

ÚLTIMOS AVANCES EN MODELIZACIÓN CLIMÁTICA

José Antonio Parodi Perdomo^{1*}, Esteban Rodríguez Guisado²

¹ Licenciado en Física. Área de Evaluación y Modelización del Clima, de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

² Licenciado en Física. Área de Evaluación y Modelización del Clima, de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

* Autor de contacto: jparodip@aemet.es

En la actualidad, el cambio climático se ha convertido en uno de los mayores problemas (si no el problema principal) a los que se enfrenta la humanidad en su conjunto. Los sucesivos informes del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, referencia de la ONU para el asesoramiento científico sobre el cambio climático) así lo corroboran (IPCC 2014, IPCC 2021), proporcionando una gran cantidad de información avalada científicamente al respecto del aumento de la temperatura global y de los cambios que está experimentando y en el futuro experimentará el clima. Son numerosos los sectores (energía, industria, agricultura, turismo, seguros, transporte, salud, etc.) que, cada vez más, requieren información sobre los posibles escenarios futuros de evolución del clima, tanto en próximas décadas como a largo plazo, dadas las repercusiones asociadas. También presentan gran demanda actualmente los estudios de atribución, evaluación y predicción de eventos extremos asociados al cambio climático (Rodríguez-Camino y Hernanz-Lázaro, 2021).

Los modelos climáticos son la herramienta fundamental utilizada para afrontar los problemas mencionados anteriormente, a través de la comprensión y estimación de la evolución futura del clima que se obtiene gracias a las simulaciones realizadas con ellos. Estos modelos resuelven con métodos numéricos las ecuaciones de la física y dinámica para la atmósfera, al igual que hacen los modelos de predicción del tiempo a corto plazo. Pero, además, y a diferencia de estos últimos, incorporan la simulación de componentes principales del sistema climático (hidrosfera, litosfera, criosfera, biosfera), estrechamente interrelacionados entre sí y de gran relevancia en la evolución del sistema climático global, permitiendo obtener resultados más realistas a largo plazo, al incluir implícitamente las retroalimentaciones que se producen entre los diferentes componentes. Cuando la escala de los procesos es inferior a la resolución del modelo (tamaño de la unidad mínima que es capaz de resolver) se utilizan aproximaciones y cálculos indirectos, lo que se denomina como "parametrizaciones del modelo".

Es importante señalar las diferencias principales entre los modelos de predicción numérica del tiempo (predicciones a corto y medio plazo) y la modelización climática (desde predicciones estacionales a proyecciones de largo plazo). La modelización del tiempo a corto/medio plazo es un problema de condiciones iniciales.

El valor de determinadas variables meteorológicas (p. ej. temperatura en superficie, perfil vertical de temperatura, humedad, viento, precipitación, presión), en un instante inicial dado, será crítico para determinar el estado de la atmósfera en el plazo de predicción deseado.

En cambio, en la modelización climática se pretende obtener una evolución a largo plazo de las variables meteorológicas, unos valores promedio y sus variaciones. En este caso la solución vendrá determinada principalmente por el balance de energía y, en definitiva, por las condiciones de contorno del sistema (p. ej. composición atmosférica, condiciones de la superficie terrestre y del océano, radiación incidente, extensión de superficies de hielo, etc.). La escala de predicción, el nivel de detalle espaciotemporal que proporcionará el modelo climático, dependerá de su resolución y del propósito para el que esté diseñado, aunque es posible obtener una mayor resolución a través del uso de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) lo que se denomina como "downscaling dinámico", o de modelos estadísticos, denominado "downscaling estadístico" a partir del modelo climático global. Sin embargo, la introducción del concepto de "seamless prediction" (Hoskins, 2012) en la última generación de modelos climáticos (como se describe más adelante) permitirá que se difumine esta separación entre escalas, y estructuras, de los modelos climáticos y los modelos de predicción del tiempo a corto plazo.

La generación de modelos climáticos en la actualidad. Modelos de última generación

Algunos modelos climáticos de desarrollo más reciente han introducido el mencionado paradigma "seamless prediction" ("predicción sin costuras" o "predicción sin discontinuidad"). La simulación del sistema climático terrestre debe incorporar los procesos que interactúan a través de un amplio espectro de escalas, desde aquéllos que se producen en evoluciones rápidas o de corto plazo (p. ej. frentes, borrascas, sistemas convectivos) a otros que tienen una evolución más lenta y/o de largo plazo (p. ej. procesos de la criosfera, corrientes oceánicas de retorno, El Niño-Oscilación del Sur) ya que, a pesar de producirse en escalas distintas estarán estrechamente relacionados entre sí.

Para ello, el modelo climático usa como base un modelo atmosférico de predicción de corto plazo, lo que permitirá aprovechar las ventajas y estructuras de los modelos de predicción del tiempo (mayor resolución, realización de diagnósticos frente a observaciones, mejores condiciones iniciales, etc.) y, a su vez, tener mayor versatilidad en cuanto a la escala temporal a resolver, pudiendo ser utilizados no solo para proyecciones climáticas de largo plazo, sino también para predicción decadal o estacional. Esto último, sin embargo, está limitado en gran medida por los recursos de computación disponibles ya que los aumentos de resolución inciden, de manera crítica, en los costes asociados de computación, almacenamiento y, en última instancia, de energía.

En los últimos años, los modelos climáticos han ido aumentando progresivamente tanto su resolución espacial (unidad mínima horizontal, número de niveles en la vertical de la atmósfera) como su complejidad (número de componentes del sistema climático simulados, parametrizaciones físicas, paralelización de procesos). Los modelos climáticos de última generación

están englobados en la categoría de ESM (*Earth System Models*) (Flato, 2011) cuando, a partir del núcleo de un modelo AOGCM (*Atmosphere-Ocean General Circulation Model*), el cual acopla entre sí los componentes: atmósfera, océano, hielo marino y suelo), incorporan, además, la simulación de procesos biofísicos y/o biogeoquímicos, el ciclo del carbono, así como una representación más

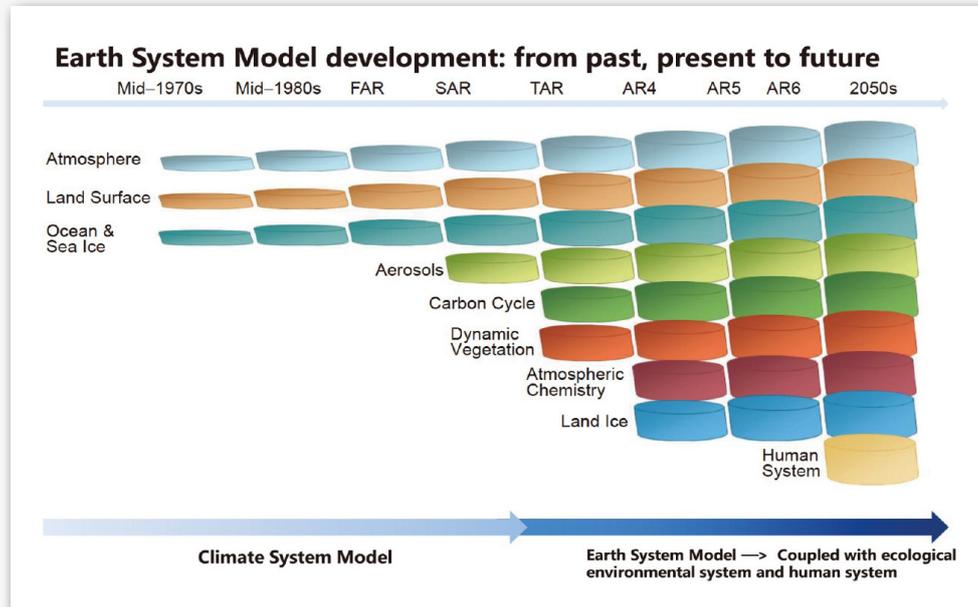


Figura 1. Representación del progresivo aumento de complejidad en los modelos climáticos con cada ciclo del IPCC (Fuente: Zhou *et al.*, 2022).

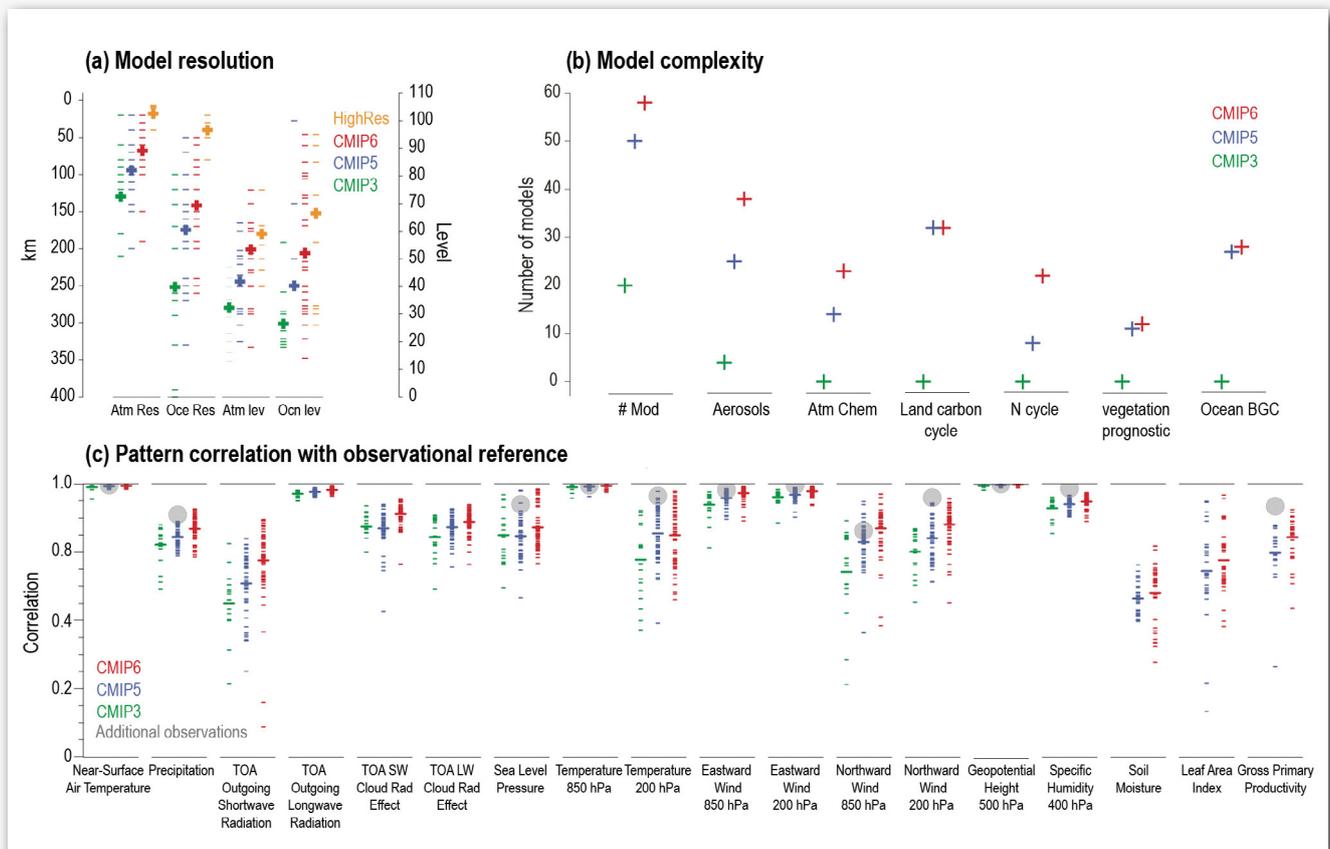


Figura 2. Progreso de los modelos climáticos en resolución, complejidad y representación de variables según las sucesivas fases del CMIP (CMIP3, CMIP5, CMIP6): a) Evolución en la resolución horizontal y niveles verticales; b) Evolución del número de modelos y los procesos incluidos; y c), Correlación entre resultados de modelos y observaciones de distintas variables (climatología media anual para periodo 1980–1999), las líneas cortas representan el valor de cada modelo y la línea larga representa el promedio del ensemble de modelos (Fuente y más información: Figura TS.2 | Arias *et al.*, 2021. IPCC, 2021: Technical Summary).

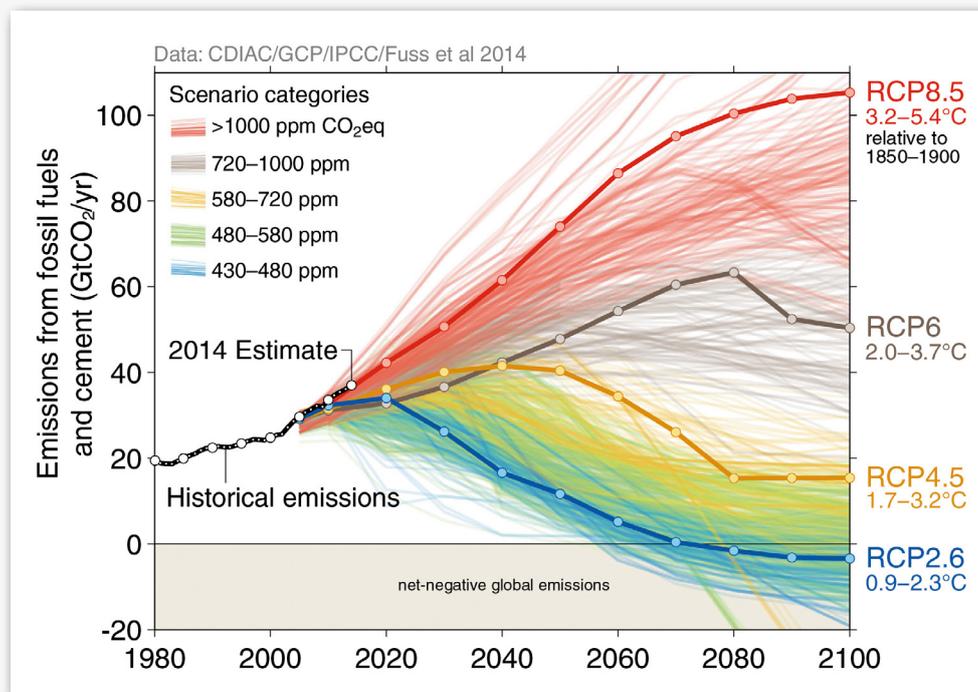


Figura 3. Caracterización de las incertidumbres en los escenarios de clima futuro. Cada línea corresponde a la evolución generada por un modelo. Los colores representan las ejecuciones generadas bajo un mismo escenario de emisiones (Fuente: Fuss *et al.*, 2014).

compleja de los aerosoles. Esto permitirá agregar y conocer con más detalle la influencia de cada uno de los complejos procesos de intercambio de energía, masa, aerosoles, nutrientes y gases, que se producen entre atmósfera, suelo y océanos. El modelo climático EC-EARTH (Hazeleger *et al.*, 2010; Döscher *et al.*, 2022), desarrollado en el marco de un consorcio formado por diferentes servicios meteorológicos y centros de investigación europeos, es un ejemplo de esta última generación de modelos climáticos.

Este aumento en la complejidad de los modelos climáticos se puede apreciar en la introducción progresiva de los componentes incluidos en los modelos, y en cómo va evolucionando en los sucesivos informes del IPCC.

Tanto los modelos más primitivos como los actuales han demostrado su habilidad en la simulación de las características principales de climas pasados y del clima presente (Hausfather *et al.*, 2020). No obstante, será muy importante el tratamiento de las incertidumbres asociadas a la modelización climática que siempre van a existir. Mediante el aumento de resolución de los modelos reduciremos la incertidumbre relativa a la representación de los procesos físicos. Sin embargo, las incertidumbres asociadas a las condiciones de contorno (variables socioeconómicas, emisiones, usos de suelo, etc.), permanecerán inalteradas, aunque las podremos acotar utilizando distintas opciones de escenarios de emisiones.

Para el tratamiento de las incertidumbres es vital y necesario el uso de ensembles (o predicción por conjuntos: conjunto de simulaciones realizadas variando las condiciones de realización), ya que, mediante diferentes opciones de generación de ensembles, podremos distinguir la variabilidad interna de cada modelo (ensemble de simulaciones de un mismo modelo) o las incertidumbres asociadas al uso de diferentes modelos (ensembles multi-modelo) (Rodríguez-Camino *et al.*, 2018).

En la actualidad, se están investigando diferentes estrategias que permitan obtener información valiosa sobre las diferentes incertidumbres y sobre el comportamiento de los modelos (Deser *et al.*, 2020) (p. ej. métodos de realización de ensembles, parametrizaciones estocásticas, uso de alta resolución en los modelos), siendo las sucesivas fases del proyecto de intercomparación de modelos acoplados CMIP -CMIP6 es su última fase (Eyring *et al.*, 2016), auspiciado por el WCRP (*World Climate Research Programme*), una fuente clave de conocimiento al respecto, y cuyos resultados son utilizados por el IPCC para la elaboración de sus Informes de Evaluación sobre el estado del Clima.

La evolución de la modelización climática ha ido en paralelo a los desarrollos en la tecnología de los computadores (Bauer *et al.*, 2015). Debido a su alta demanda de recursos de cálculo, los modelos climáticos se ejecutan sobre plataformas de supercomputación que permiten disponer de estos requisitos necesarios tan exigentes (número de procesadores, almacenamiento de datos,

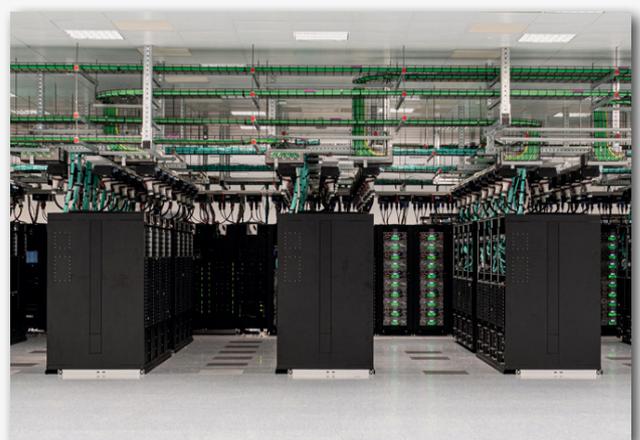


Figura 4. Supercomputador de ECMWF (Fuente: www.ecmwf.int).

gran demanda de energía, personal especializado que gestione el *hardware/software*), por lo que, actualmente, tan solo los servicios meteorológicos nacionales más importantes del mundo, o consorcios de servicios meteorológicos y centros de investigación, se pueden permitir desarrollar y disponer de un modelo climático de última generación que sea operativo.

Avances y desarrollos futuros en modelización climática

Dada la demanda social, cada vez mayor, de información útil y de calidad acerca de los posibles efectos del cambio climático, los principales esfuerzos en el desarrollo de la próxima generación de ESM van encaminados, principalmente, a incrementar la resolución espacial, permitiendo así la resolución explícita de un mayor número de procesos de pequeña escala y por tanto, de alcanzar detalles más complejos. El objetivo es llegar a resoluciones del orden de 1 km en un modelo global, lo que supone un reto muy importante (Wedi *et al.*, 2020) ya que la configuración estándar de los modelos climáticos globales actuales tiene una resolución horizontal de unos 50-100 km, por lo que para obtener una mayor resolución se ha de realizar el *downscaling* mencionado previamente (dinámico o estadístico).

En línea con este objetivo, la iniciativa europea *Destination Earth* (DestinE) (www.ecmwf.int/DestinE) implica el desarrollo de una réplica digital del planeta Tierra, a muy alta resolución, para la ayuda en la toma de decisiones sobre el cambio climático y las políticas de adaptación y mitigación de impactos/riesgos medioambientales. Dos “gemelos digitales” se están desarrollando para llevar a cabo este objetivo: uno de ellos estará dedicado a la adaptación al cambio climático, con el objetivo de proporcionar un sistema de información climática configurable, realizando simulaciones climáticas globales multi-decadales con una resolución de

5 km o inferior. El otro “gemelo digital” estará dedicado a la predicción de tiempo extremo a corto plazo y muy alta resolución (inferior a 1 km).

En este desarrollo están implicados como agentes principales ESA (*European Space Agency*), EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) y ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), aunque, debido a su enorme complejidad y necesidad de recursos, involucra además a numerosos organismos científicos, tecnológicos y de investigación, líderes a nivel europeo.

Esta iniciativa, *Destination Earth*, permitirá conectar de manera más estrecha la modelización climática con la producción de información climática relevante para diferentes sectores y explorar otros usos de la información generada.

Este objetivo de modelización climática a muy alta resolución llevará asociado una serie de problemas que afrontar (Bauer *et al.*, 2021), principalmente vinculados a la mejora de los sistemas de computación, necesidad de altas prestaciones de cálculo y la gestión del almacenamiento de datos. Esto ha llevado a la aparición de diferentes estrategias de optimización (Palmer y Stevens, 2019), entre las que se encuentran: paralelización de procesos de cálculo y uso de GPU (*Graphics Processing Unit*); asignación de “precisión reducida” en la codificación de ciertas variables; mayor modularidad en el código usado para los distintos componentes del sistema; mejora en la simulación y complejidad de los aerosoles atmosféricos; mejoras en la hidrología y simulación de corrientes subterráneas en el esquema de suelo; optimización en la gestión de las salidas del modelo (paralelización, post-proceso simultáneo); introducción de física estocástica y de inteligencia artificial en las parametrizaciones; resolución explícita de procesos convectivos y de microfísica en nubes; optimización y mejora de los

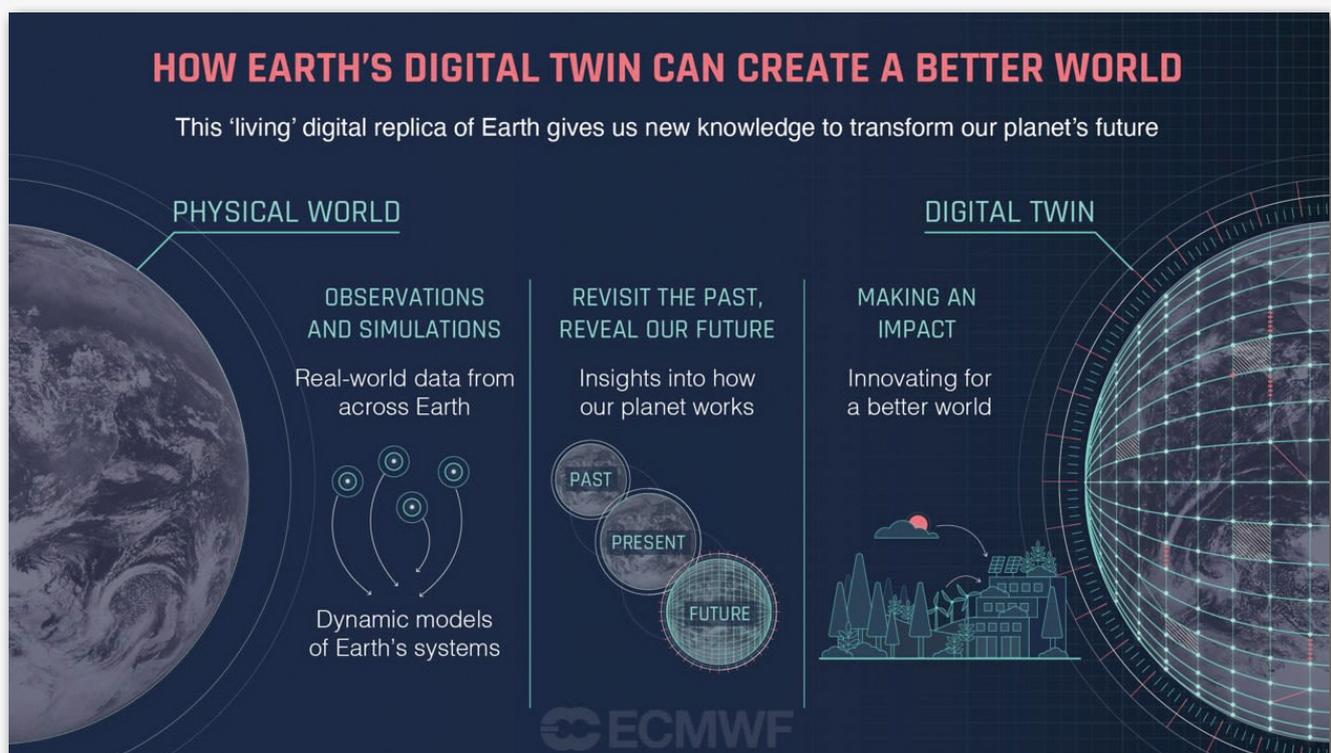


Figura 5. Esquema representativo acerca de la “réplica digital de la Tierra” o “gemelo digital” (Fuente: www.ecmwf.int).

procesos de asimilación de datos para condiciones iniciales; estrategias óptimas de generación de ensembles; implicaciones respecto a sensibilidad climática; umbrales/puntos de no retorno del sistema climático, etc.).

El objetivo es de una envergadura tan importante y conlleva unos costes asociados tan elevados que, para llevarlo a cabo, será imprescindible la participación y cooperación de los institutos de investigación y tecnología más importantes a nivel mundial, junto con centros meteorológicos nacionales y la colaboración de grupos interdisciplinarios de expertos, generando al mismo tiempo oportunidades únicas para el avance científico y tecnológico. Los resultados los podremos comprobar y valorar en esta misma década.

Referencias

Arias, P.A., et al. (2021). *Technical Summary*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. doi:10.1017/9781009157896.002

Bauer, P., Dueben, P.D., Hoefler, T., et al. (2021). The digital revolution of Earth-system science. *Nature Computational Science*, 1(2): pp. 104–113. <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00023-0>

Bauer, P., Thorpe, A., y Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525(7567): pp. 47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>

Deser, C., Lehner, F., Rodgers, K.B., et al. (2020). Insights from Earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. *Nature Climate Change*, 10(4): pp. 277–286. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0731-2>

Döscher, R., et al. (2022). The EC-Earth3 Earth system model for the Coupled Model Intercomparison Project 6. *Geoscientific Model Development*, 15(7): pp. 2973–3020. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2973-2022>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., y Taylor, K.E. (2016). *Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization*. *Geoscientific Model Development*, 9(5): pp. 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

Flato, G.M. (2011). Earth system models: An overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6): pp. 783–800. <https://doi.org/10.1002/wcc.148>

Fuss, S., Canadell, J.G., Peters, G.P., et al. (2014). Betting on negative emissions. *Nature Climate Change*, 4(10): pp. 850–853. <https://doi.org/10.1038/nclimate2392>

Hausfather, Z., Drake, H.F., Abbott, T., y Schmidt, G.A. (2020). Evaluating the performance of past climate model projections. *Geophysical Research Letters*, 47(1): e2019GL085378. <https://doi.org/10.1029/2019GL085378>

Hazeleger, W., et al. (2010). EC-Earth. A Seamless Earth-System Prediction Approach in Action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(10): pp. 1357–1364. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1>

Hoskins, B.J. (2013). The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem: a stimulus for our science. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(672): pp. 573–584. <https://doi.org/10.1002/qj.1991>

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, y B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA (En imprenta). <https://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>

Palmer, T. (2014). Climate forecasting: Build high-resolution global climate models. *Nature*, 515, pp. 338–339. <https://doi.org/10.1038/515338a>

Rodríguez Camino, E., Parodi Perdomo, J.A., González Rouco, J.F., y Montoya Redondo, M. (2018). Proyecciones climáticas. Cap. 29, pp. 470–508. En: *Física del caos en la predicción meteorológica. Historia y fundamentos de la meteorología, sistemas de predicción por conjuntos, predicción probabilista y aplicaciones, cambio climático y aspectos sociales*. Ed. C. Santos Burguete. Pub. AEMET. <https://doi.org/10.31978/014-18-009-x.29>

Rodríguez Camino, E., y Hernanz Lázaro, A. (2021). Modelización y predicción en distintas escalas temporales: servicios de atribución de eventos extremos al cambio climático. *Revista Ambienta*, 130, pp. 76–83. https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/13399/1/AMBIENTA%20130_3.pdf

Wedi, N.P., Polichtchouk, I., Dueben, P., Anantharaj, V.G., Bauer, P., Boussetta, S., et al. (2020). A baseline for global weather and climate simulations at 1 km resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11): pp. 1942–2466. e2020MS002192. <https://doi.org/10.1029/2020MS002192>

Zhou, T., Zhang, W., Chen, D., Zhang, X., Li, C., Zuo, M., y Chen, X. (2022). Understanding and building upon pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From greenhouse effect to Earth system science and beyond. *Science China Earth Sciences*, 65(4), pp. 589–600. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9906-4>