

# XXXIV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española (Teruel, 29 febrero – 2 marzo 2016)

ISBN 978-84-617-5240-9

## La nueva generación de modelos climáticos. El proyecto europeo EC-Earth

José Antonio Parodi Perdomo<sup>(1)</sup>, José M<sup>a</sup> Rodríguez González<sup>(2)</sup>, Ernesto Rodríguez Camino<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> AEMET, Delegación en Murcia - Avda. de la Libertad, 11. 30107 Murcia, jparodip@aemet.es

<sup>(2)</sup> AEMET, Delegación en Canarias – c/ San Sebastian, 77. 38005 Santa. Cruz de Tenerife, jrodriguezg@aemet.es

<sup>(3)</sup> AEMET, Servicios Centrales – c/ Leonardo Prieto Castro, 8. 28071 Madrid, erodriguezc@aemet.es

Los modelos climáticos globales constituyen la herramienta básica para estimar y obtener información sobre el clima futuro. Consisten en modelos acoplados atmósfera-océano (*AOGCM*, *Atmosphere-Ocean Global Circulation Models*) que tratan de describir y simular los distintos componentes del sistema climático, las interacciones entre ellos y su evolución. Con el paso de los años estos modelos han ido perfeccionándose, añadiendo nuevos componentes (hielo marino, esquemas de superficie mejorados, aerosoles atmosféricos, vegetación dinámica, química atmosférica, ciclo del carbono, biogeoquímica oceánica, etc..) así como una mayor resolución y complejidad a su estructura, en su objetivo de simular lo mejor posible los procesos físicos, químicos y biológicos que se dan globalmente en el sistema terrestre y sus procesos de realimentación asociados, dando lugar a los hoy llamados “Modelos del Sistema Tierra” o “Earth System Models” (*ESM*).

En la actualidad, estos modelos son utilizados por múltiples sectores como herramienta para la toma de decisiones, con finalidades muy diversas (por ejemplo: planificación agrícola, energética y de infraestructuras; gestión hidrológica; seguros; evaluación de riesgos ambientales o de salud; mercados financieros; apoyo a modelos de impacto socio-económico, etc..)

En el ámbito de las ciencias atmosféricas, su uso es importante para la mejora de los sistemas de observación y predicción meteorológica, y juegan un papel imprescindible en estudios de sensibilidad climática y en la generación de escenarios futuros de cambio climático. En relación con este último aspecto, los resultados de los proyectos de intercomparación de modelos climáticos (*CMIP*, *Climate Model Intercomparison Project*) son un elemento clave para la elaboración de las conclusiones en los Informes de Evaluación del Cambio Climático, realizados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio

Climático (*IPCC*, *Intergovernmental Panel on Climate Change*). Siendo el Quinto Informe de Evaluación (*AR5*, *Fifth Assessment Report*) el último informe elaborado hasta la fecha, y que está basado en gran medida en el *CMIP5* (Taylor et al. 2012).

La progresiva mejora de la capacidad de los modelos climáticos participantes en los sucesivos *CMIP*, para simular los patrones de temperatura y precipitación observados (ver Fig. 1), así como la concordancia de las simulaciones de clima pasado realizadas por los modelos, frente a las reconstrucciones históricas de observaciones procedentes de distintas fuentes (ver Fig. 2), nos ha permitido aumentar la confianza en los estudios de atribución de cambio climático y en las proyecciones de clima futuro (*IPCC*, 2013), sin dejar de lado las incertidumbres inherentes a dichas simulaciones.

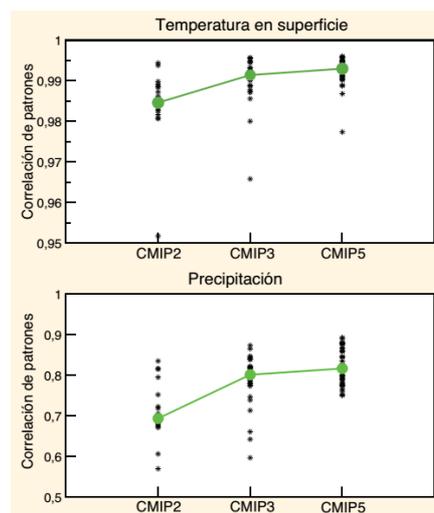


Fig. 1.- Evolución en sucesivos proyectos de intercomparación (CMIP) de la correlación de patrones de temperatura y precipitación (medias anuales) observados, con los simulados por los modelos participantes (en negro el coeficiente de correlación de los modelos individuales y en verde el valor de la mediana). Fuente: *Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al 5º Informe del IPCC.*

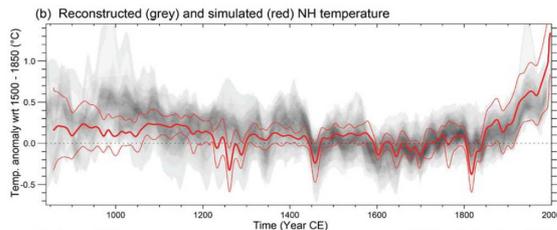


Fig. 2.- Reconstrucción (en gris) y simulación (en rojo) de las anomalías de temperatura anual media en el hemisferio norte, con respecto al periodo 1500-1850. Fuente: *Cambio Climático 2013: Bases Físicas. Guía Resumida del 5º Informe del IPCC. Grupo de trabajo I.*

### El concepto “seamless prediction” (“predicción unificada” o “predicción sin costuras”)

Con el desarrollo de la última generación de modelos climáticos (los citados anteriormente *Earth System Models*) y el necesario y previsible aumento en la capacidad de cálculo disponible, gracias a nuevos sistemas de supercomputación, surge en los últimos años el concepto de “seamless prediction”, o predicción unificada (Hurrell et al. 2009, Shukla et al. 2010, Brown et al., 2012, Hoskins, 2012).

Tradicionalmente la problemática de la predicción del tiempo a corto plazo y la predicción climática eran abordadas por separado, como disciplinas diferentes. En la primera, es clave la correcta definición de las condiciones iniciales y la simulación en altas resoluciones, mientras que en la segunda, el interés máximo se centra en la incorporación del mayor número de componentes del sistema terrestre y la simulación de las complejas relaciones entre ellos, para de esta forma, capturar correctamente sus variaciones, retroalimentaciones y evolución a largo plazo.

Dado que la evolución del tiempo, ya sea a corto plazo o a largo plazo, está basada en los mismos principios y procesos físicos, vinculados a través de múltiples escalas espaciales y temporales, se planteó la posibilidad de unificar la predicción, englobando todos los procesos y sus correspondientes escalas, en el marco de un mismo modelo.

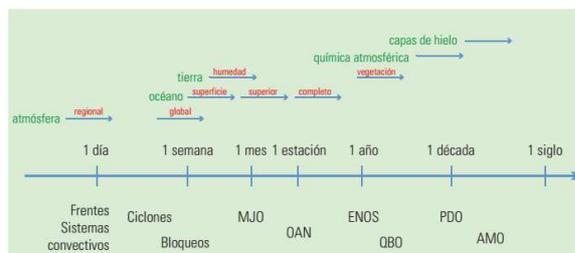


Fig. 3.- El problema de la predicción unificada tiempo-clima. Fenómenos en distintas escalas temporales y componentes que es necesario representar para cada una. Fuente: *Predicibilidad más allá del límite determinista. B. Hoskins. Boletín de la OMM 61(1), 2012.*

Básicamente, la aplicación de esta filosofía en un entorno de modelización climática, consistirá en incluir en un mismo sistema, las características de los modelos de predicción del tiempo a corto plazo junto con las de los modelos de medio-largo plazo. De esta forma, se podrá utilizar el mismo modelo para realizar simulaciones en diferentes escalas temporales (estacional, decenales, largo plazo).

Asimismo, esta configuración permitirá aprovechar en los modelos climáticos, las estructuras utilizadas por los modelos operativos de predicción del tiempo a corto plazo (herramientas de diagnóstico, sistemas de observación y asimilación) para mejorar la comprensión de los procesos existentes en el sistema climático, permitiendo así la calibración de los modelos (Palmer et al. 2008) y el aumento en la calidad y confianza de sus predicciones.

### El proyecto EC-EARTH

El proyecto EC-Earth (<http://www.ec-earth.org/>) se inició en el año 2006 por una serie de países miembros del Centro Europeo para la Predicción a Plazo Medio (*ECMWF*), con la finalidad de desarrollar conjuntamente un modelo de última generación, un *Earth System Model*, partiendo del modelo de predicción estacional del *ECMWF*. El objetivo principal del proyecto es aumentar el conocimiento científico sobre el complejo sistema terrestre, y proporcionar información climática en diferentes resoluciones espaciales y temporales, realizando simulaciones de utilidad tanto en predicción estacional como en predicciones decenales o en simulaciones de largo plazo, siguiendo así la filosofía “seamless prediction” o “predicción unificada o sin costuras” comentada.

EC-Earth se desarrolla de modo cooperativo en el marco de un consorcio europeo, con la participación de numerosos países a través de sus servicios meteorológicos, universidades y centros de investigación, promocionando así la cooperación internacional y favoreciendo la interacción con la comunidad europea de impactos climáticos. Entre los distintos miembros, por parte de España participan: AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), IC3 (Institut Català de Ciències del Clima), y BSC (Barcelona Supercomputing Centre), incorporándose recientemente la Universidad de Santiago de Compostela.



Fig 4.- Logotipo del consorcio EC-Earth.

El modelo EC-EARTH (Hazeleger et al. 2010) es un modelo acoplado atmósfera-océano-hielo-tierra desarrollado por los miembros que componen el consorcio EC-Earth. El núcleo principal está compuesto por el modelo atmosférico IFS (*Integrated Forecast System*) del ECMWF, en su versión estacional - System3 (Anderson et al. 2007; Stockdale et al. 2011) para la versión inicial, y actualmente System4 (Molteni et al. 2011) - y por el modelo NEMO (*Nucleus for European Modelling of the Ocean*) (Maded, 2008) como componente oceánico. A través del acoplador OASIS (Ocean, Atmosphere, Sea Ice, Soil version 3) (Valcke, 2006) se realiza el intercambio de información entre los distintos componentes del modelo (ver Fig. 5).

Con posterioridad, y siguiendo la filosofía de desarrollo continuo del modelo (actualmente en su versión v3.2), se han incorporado nuevos módulos adicionales (como por ejemplo: módulo de vegetación dinámica, módulo de biogeoquímica marina) con el objetivo de conformar un *ESM* lo más completo posible.

Una de las características del modelo EC-EARTH, es su flexibilidad en la elección de diferentes configuraciones posibles, pudiendo optar por ejecutar el modelo tanto en modo acoplado (océano-atmósfera) como en modo desacoplado del océano (solo atmosférico), y en distintas resoluciones horizontales y verticales, en función de la versión para IFS/NEMO seleccionada. Además, está preparado para ejecutarse en diferentes plataformas de computación, lo que permite adaptarse a las posibilidades de cada miembro del consorcio.

Esta versatilidad permite que el modelo se pueda usar tanto para integraciones climáticas de largo plazo, como para predicción decenal o incluso en experimentos de sensibilidad a altas resoluciones (Hazeleger and Bintanja, 2012). Ello ha permitido numerosos estudios sobre retroalimentaciones, variabilidad y predictabilidad del sistema climático, dando lugar a la publicación de numerosos artículos en revistas científicas de primer nivel (ver listado de publicaciones en <http://www.ec-earth.org/index.php/research/publications-menu>)

Una descripción más detallada del modelo y de sus componentes, así como de los diagnósticos de validación realizados, se puede encontrar en Hazeleger et al. (2010; 2011) y en Sterl et al. (2012).

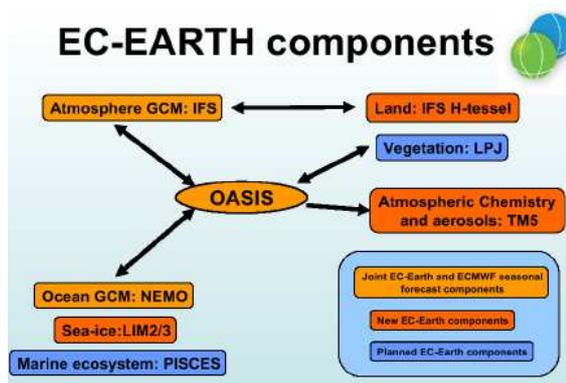


Fig. 5.- Componentes principales del modelo EC-Earth.

### Contribución de EC-Earth en el CMIP5

En el ámbito internacional, un conjunto de simulaciones de corto y largo plazo (históricas, decenales, escenarios de emisiones) realizadas con el modelo EC-Earth versión 2.3 (basado en IFS cy31r1, OASIS3, NEMO2, LIM2) participaron en el CMIP5, dentro de un conjunto de modelos climáticos (ver listado en <http://iacweb.ethz.ch/staff/beverleu/cmip5>) cuyos resultados sirvieron de base a las conclusiones del último Informe de Evaluación sobre Cambio Climático (AR5) realizado por el IPCC.

Partiendo de una integración inicial (de *spin-up*) de más de 700 años, con las condiciones de la época pre-industrial, con el objetivo de abarcar un amplio rango de estados posibles del océano, se escogieron diferentes años del final de esta integración (ver <http://eearth.knmi.nl/index.php?n=PmWiki.CMIP5> para más detalles) como condiciones iniciales para las simulaciones históricas (1850-2005), elaboradas por los catorce miembros que compondrían el ensemble, y que luego tendrían continuidad (ver fig. 6) con las integraciones para los distintos escenarios de emisiones (2006-2100) según diferentes RCP (*Representative Concentration Pathways*, van Vuuren et al. 2011).

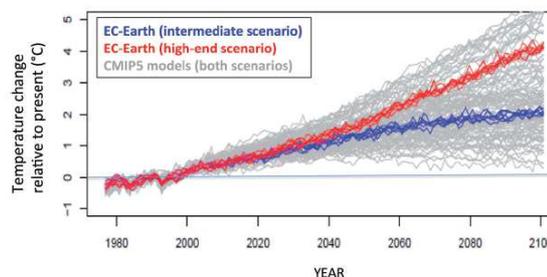


Fig. 6.- Evolución de la temperatura global en respuesta a dos escenarios de emisiones (RCP4.5 y RCP8.5). En color, los miembros de EC-Earth y en gris, miembros de los modelos del CMIP5. Fuente: *Accomplishments, Current Status and Future Plans of EC-EARTH*. EC-Earth Steering Group. Hazeleger, Bintanja (editors).

En el marco del CMIP5, se realizaron además varios conjuntos de simulaciones decenales, para el intervalo 1960-2005, utilizando dos métodos de inicialización distintos (full field initialisation, anomaly initialisation).

Estudios posteriores han permitido demostrar la relevancia de las predicciones decenales, evaluando la sensibilidad a las condiciones iniciales (Du et al. 2012), y demostrando la habilidad del modelo en la predicción multianual (Hazeleger et al. 2013) e incluso en la reconstrucción de eventos observados (Guemas et al., 2013).

#### Participación de AEMET

AEMET contribuyó como uno de los miembros del ensemble, realizando simulaciones de largo plazo (histórica y proyecciones según los escenarios de emisiones RCP4.5, RCP8.5 y abrupt4xCO<sub>2</sub>), y un conjunto de simulaciones decenales y multianuales (desde 1960 hasta 2005, en intervalos de 5 años) incluidas en el grupo de integraciones aportado por el modelo EC-Earth al CMIP5.

A modo de diagnóstico del comportamiento del modelo frente a observaciones, en la Fig. 7, se muestra, para el periodo 1850-2010, una comparación de las tendencias de temperatura (T2m) simuladas (en rojo y verde) frente a las observadas, proporcionadas por distintas bases de datos de observación (CRUTEM4 (Jones & al. 2012), Berkeley (Rohde & al. 2012)), junto con los reanálisis de ERA-Interim (Dee & al. 2011) y ERA40 (Uppala & al. 2005). Se puede comprobar que las tendencias de temperaturas dadas por el modelo, aunque con variaciones interanuales individuales, están en concordancia con las tendencias observadas, así como con el incremento para el intervalo completo (Kallberg, 2013)

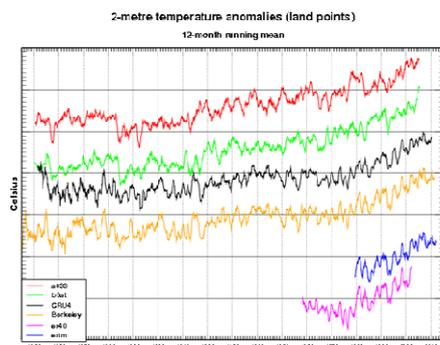


Fig. 7.- Media móvil (12 meses) de anomalías de temperatura a 2 metros sobre tierra. En verde, la integración histórica de AEMET; en rojo, la integración del IPMA portugués, frente a CRU4 en negro, Berkeley en amarillo; ERA40 en magenta; ERA-Interim en azul. Fuente: Kallberg. *Diagnostics of two EC\_Earth historical simulations and four 'System 4' decadal predictions.*

El conjunto completo de datos de salida del modelo, correspondientes a los diferentes miembros del ensemble de integraciones realizadas para el CMIP5, se pueden encontrar en la siguiente dirección web: <https://pcmdi.llnl.gov/search/cmip5>.

#### Perspectivas futuras

En la actualidad se está trabajando con la nueva versión del modelo (v3) que incorpora, aparte de una nueva versión del modelo atmosférico (System4) y de océano NEMO3, desarrollos en los módulos de química atmosférica (TM5), vegetación dinámica (LPJ-GUESS), y biogeoquímica oceánica (PISCES), lo que dará lugar a un aumento de la resolución del modelo, y a una simulación con más detalle de los procesos implicados en el sistema climático. Esta nueva versión participará en el siguiente CMIP6, y por tanto, en la nueva generación de modelos cuyos resultados se incluirán en el próximo informe del IPCC (AR6).

#### REFERENCIAS

Anderson, D., T. Stockdale, M. Balmaseda, L. Ferranti, F. Vitart, F. Molteni, F. Doblas-Reyes, K. Mogensen and A. Vidard, (2007). Development of the ECMWF seasonal forecast System 3. ECMWF Technical Memorandum 503.

Brown, A., S. Milton, M. Cullen, B. Golding, J. Mitchell, and A. Shelly, (2012). Unified Modeling and Prediction of Weather and Climate. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 1865–1877.

Dee, D. P., with 35 co-authors, (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quart. J. R. Meteorol. Soc., 137, 553-597.

Du, H., F.J. Doblas-Reyes, J. García-Serrano, V. Guemas, Y. Soufflet and B. Wouters (2012). Sensitivity of decadal predictions to the initial atmospheric and oceanic perturbations. Climate Dynamics, 39, 2013-2023.

Guemas V, Doblas-Reyes F, Andreu-Burillo I, Asif M., (2013). Retrospective prediction of the global warming slow down in the past decade, Nature Climate Change, 3, 649–653.

Hazeleger, W., and Coauthors, (2010). EC-Earth: A Seamless Earth-system Prediction Approach in Action. Bull. Amer. Meteor. Soc., 91,1357–1363.

Hazeleger W., and Coauthors, (2011). EC-Earth V2.2: Description and Validation of a New Seamless Earth System Prediction Model. Clim. Dyn. 39, 2611–2629.

Hazeleger W, Bintanja R (2012). Studies with the EC-Earth seamless earth system prediction model. *Clim. Dyn.*, 39:2609-2610.

Hazeleger, W., V. Guemas, B. Wouters, S. Corti, I. Andreu-Burillo, F. J. Doblas-Reyes, K. Wyser and M. Caian (2013). Multiyear climate predictions using two initialisation Strategies, *Geoph. Res. Lett.*, DOI: 10.1002/grl.50355.

Hoskins BJ (2012). The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 139: 573 – 584.

Hurrell, J. W., Meehl G. A., Bader D., Delworth T., Kirtman B., and Wielicki B., (2009). A Unified Modeling Approach to Climate System Prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90,1819–1832

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Jones, P.D., Lister, D.H., Osborn, T.J., Harpham, C., Salmon, M. and Morice, C.P. (2012). Hemispheric and large-scale land surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophy. Research.* 117.

Källberg, P., (2013). Diagnostics of two EC\_Earth historical simulations and four ‘System 4’ decadal predictions. Personal Communication.

Madec G. (2008). ‘NEMO ocean engine’. Note du Pole de modelisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27. ISSN no 1288-1619

Molteni F, Stockdale T, Balmaseda MA, Balsamo G, Buizza R, Ferranti L, Magnusson L, Mogensen K, Palmer TN, Vitart F. (2011). ‘The new ECMWF seasonal forecast system (System 4)’. Tech. Memo. 656. ECMWF: Reading, UK

Palmer, T.N., Doblas-Reyes F.J., Weisheimer A. and Rodwell M.J., (2008). Toward Seamless Prediction: Calibration of Climate Change Projections Using Seasonal Forecasts. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 89, 459–470.

Rohde R, Muller R, Jacobsen R, Perlmutter S, Rosenfeld A, et al. (2013). Berkeley Earth Temperature Averaging Process. *Geoinfor Geostat: An Overview* 1:2

Shukla, J., T. N. Palmer, R. Hagedorn, B. Hoskins, J. Kinter, J. Marotzke, M. Miller, and J. Slingo, (2010): Climate prediction from weeks to decades in the 21st century: Towards a new generation of world climate research and computing facilities for climate prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91,1407–1412.

Sterl A., Bintanja R., Brodeau L., Gleeson E., Koenigk T., Schmith T., Semmler T., Severijns C., Wyser K., Yang S., (2012). A look at the ocean in the EC-Earth climate model. *Clim. Dyn.*, 39, 2631-2657

Stockdale, T.N., D. L. T. Anderson, M. A. Balmaseda, F. Doblas-Reyes, L. Ferranti, K. Mogensen, T.N. Palmer, F. Molteni and F. Vitart, (2011). ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature. *Clim. Dyn.*

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A., (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93:485–498. doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Uppala, S.M. with 45 co-authors (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012.

van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt GC, Kram T, Krey V, Lamarque JF, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith SJ, Rose SK (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change* 109:5–31.

-----  
AR5, Fifth Assessment Report.  
<http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>

ECMWF (2006) IFS Cycle 31r1 documentation.  
Disponibile en: <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY31r1/index.html>

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change  
<http://www.ipcc.ch/>