

Conferencia del Premio de la OMI 2024



Predicción meteorológica y climática por conjuntos: de los orígenes a la inteligencia artificial

Tim Palmer dictando la conferencia del Premio de la OMI en la 78^a reunión del Consejo Ejecutivo de la OMM (junio de 2024)

por Tim Palmer, Departamento de Física, Universidad de Oxford

La predicción por conjuntos constituye una parte vital de la predicción meteorológica y climática operativa moderna, ya que permite a los usuarios estimar cuantitativamente el nivel de confianza que pueden depositar en un resultado de predicción concreto. Esto, por supuesto, es fundamental para ayudar a estos usuarios a tomar decisiones sobre diferentes escenarios que dependen de las condiciones meteorológicas. El desarrollo de estos sistemas por conjuntos para la predicción meteorológica y climática ha desempeñado un papel importante en mi propia carrera de investigación. A continuación expongo una perspectiva personal sobre estas cuestiones. Concluyo con algunas reflexiones sobre la dirección que deberíamos tomar de cara al futuro, especialmente a la luz de la revolución de la inteligencia artificial. Me siento agradecido y honrado por haber sido galardonado con la medalla de la OMI/OMM por esta labor; muchos de mis mayores héroes son [medallistas de la OMM](#).

El nacimiento de la predicción numérica del tiempo comenzó poco antes de 1950, cuando John von Neumann reunió a un equipo de meteorólogos, dirigidos por Jule Charney (medallista de la OMI en 1971), con el fin de codificar la ecuación de la vorticidad barotrópica en la computadora digital del **ENIAC**. Estos primeros modelos no eran mundiales y solo podían hacer predicciones útiles con uno o dos días de antelación.

Al poco tiempo, los meteorólogos empezaron a preguntarse con cuánta antelación podían

hacerse, en principio, predicciones meteorológicas fiables, dados los modelos mundiales de capas múltiples que codificaban las ecuaciones primitivas. Los estudios de Chuck Leith, Yale Mintz y Joe Smagorinsky (medallista de la OMI en 1974) proporcionaron estimaciones de alrededor de dos semanas, basadas en el tiempo que tardaban las perturbaciones iniciales con amplitudes coherentes con el error de las condiciones iniciales en llegar a ser de la misma envergadura de estados de la atmósfera elegidos al azar. La escala temporal de dos semanas pasó a conocerse como el "límite de la predictibilidad determinística". Como comentaré más adelante, se convirtió en un concepto incomprendido.

Me incorporé a la [Oficina Meteorológica del Reino Unido](#) en 1977, tras realizar un doctorado sobre la teoría general de la relatividad de Einstein, una de mis ambiciones de la infancia. Mi cambio de tema se debió en parte al deseo de hacer algo más útil durante el resto de mi carrera como investigador, y en parte a un encuentro casual con Raymond Hide, un geofísico inspirador de renombre mundial que entonces trabajaba en la Oficina Meteorológica. Mis primeros trabajos en la Oficina se centraron en la dinámica estratosférica. Con mi colega Michael McIntyre, de la Universidad de Cambridge, descubrimos las ondas rompientes más grandes del mundo y, al hacerlo, iniciamos el uso de la [vorticidad potencial de Rossby-Ertel](#) como diagnóstico esclarecedor de la circulación atmosférica a escala planetaria. La ausencia general de este tipo de [ondas rompientes de Rossby](#) en

el hemisferio sur reviste suma importancia para explicar por qué el agujero de ozono se descubrió por primera vez en el hemisferio sur y no en el hemisferio norte, como se esperaba.

De este modo, me había convertido en un experto en dinámica estratosférica y fui ascendido a funcionario científico principal y, por lo tanto, jefe de grupo en la Oficina Meteorológica. Por un capricho de la función pública científica del Reino Unido, esto significaba que tenía que cambiar de campo, ya que no había vacantes para jefe en el grupo estratosférico. De hecho, la única vacante de investigador principal estaba en la rama de la predicción a largo plazo. En ese puesto acabé yo, sin saber nada de predicciones a largo plazo.

En aquella época, las predicciones a largo plazo —en escalas temporales mensuales a estacionales— se realizaban con lo que se denominaban modelos estadísticos empíricos. Ahora los llamaríamos modelos basados en datos. Mi trabajo consistía en introducir modelos basados en la física en el sistema operativo de predicciones a largo plazo. Los primeros trabajos de J. Shukla (medallista de la OMI en 2007) y Kiku Miyakoda indicaron que tales modelos —si se basan en las temperaturas observadas de la superficie del mar— son, en principio, capaces de predecir el flujo a escala planetaria en estas escalas de tiempo largas.

Los resultados del modelo estadístico empírico eran de carácter probabilístico. Por ejemplo, proporcionarían predicciones probabilísticas de regímenes de circulación predefinidos en el Reino Unido (conocidos como tipos de tiempo de Lamb). Por lo tanto, si los modelos basados en la física debían integrarse en el sistema de predicción a largo plazo, el resultado de la predicción también tenía que ser de carácter probabilístico. Mi colega James Murphy y yo desarrollamos un sistema de predicción por conjuntos relativamente rudimentario basado en el modelo climático global de la Oficina Meteorológica, utilizando análisis consecutivos para generar las condiciones iniciales, a partir de las cuales se podían estimar dichas probabilidades. Creo que fue el primer sistema de predicción por conjuntos en tiempo real del mundo y comenzó a elaborar predicciones probabilísticas por conjuntos a finales de 1985.

A principios de 1986 se me ocurrió una idea: ¿Por qué no utilizamos el sistema de predicción por conjuntos en todas las escalas temporales, incluidas las de medio plazo e incluso corto plazo? En 1986

me incorporé al [Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio](#) (ECMWF) para intentar desarrollar e implantar un sistema de este tipo, pero me encontré con algunas reticencias por parte de mis colegas. Su argumento era que, si bien estaba bien utilizar métodos por conjuntos probabilísticos para predecir en escalas temporales superiores al límite de la predictibilidad determinística, es decir, en escalas temporales mensuales a estacionales, el problema de la predicción en escalas temporales dentro de este límite era esencialmente de carácter determinístico. Por lo tanto, debíamos utilizar los nuevos recursos informáticos, cuando estuvieran disponibles (era la época de la Ley de Moore), para mejorar el sistema de predicción determinística —en particular, aumentando la resolución del modelo— en lugar de realizar múltiples ejecuciones de un modelo existente.

Me pareció que este argumento se basaba en una mala interpretación de esta noción de “límite de la predictibilidad determinística”. Según mi opinión, debía considerarse como una caracterización de la predictibilidad del tiempo en promedio, es decir, a lo largo de muchos casos. Habrá casos en los que dicha predictibilidad sea inferior a la media de 2 semanas, y casos en los que la predictibilidad del tiempo sea superior a la media de 2 semanas. El principal objetivo de un sistema de predicción por conjuntos es ayudar a determinar,



Figura 1. El anillo inicial de puntos representa la incertidumbre en nuestro conocimiento del estado inicial (para las famosas ecuaciones de Lorenz). La evolución del anillo depende de su posición en el atractor. Algunos estados iniciales son mucho más impredecibles que otros.

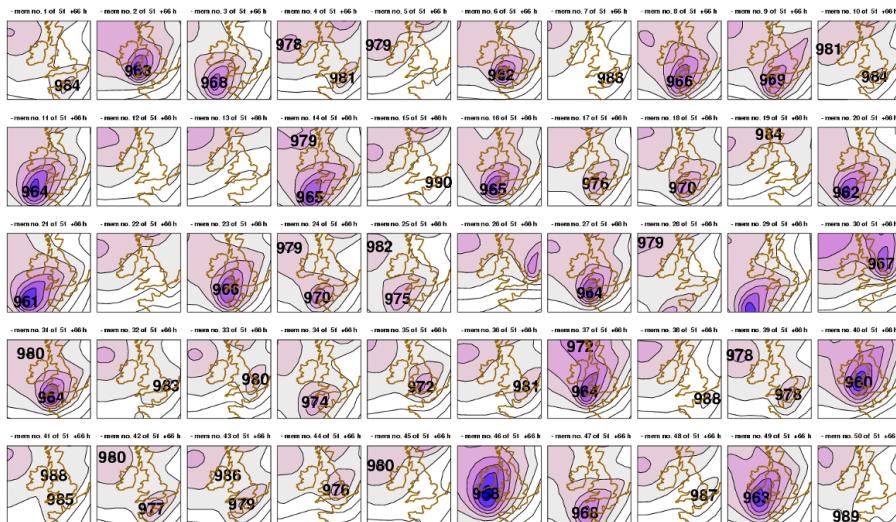


Figura 2. Los mapas de sellos de una predicción por conjunto de 2,5 días para la mañana del 16 de octubre de 1987. El conjunto muestra que el tiempo es excepcionalmente impredecible, muy parecido a la más inestable de las integraciones de Lorenz mostradas en la figura 1.

con antelación, si las condiciones meteorológicas se encuentran en un estado más o menos predecible. Argumenté que si los meteorólogos de los medios de comunicación hacían predicciones con un mayor nivel de confianza de la que merece la predictibilidad del flujo, el público perdería la confianza en los meteorólogos cuando las cosas fueran mal. (En realidad, había tantos casos en los que las predicciones determinísticas de la televisión habían salido mal que el público consideraba la predicción meteorológica como un arte bastante oscuro, que había que tomar con grandes pinzas).

Ed Lorenz (medallista de la OMI en 2000) desarrolló su emblemático modelo del caos para demostrar que la atmósfera no evolucionaba periódicamente. Sin embargo, como se muestra en la figura 1, su modelo también ilustra bien el concepto de que la aparición de las pequeñas incertidumbres iniciales y, por tanto, de la predictibilidad, depende del estado, incluso en las primeras fases de una predicción. Puede haber ocasiones en las que se generen pequeñas incertidumbres de forma explosiva. El modelo de Lorenz deja claro que la noción de límite de predictibilidad es, en efecto, estadística y se obtiene promediando muchas condiciones iniciales.

Aunque algunos de mis colegas pensaron que el modelo de Lorenz era demasiado idealizado como para ser útil, la naturaleza se manifestó con decisión en la segunda mitad de 1987. La famosa tormenta de octubre de 1987, que asoló grandes zonas del sur de Inglaterra, no se había pronosticado el día anterior. Los medios de comunicación pidieron la dimisión del entonces Director General de la Oficina Meteorológica, John Houghton. En efecto,

el público británico había perdido la confianza en el servicio nacional de predicción meteorológica.

Mis colegas del ECMWF y yo analizamos retrospectivamente este caso en nuestro incipiente sistema de predicción por conjuntos de medio plazo y, para nuestro alivio, mostró un flujo extraordinariamente inestable e impredecible sobre el Atlántico Norte. En un conjunto de 50 predicciones con 2,5 días de antelación se observaron miembros del conjunto cuyas condiciones meteorológicas en el sur de Inglaterra oscilaban entre una cresta de tiempo estable y ráfagas de viento con fuerza de huracán. Los distintos miembros del conjunto se muestran en la figura 2.

Pero ¿cómo comunicar un conjunto así a la población? Algunos colegas opinaban —y algunos siguen opinando— que había que promediar las soluciones del conjunto y comunicar la media del conjunto. Aunque el error cuadrático medio de una predicción de este tipo sería relativamente pequeño, la media del conjunto amortiguaría necesariamente las soluciones meteorológicas extremas. A menos que las condiciones meteorológicas extremas sean excepcionalmente predecibles, lo que rara vez ocurre, una predicción media del conjunto resulta inútil para alertar de condiciones meteorológicas extremas.

Argumenté que la probabilidad de una predicción de ráfagas de viento con fuerza de huracán debía comunicarse directamente a la población. En aquella época, muchos meteorólogos sostenían que el público nunca entendería la noción de probabilidad. Mi propia sensación era que el público entendía bien las probabilidades de que un caballo ganara una carrera de caballos. ¿Por qué iba a ser diferente el tiempo atmosférico? La

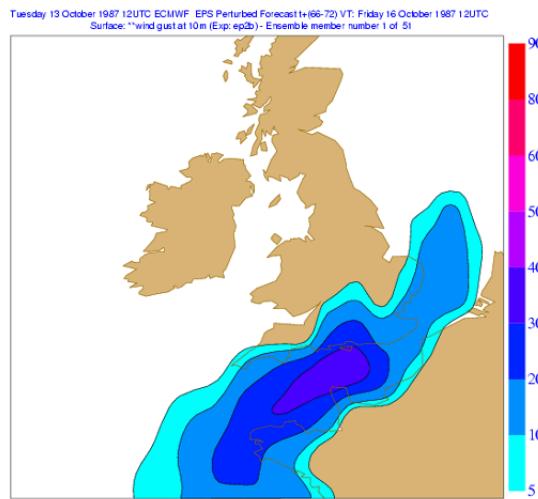


Figura 3. Mapa de la probabilidad de vientos huracanados para la mañana del 16 de octubre. Las probabilidades sobre el sur de Inglaterra son enormemente mayores que la probabilidad climatológica de vientos huracanados en esta parte del mundo.

probabilidad de vientos huracanados derivada del conjunto de la figura 2 se muestra en la figura 3. Dado que “en Hertford, Hereford y Hampshire apenas se producen huracanes”, una probabilidad de alrededor del 30 % es muy significativa y habría alertado a la población del riesgo de un fenómeno meteorológico excepcional.

El éxito del sistema de predicción por conjuntos en la predicción retrospectiva del riesgo de fenómenos meteorológicos extremos en octubre de 1987 fue importante para convencer a los colegas de que un centro como el ECMWF debía tomarse en serio la predicción probabilística por conjuntos, a pesar de que su tarea principal era realizar predicciones dentro del límite de la predictibilidad determinística. El sistema de predicción por conjuntos del ECMWF se puso en marcha en 1992: fue el trabajo de muchas personas a quienes agradezco en mi libro *The Primacy of Doubt* (La primacía de la duda). Los colegas de los Centros Nacionales de Predicción del Medioambiente (NCEP) pusieron en marcha al mismo tiempo su sistema de predicción por conjuntos de medio plazo. (El equipo de los NCEP estaba dirigido entonces por una colega tristemente fallecida, Eugenia Kalnay, medallista de la OMI en 2009, con la que mantuve muchas discusiones científicas amistosas sobre el método más adecuado para generar las perturbaciones iniciales del conjunto).

En la actualidad, la predicción por conjuntos se ha convertido en parte integrante de las predicciones meteorológicas y climáticas en todas las escalas temporales, desde el muy corto plazo hasta las escalas temporales del cambio climático y más allá. En cierto modo, la manera en que se ha extendido la predicción por conjuntos por todo el mundo me recuerda el dicho de **Max Planck**: dage: rara vez convences a tus oponentes, más bien llega una nueva generación para la que la idea es evidente.

Como parte de esta transición a los conjuntos, las predicciones de precipitaciones en las aplicaciones meteorológicas se dan en forma de probabilidades. Aunque el público puede no saber que estas probabilidades se generan a partir de predicciones por conjuntos, sí entiende que proporcionan estimaciones de la incertidumbre de las predicciones. Obviamente, una predicción del 100 % de probabilidad de lluvia es más segura que una predicción del 20 %. Las personas entienden estas predicciones, que les ayudan a tomar decisiones. Puede tratarse de algo tan trivial como llevar o no impermeables a una excursión por el monte. Si la probabilidad de lluvia es del 20 %, entonces es un 80 % probable que no se necesiten los impermeables, los cuales, en caso contrario, habría que meter en la mochila, que sería un poco más pesada. Pero si lloviera y no se hubiera llevado los impermeables, el resto de la caminata sería muy incómoda. Por supuesto, es el usuario, y no el pronosticador, quien debe decidir si empacar los impermeables. En este caso, el usuario debe sopesar el riesgo de empaparse (probabilidad de lluvia por inconveniente de ropa mojada) frente al inconveniente de una mochila más pesada. Si la probabilidad de lluvia fuera del 5 %, quizá no valdría la pena llevar impermeables. Si fuera el 80 %, entonces quizás sí valdría la pena. La determinación de dónde está exactamente la línea divisoria entre llevar impermeables y no llevarlos es una cuestión de elección. Las predicciones con estimaciones de incertidumbre ayudan al usuario a tomar mejores decisiones.

Una de las aplicaciones más importantes de las predicciones por conjuntos de medio plazo es el socorro en casos de desastre. Hasta hace poco, los organismos humanitarios proporcionaban alimentos, agua, medicamentos, refugio y otros tipos de ayuda, después de que un fenómeno meteorológico extremo azotara una región. Las predicciones determinísticas eran sencillamente demasiado poco fiables como para que estos organismos pudieran tomar medidas anticipatorias.

Sin embargo, debido a las predicciones por conjuntos, las cosas han cambiado. Al igual que la línea divisoria entre llevar impermeables o no, con antelación un organismo puede estimar objetivamente un umbral de probabilidad para un fenómeno extremo, por encima del cual se pueden tomar medidas anticipatorias y por debajo del cual no se deberían tomar. Si la probabilidad prevista de un fenómeno concreto supera este umbral, tiene sentido objetivo que se tomen medidas anticipatorias.

Estamos en plena revolución

Hacia finales de 2023, se produjo una revolución. Un grupo de la empresa Huawei demostró que era posible predecir las condiciones meteorológicas utilizando inteligencia artificial (IA). Y no solo eso, los principales resultados determinísticos del ECMWF fueron igualados por el sistema de IA. En cierto sentido, se trataba de un retorno a los tiempos de los modelos estadísticos empíricos: con muchos datos, desarrollar un código que descubriera correlaciones en los datos que pudieran utilizarse para hacer predicciones. ¡No era necesario conocer las leyes de la física!

Desde entonces, se ha utilizado la IA para crear sistemas de predicción por conjuntos, con niveles de acierto comparables a los del conjunto del ECMWF (aunque todavía no he comprobado si podrían haber pronosticado la probabilidad de vientos huracanados en 1987, como se muestra en la figura 2). En palabras del Director de IA de la Oficina Meteorológica: "Estamos en medio de una revolución de la IA en la que las tecnologías de la web profunda de más rápido crecimiento del mundo tienen la capacidad para reescribir las reglas de industrias enteras, cambiando nuestra forma de vivir".

De hecho, ¿necesitaremos la predicción numérica del tiempo en el futuro? ¿Conseguirá el sector comercial dominar la predicción meteorológica con sus modelos de inteligencia artificial baratos? El tiempo lo dirá. No obstante, creo que en el futuro la predicción meteorológica será una mezcla de IA basada en datos y predicción numérica del tiempo basada en la física. En cierto sentido, volveremos a los tiempos en que yo empezaba a elaborar conjuntos para la escala temporal de mensual a estacional, y las predicciones operativas combinaban los modelos estadísticos empíricos y los modelos basados en la física.

En Oxford, hemos estado trabajando en una mezcla de este tipo. En la actualidad, los servicios meteorológicos nacionales utilizan modelos de área limitada para reducir la escala de las predicciones mundiales a su región. En el caso de las predicciones por conjuntos a escala mundial, esto resulta muy costoso desde el punto de vista informático. De hecho, ningún Servicio Meteorológico Nacional puede permitirse crear 50 predicciones regionales a escala reducida en el intervalo de 2 semanas del sistema de predicción mundial. Como resultado, se pierde información valiosa cuando se realiza la reducción de escala. A modo de alternativa, hemos desarrollado una red generativa antagónica para realizar la reducción de escala acoplada al conjunto del ECMWF a escala mundial. Con esta IA, se logra realizar una predicción regional probabilística a escala reducida para todo el período de predicción de 2 semanas con un costo computacional muy moderado. Hemos probado el sistema combinado de predicción numérica del tiempo e inteligencia artificial en el Reino Unido utilizando datos de radar como indicadores de precipitación. Parece que funciona bien y que la predicción de escala reducida tiene un grado de acierto mayor que el conjunto global bruto. Actualmente estamos probando ese sistema en África Oriental. Si funciona allí, debería funcionar en cualquier parte del mundo. Este método puede cambiar la forma en que se realizan las predicciones meteorológicas operativas en todo el mundo.

Por supuesto, hay una razón teórica por la que es mejor intentar combinar modelos basados en la física y en la IA. Con el cambio climático, los fenómenos meteorológicos se producen ahora con tal intensidad que quedan fuera de los datos de entrenamiento de una IA. Es casi una obviedad que la extrapolación es menos fiable que la interpolación en estadística. Para mantener la fiabilidad de nuestros sistemas de predicción, es fundamental seguir incluyendo los modelos basados en la física.

De hecho, en lo que respecta a la escala temporal del clima, diría que no hay más alternativa que seguir utilizando los modelos basados en la física para las proyecciones regionales o globales del cambio climático.

Tanto si se trata de estimar la probabilidad de que se supere un punto crítico como de que se produzca una aceleración del cambio climático debida a una retroalimentación positiva de nube, no podemos confiar en las estimaciones de la IA basadas en

datos de entrenamiento que no han visto puntos críticos ni cambios en la retroalimentación global de nube.

Diría que el problema del cambio climático es en sí mismo razón suficiente para mantener también los modelos basados en la física para la predicción meteorológica. Soy un gran partidario de lo que se denomina predicción sin discontinuidad. Al probar si un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT) puede pronosticar con exactitud la temperatura máxima de mañana, estamos probando implícitamente los esquemas de formación de nubes y los esquemas de la superficie terrestre de este modelo. Un sesgo sistemático en una predicción a corto plazo de la temperatura máxima indica un error en la física parametrizada del modelo, como en los esquemas de formación de nubes o de superficie terrestre. Y, por supuesto, si hay sesgos en esos esquemas, no podemos fiarnos de la predicción de ese modelo sobre el cambio climático en la escala temporal de un siglo.

Entonces, ¿cómo deberían evolucionar los sistemas de predicción numérica del tiempo para aprovechar al máximo esta sinergia entre la PNT y la IA? Personalmente, creo que el avance más importante que se necesita ahora en materia de PNT es la creación de un modelo global a escala de kilómetros. Además de ser de vital importancia para la PNT, también lo será para la predicción climática regional.

Un punto clave de los modelos a escala de kilómetros es que tres procesos físicos importantes (la convección profunda, la resistencia orográfica debida a las ondas de gravedad y la mezcla oceánica) se resolverán al menos parcialmente. Esperemos que esto permita reducir algunos de los errores sistemáticos que surgen cuando se parametrizan estos procesos. Por supuesto, seguirá habiendo incertidumbres en la representación computacional de las ecuaciones de movimiento. No obstante, estas incertidumbres pueden representarse mediante técnicas estocásticas.

No cabe duda de que se generarán modelos a escala de kilómetros si esperamos lo suficiente. Sin embargo, si extrapolamos la resolución de los modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Climáticos (CMIP), no alcanzaremos la escala de kilómetros al menos hasta mediados de la década de 2050 (comunicación personal de



Tim Palmer recibe el Premio de la OMI de manos de la Secretaria General de la OMM, Celeste Saulo, y el Presidente de la Organización, Abdulla Al Mandous.

Andreas Prein). En mi opinión, esto no es suficiente. Si vamos a llegar a puntos críticos irreversibles o a cambios en la retroalimentación de nube en nuestro sistema climático, tenemos que conocerlos ahora, no cuando sea demasiado tarde.

Mi opinión es que necesitamos una especie de “CERN [Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire] para el cambio climático”, en el que los centros de modelización de todo el mundo puedan poner en común recursos humanos, informáticos y financieros para desarrollar una nueva generación de modelos meteorológicos y climáticos globales a escala de kilómetros sin discontinuidad. Hay quienes sostienen que necesitamos múltiples modelos para representar la diversidad de modelos y, por lo tanto, la incertidumbre; yo diría que podemos representar mejor esa diversidad con representaciones estocásticas de procesos no resueltos. ¿Por qué mejor? Porque cada miembro de un conjunto de modelos múltiples supone erróneamente que el proceso de parametrización es determinístico, y no lo es. Se trata de un error de clase que puede subsanarse en un modelo estocástico.

Algunos sostienen que si destinamos recursos informáticos a un modelo global a escala de kilómetros, no tendremos recursos informáticos para ejecutar grandes conjuntos. Sin embargo, considero que se trata de un ámbito en el que un sistema híbrido de modelos basados en la IA y la física podría ser transformador. La idea sería que el sistema de IA, entrenado con los resultados del modelo a escala de kilómetros, generara miembros sintéticos de conjuntos de alta resolución. De este modo, a partir de un conjunto mínimo de unos 20 miembros, podríamos generar conjuntos de miles de ellos utilizando la IA.

Por supuesto, seguiremos necesitando una jerarquía de modelos climáticos. Estos modelos a escala de kilómetros se situarán en un extremo de la jerarquía, que incluirá los modelos del CMIP y modelos muy idealizados, como el modelo del caos de Lorenz.

Quisiera concluir dando las gracias a la OMM, no solo por este premio, sino por haber contribuido al desarrollo de mi carrera. Los talleres y conferencias organizados bajo los auspicios de la OMM me ayudaron a conocer a científicos de distintas partes del mundo y, lo que es más importante, de distintos ámbitos de la meteorología y la climatología, que de otro modo no habría conocido. Estos talleres fueron decisivos para sembrar las ideas que he expuesto en este ensayo.

Agradecimiento

El trabajo que acabo de describir no habría sido posible sin la ayuda, la inspiración y la orientación de muchos colegas, algunos de los cuales figuran en mi libro *The Primacy of Doubt* (La primacía de la duda).

Lecturas complementarias

Palmer, T.N., 2019: The ECMWF ensemble prediction system: Looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 145, Issue SI, 12-14. <https://doi.org/10.1002/qj.3383>.

Palmer, T.N., 2022: *The Primacy of Doubt*. Basic Books and Oxford University Press.