no siempre resulta intuitiva la mejora para el usuario que supone una predicción probabilista, durante los cursos formativos hay oportunidad de comprobar la utilidad de este tipo de información mediante juegos en los que los alumnos toman decisiones e «invierten» el capital que el Centro les facilita (¡en moneda ficticia!) en función de la información sobre la probabilidad de que un cierto riesgo meteorológico ocurra.

La estimación de la incertidumbre asociada a los análisis y a los pronósticos es todavía un desafío para la evolución de la predicción por conjuntos. La introducción de modelos del sistema climático o sistema Tierra aumentará la complejidad de los sistemas de predicción y será necesario investigar en la formulación de los errores del modelo, de modo que representen mejor la incertidumbre asociada a los procesos físicos y su evolución en las escalas temporal y espacial. Además, para mejorar la precisión de los pronósticos de fenómenos de alto impacto, serán necesarios sistemas

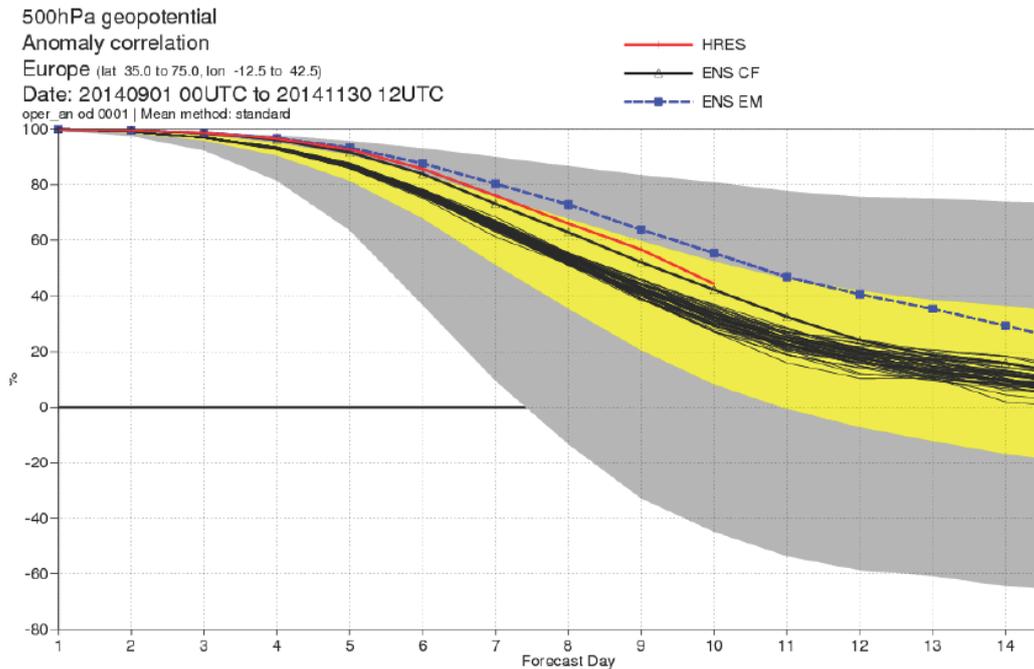


Figura 19.8: Verificación de resultados de la predicción de geopotencial en 500 hPa para Europa por los 51 miembros del ENS (líneas negras), por la media de los 51 miembros (línea azul) y por el modelo de alta resolución (línea roja). La media del ensemble es claramente mejor que el HRES a partir del cuarto o quinto día. ECMWF.

de predicción por conjuntos de alta resolución horizontal y vertical. El Centro Europeo pretende integrar un ensemble de alta resolución, con una resolución horizontal de unos 5 km hasta un alcance de dos semanas, para 2025. Aumentar la resolución también

implica mejorar la capacidad de asimilar observaciones diversas de manera más eficaz. Esto supone un gran desafío que implicará investigar y revisar toda la cadena de predicción para ganar en eficiencia computacional.

## 19.4 Proyectos: Plan estratégico 2016-2025 del ECMWF, la hoja de ruta hasta 2025

El ECMWF ha hecho públicos sus objetivos estratégicos hasta 2025 -por supuesto, en la línea de proveer los pronósticos necesarios para contribuir a salvar vidas, proteger infraestructuras y promover el desarrollo económico- y los resume en:

- Investigación para desarrollar un *modelo global integrado del sistema climático* (o sistema Tierra) con vistas a mejorar la fiabilidad de los pronósticos para plazos de *hasta un año*. Esto implica enfrentarse a los problemas más difíciles de la predicción numérica, como el bajo nivel de acierto actual para los pronósticos a un mes de plazo en Europa.
- Basar los análisis y predicciones operativos en el *sistema de predicción por conjuntos* (Figura 19.9), que describe la variedad de escenarios posibles y la probabilidad de ocurrencia de cada uno, y au-

menta los estándares de calidad y fiabilidad de las predicciones operativas. Si actualmente las predicciones a medio plazo son acertadas, en promedio, hasta una semana de plazo, para 2025 el objetivo es conseguir que las predicciones por conjuntos sean acertadas, para fenómenos de alto impacto, hasta con *dos semanas* de antelación. También se prevé desarrollar un enfoque *sin costuras (seamless)* -también denominado *sin discontinuidades*- orientado a predecir estructuras de gran escala y cambios de régimen hasta con *cuatro semanas* de antelación, y anomalías de escala global hasta con *un año* de antelación.

El Centro Europeo basa su estrategia para los próximos diez años en los grandes avances ya realizados en asimilación de datos, desarrollo de modelos, estimación de la incertidumbre y acoplamiento de los componentes del sistema climático (o sistema Tierra), junto con el abordaje de grandes desafíos computacionales tales como el *big data* (sec. 11.6 en la página 151) y la eficiencia computacional, con el resultado esperado

de un gran salto en la predicción numérica.

La estrategia del ECMWF en cuanto a supercomputación se resume en dos aspectos:

- *Escalabilidad de los códigos*, para hacer un uso eficiente de la capacidad de computación.
- *Instalaciones de alto rendimiento*, que permitan la innovación, de manera energéticamente eficiente y medioambientalmente sostenible (Figura 19.10).

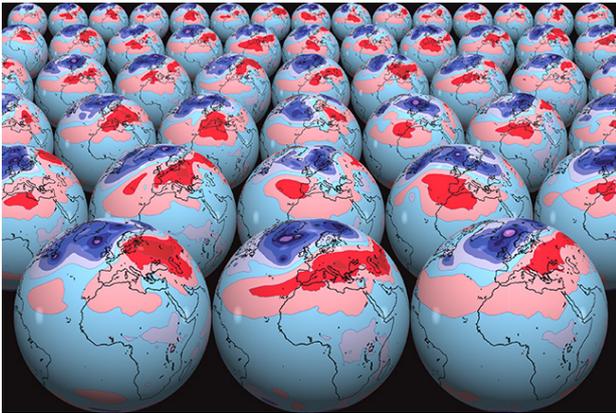


Figura 19.9: ENS. Ilustración del folleto informativo Fact sheet: Ensemble weather forecasting disponible en la web del Centro Europeo. La apuesta por la predicción probabilista es uno de los pilares de la estrategia del ECMWF. Imagen: web del ECMWF.

En palabras de presidente del consejo del Centro Europeo, GERHARD ADRIAN, las bases de la estrategia se pueden resumir en dos palabras: **más colaboración**. La colaboración es el secreto del éxito seguramente en cualquier cosa, pero sin duda lo es en predicción meteorológica, y el Centro Europeo es un magnífico ejemplo de *colaboración* entre los 34 países miembros y asociados, *colaboración* entre la plantilla del centro -de unos 30 países distintos-, *colaboración* con expertos internacionales de todo el mundo, *colaboración* con variopintas instituciones y organismos...

- La colaboración con universidades y organismos de investigación se concreta en el programa *OpenIFS*, una reciente versión del modelo del ECMWF disponible para investigación y formación.
- La colaboración con EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos) la ESA (Agencia Espacial Europea) y otras agencias espaciales sigue siendo estratégica, tanto para sacar el mayor partido de las crecientes observaciones por satélite como para asegurar el mayor provecho de las inversiones realizadas por los países en los programas satelitales.

- La colaboración con la OMM (Organización Meteorológica Mundial) redundará en el acceso de los países menos desarrollados a datos críticos para la protección de las poblaciones.
- La colaboración con la Unión Europea se traduce en becas de investigación en áreas como la escalabilidad (sec. 11.5 en la página 151) de los modelos o la predicción estacional, y también en la operación de los servicios del programa *Copernicus* (el programa de la Comisión Europea para la observación de la Tierra) relacionados con el cambio climático y con la vigilancia de la atmósfera.

Además, la estrategia 2016-2025 apuesta por la permanencia del ECMWF en las instituciones y las redes europeas y mundiales, y por la apertura a nuevas oportunidades.



Figura 19.10: En junio de 2016, el consejo del Centro aprobó la propuesta de Italia de acoger en Bolonia el nuevo Centro de Datos del ECMWF. La sede principal del Centro permanecerá en Reading. El nuevo centro está previsto para 2019. Imagen: galería Flickr del ECMWF.

## 19.5 Participación española

España es miembro del Centro Europeo desde su fundación en 1975. En 2016 había 15 españoles empleados en el Centro (del orden del 4% del personal), de diversa formación y experiencia previa, en meteorología o en otros campos. En el sitio web del Centro se puede encontrar detallada información sobre el trabajo en el ECMWF, las ofertas concretas, las condiciones de trabajo, los valores de la organización («aptitud, profesionalidad, honestidad, integridad, transparencia, trato justo y equitativo, espíritu de equipo y respeto mutuo [...] Se espera del personal del ECMWF que contribuya a una cultura de trabajo donde la honestidad y la integridad prevalecen»). En el apartado «What our staff say» del web podemos conocer algunas impresiones de XAVIER ABELLÁN, analista

en el Departamento de Predicción, con experiencia previa en el BSC (Barcelona Supercomputing Center): «encuentro especialmente gratificante ayudar a los usuarios a resolver sus problemas y aprovechar al máximo los recursos del Centro».

La contribución de España al presupuesto del Centro para 2017 es del 7,53 %, lo que se traduce en 3 273 000 libras esterlinas. El Centro Europeo se financia principalmente en base a las aportaciones de sus miembros, de acuerdo con una escala basada en el PIB de cada país, pero una parte significativa de su presupuesto proviene de la venta de datos y productos y, sobre todo, de proyectos con financiación externa. En 2016, el presupuesto total del Centro Europeo fue de casi 87 M de libras esterlinas, de las que algo más de 43 M fueron aportados por los países miembros y cooperantes. (Datos del informe financiero de 2016 disponible en la web del ECMWF).

## 19.6 Participación femenina

En 2016, para celebrar el Día Internacional de la Mujer, 8 de marzo, el ECMWF fue anfitrión de la Royal Meteorological Society para celebrar la contribución femenina en meteorología y climatología, donde tuvo lugar un debate sobre la brecha de género en la ciencia. Las mujeres solo suponen un tercio del total de empleados en los servicios meteorológicos nacionales, y tan sólo el 19% de los empleados de nivel superior. En el Centro Europeo, las mujeres han pasado de ser el 14% en 1979 al 26% en 2016 (datos del informe anual de 2016 en el web del ECMWF). Como cabría

esperar, no es un porcentaje muy distinto de la pobre media de los servicios meteorológicos, sin embargo, es destacable que la nueva (desde enero de 2016) Directora General del Centro es una mujer, la francesa FLORENCE RABIER. En la Figura 19.12 podemos ver a buena parte de esta representación.

## 19.7 Epílogo



Figura 19.11: Centro de Reading. El Centro Europeo se encuentra lejos de este punto, en una zona residencial de las afueras. Fotografía: DELIA GUTIÉRREZ.

La apacible ciudad de Reading (Figura 19.11) alberga desde 1975 uno de esos lugares donde el prodigio de la inteligencia y el conocimiento se suman al de la colaboración y el entendimiento para dar los mejores resultados, en beneficio de todos. Los científicos del tiempo han conseguido una atmósfera de trabajo multicultural, abierta y creativa (y suficientemente financiada), que algún viento debería extender por todo el continente.



Figura 19.12: Empleadas del Centro Europeo. Fotografía: web del ECMWF.

## 19.8 Referencias

- [1] BERNER, J. y col. "A Spectral Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme and Its Impact on Flow-Dependent Predictability in the ECMWF Ensemble Prediction System". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 66.3 (mar. de 2009), páginas 603-626. ISSN: 0022-4928. DOI: [10.1175/2008JAS2677.1](https://doi.org/10.1175/2008JAS2677.1) (citado en página 294).
- [2] BUIZZA, Roberto. "Chaos and weather prediction". En: *ECMWF Newsletter* 12 (2002), páginas 1-7 (citado en página 294).
- [3] BUIZZA, Roberto, LEUTBECHER, Martin y ISAKSEN, Lars. "Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 134.637 (2008), páginas 2051-2066. DOI: [10.1002/qj.346](https://doi.org/10.1002/qj.346) (citado en páginas 294, 295).
- [4] BUIZZA, Roberto, MILLER, Martin J y PALMER, Tim N. "Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 125.560 (ago. de 1999), páginas 2887-2908. ISSN: 00359009. DOI: [10.1002/qj.49712556006](https://doi.org/10.1002/qj.49712556006) (citado en página 294).
- [5] BUIZZA, Roberto y PALMER, Tim N. "The Singular-Vector Structure of the Atmospheric Global Circulation". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 52.9 (mayo de 1995), páginas 1434-1456. ISSN: 0022-4928. DOI: [10.1175/1520-0469\(1995\)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1434:TSVSOT>2.0.CO;2) (citado en página 294).
- [6] FARRELL, Brian F y IOANNOU, Petros J. "Generalized stability theory. Part I: Autonomous operators". En: *Journal of the atmospheric sciences* 53.14 (1996), páginas 2025-2040. DOI: [10.1175/1520-0469\(1996\)053<2025:GSTPIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1996)053<2025:GSTPIA>2.0.CO;2) (citado en página 295).
- [7] HARRISON, M. S. J. y col. "Analysis and model dependencies in medium-range ensembles: Two transplant case-studies". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 125.559 (oct. de 1999), páginas 2487-2515. ISSN: 00359009. DOI: [10.1002/qj.49712555908](https://doi.org/10.1002/qj.49712555908) (citado en página 294).
- [8] HERBACH, Hans. "Decomposition of the Continuous Ranked Probability Score for Ensemble Prediction Systems". En: *Weather and Forecasting* 15.5 (oct. de 2000), páginas 559-570. ISSN: 0882-8156. DOI: [10.1175/1520-0434\(2000\)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015<0559:DOTCRP>2.0.CO;2) (citado en página 296).
- [9] ISAKSEN, LARS y col. "The new ensemble of data assimilations". En: *ECMWF Newsletter* 123 (2010), páginas 17-21 (citado en páginas 294, 295).
- [10] JAKOB, C. y col. "The IFS cycle CY21r4 made operational in October 1999". En: *Spring* 87.87 (2000), páginas 2-9 (citado en página 291).
- [11] LEUTBECHER, Martin y col. "Ensemble forecasting". En: *Journal of Computational Physics* 227.7 (2008), páginas 3515-3539. ISSN: 00219991. DOI: [10.1016/J.JCP.2007.02.014](https://doi.org/10.1016/J.JCP.2007.02.014) (citado en página 295).
- [12] LORENZ, Edward N. "Deterministic Non-periodic Flow". En: *Journal of the Atmospheric Sciences* 20.2 (mar. de 1963), páginas 130-141. ISSN: 0022-4928. DOI: [10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2) (citado en página 295).
- [13] MOLTENI, F. y col. "The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 122.529 (ene. de 1996), páginas 73-119. ISSN: 1477-870X. DOI: [10.1002/qj.49712252905](https://doi.org/10.1002/qj.49712252905) (citado en página 293).
- [14] PALMER, T N y col. "Stochastic parametrization and model uncertainty". En: *ECMWF Tech. Memo* 598 (2009), páginas 1-42 (citado en página 294).
- [15] PERSSON, Anders. "User guide to ECMWF forecast products". En: *Ecmwf March* (2011), página 127 (citado en página 295).

- [16] SHUTTS, Glenn. “A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 131.612 (2005), páginas 3079-3102. DOI: [10.1256/qj.04.106](https://doi.org/10.1256/qj.04.106) (citado en página 294).
- [17] SHUTTS, G y col. “Representing model uncertainty: Stochastic parametrizations at ECMWF”. En: *ECMWF Newsletter* 129 (2011), páginas 19-24 (citado en página 295).

