

Desarrollo de la predicción meteorológica operativa condicionada por las propiedades de la triple “in” de los modelos numéricos

por Rucong Yu¹, Jian Li² y Pengqun Jia³

La predicción meteorológica operativa ha alcanzado un punto de inflexión. Es posible que pueda ser remodelada por las propiedades de la triple “in” de los modelos numéricos: “indispensabilidad”, “inexactitud” e “insuficiencia”. La indispensabilidad de los modelos numéricos es una propiedad destacada de la meteorología operativa actual. Pero la inexactitud está enraizada en casi todos los esquemas numéricos y el carácter de insuficiencia siempre existirá debido a la extrema complejidad del sistema Tierra.

Las cualidades intrínsecas de las propiedades de la triple “in” en los modelos numéricos determinarán el avance del desarrollo meteorológico, así como el marco futuro de la predicción meteorológica operativa. Indispensabilidad significa que el modelo numérico tiene la capacidad y el potencial para describir la evolución de la atmósfera o del sistema Tierra, punto esencial para un plan estratégico en el avance meteorológico. Pero inexactitud e insuficiencia indican que los productos directamente obtenidos de la predicción numérica del tiempo (PNT) contienen incertidumbres. Por lo tanto, las mejoras deberían centrarse en minimizar las incertidumbres inevitables. La inexactitud exige que en los centros meteorológicos se lleven a cabo esfuerzos para mejorar su precisión. La insuficiencia pone de manifiesto que se necesita más investigación para la modelización del sistema Tierra.

Una nueva era para la predicción

Desde finales del siglo XX, la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NAS) ha estudiado la forma en que los Servicios Meteorológicos Nacionales pueden mejorar de manera continuada los pronósticos meteorológicos y los productos y servicios afines (National Research Council, 1999). En una hoja de ruta para el futuro, la NAS hizo hincapié en la necesidad y en las oportunidades para continuar con la modernización. Un documento reciente (Benjamin y otros, 2019) que resumía la evolución de los pronósticos en los últimos 100 años, dividiéndolos en cuatro épocas, señalaba que los próximos 30 años constituirán una nueva era. Sus características incluirán, por ejemplo, una mayor automatización en los procesos de predicción y una creciente complejidad en las escalas espacio-temporales de la predicción numérica del tiempo y el medio ambiente.

La declaración formulada en el Decimotavo Congreso Meteorológico Mundial de que la OMM ha llegado ahora a un punto de inflexión en su historia, está en consonancia con las ideas anteriores. En el Congreso se aprobó una reforma fundamental en la gobernanza para que la Organización esté más integrada y preparada para funcionar en un marco continuo del sistema Tierra en todos sus ámbitos de meteorología, clima, agua y medio ambiente. De esta manera, se producirán algunos cambios en las predicciones meteorológicas y en sus procesos relacionados.

Hace más de 100 años se analizó en profundidad si sería posible realizar pronósticos meteorológicos basados en principios científicos y matemáticos. Desde entonces, los desarrollos teóricos han permitido comprender la

1 Administración Meteorológica de China (CMA)

2 Laboratorio Estatal de Tiempo Adverso de la Academia China de Ciencias Meteorológicas

3 Centro de Formación de la CMA

dinámica atmosférica y los procesos físicos involucrados, sentando así las bases de los modelos numéricos y contribuyendo de manera significativa a la mejora de la PNT operativa. Tomando como ejemplo la evolución de los productos de reanálisis, la figura 1 muestra la precipitación del verano climático (1979-2002) obtenida de los productos del Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones y de diferentes reanálisis en Asia oriental. La precipitación a partir de datos de reanálisis puede reflejar la capacidad de los modelos numéricos para generar precipitación teniendo presente todos los procesos involucrados. Como se muestra en la figura 1, comparado con el Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones, el ERA40 (basado en un modelo publicado en 2001) subestima significativamente las precipitaciones en Asia oriental, especialmente en el sureste de China. Por el contrario, el ERAIM (modelo publicado en 2006) sobrestima las precipitaciones en el sureste de China. El ERA5 (2016) reproduce razonablemente bien el valor y el patrón de la precipitación observada. Las diferencias entre las tres generaciones de reanálisis ponen de relieve las notables mejoras de los modelos numéricos a lo largo de los años.

Cualidades intrínsecas de los modelos numéricos

Las propiedades de la triple "in" (indispensabilidad, inexactitud e insuficiencia) son inherentes a los modelos numéricos. Estos modelos son indispensables para la predicción meteorológica moderna y conformarán la piedra angular fundamental para un funcionamiento digital y continuo en el futuro. De acuerdo con el marco continuo del sistema Tierra de la nueva era, los modelos de PNT están avanzando hacia la modelización del citado sistema de forma madura.

Sin embargo, el sistema Tierra constituye una jerarquía compleja, al igual que los modelos numéricos. En consecuencia, la inexactitud y la insuficiencia del modelo numérico siempre existirán y provocarán incertidumbres a largo plazo en la PNT. Esta incertidumbre inherente determinará la dirección de desarrollo en la meteorología, así como el marco futuro de la predicción operativa.

Indispensabilidad. Como dice Charney (1951), "la atmósfera no muestra periodicidades del tipo que

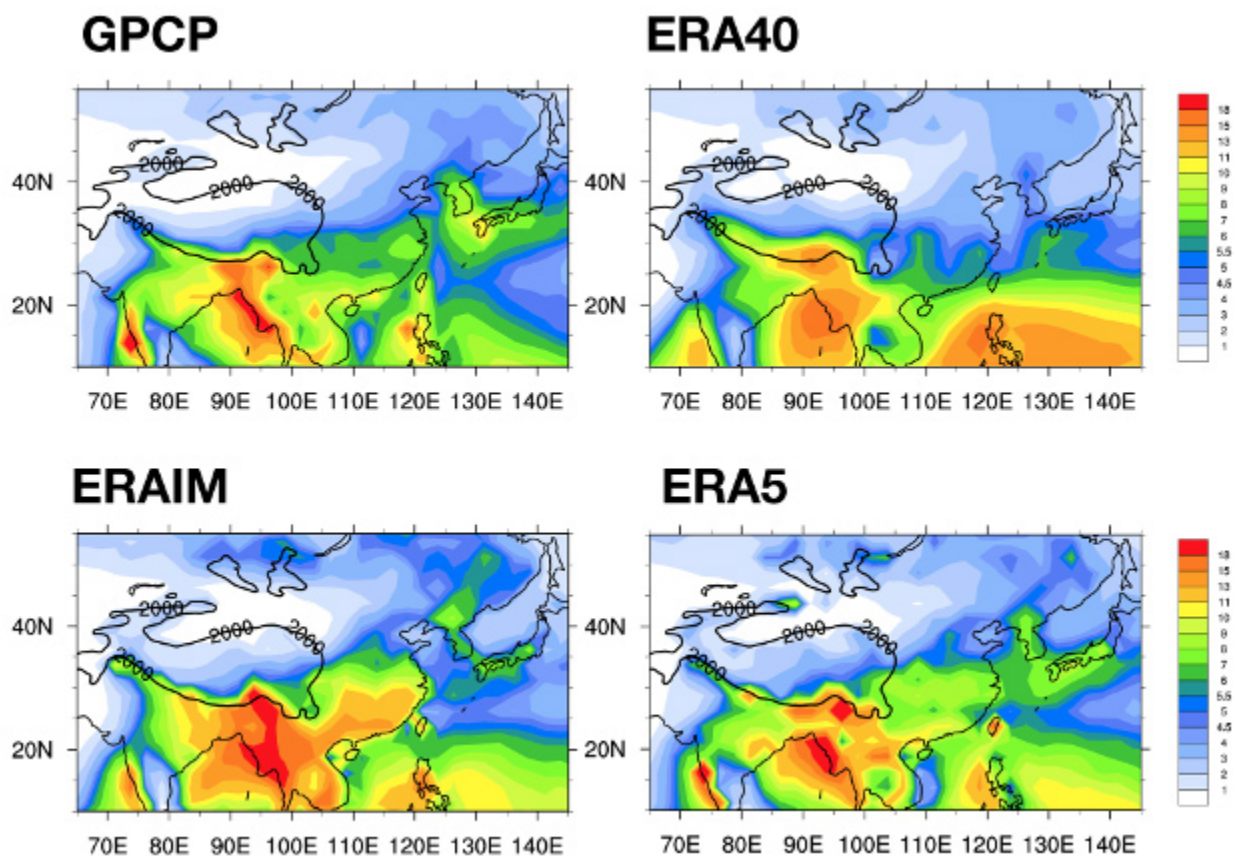


Figura 1. Precipitación del verano (junio, julio y agosto) climático (1979-2002) a partir de los productos del Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones y de diferentes reanálisis (ERA40, ERAIM y ERA5).

permitan predecir el tiempo de igual forma que las mareas". En lugar de un simple conjunto de relaciones causales, todos los fenómenos atmosféricos son el resultado de complejas influencias debido a la combinación de factores que carecen de sincronía, uniformidad y equilibrio. Debido a la abrumadora complejidad de los procesos atmosféricos, solo un modelo numérico tiene la capacidad y el potencial para comprender exhaustivamente los forzamientos no lineales en diferentes escalas y para describir la evolución de la atmósfera. A medida que la modelización numérica ha ido madurando en los últimos 30 años, la PNT, que se lleva a cabo a diario en los principales centros operativos, se ha convertido sin duda alguna en un elemento dominante en los procesos de predicción del tiempo. Por lo tanto, el carácter de indispensabilidad del modelo numérico es una característica destacada de la predicción operativa moderna.

Inexactitud. El punto de partida de un modelo numérico es una serie de leyes fundamentales que rigen la dinámica atmosférica: la segunda ley del movimiento de Newton, el primer principio de la termodinámica y la ley de conservación de la masa. Para que las variables continuas de las ecuaciones que describen las leyes fundamentales puedan almacenarse y procesarse en un ordenador es preciso discretizarlas, pero las discretizaciones espaciales y temporales pueden dar lugar a errores. En los modelos numéricos, solo se consideran explícitamente las perturbaciones mayores de una determinada escala espacial predefinida. Los efectos de los procesos de menor escala deben entonces estimarse a partir del estado del modelo de escala mayor, lo que se conoce como parametrización.

Incluso en los modelos con una resolución horizontal de varios kilómetros, muchos procesos necesitan parametrizarse: entre ellos, la microfísica de nubes, la transferencia radiativa, la turbulencia y los cúmulos de poco desarrollo. Y la parametrización siempre produce grandes sesgos. Por ejemplo, el cambio de fase en la humedad –un proceso clave en la mayoría de los fenómenos meteorológicos y climáticos– se parametriza, lo que lleva a grandes sesgos en los modelos.

Muchos procesos, como el flujo superficial, la convección asociada a cúmulos, la microfísica de nubes y la radiación, son necesarios para describir la humedad, sus cambios de fase y sus influencias. Debido a la extrema complejidad y al conocimiento limitado, los procesos relativos a la humedad, como la nubosidad y la retroalimentación, siguen siendo la mayor fuente de incertidumbre en los modelos. Además del modelo en sí

mismo, su estado inicial también contiene sesgos provenientes de los datos observacionales. En resumen, la inexactitud está enraizada en los modelos numéricos y en la predicción numérica del tiempo.

Insuficiencia. La atmósfera está muy influida por los otros componentes del sistema Tierra. Los océanos, la criosfera, la superficie terrestre, la hidrología, la composición y los ecosistemas tienen un impacto importante en la predicción meteorológica. Algunas interacciones ambientales han sido incluidas en los sistemas de predicción numérica desde hace décadas. Con los avances registrados en los modelos atmosféricos, cada vez se han ido implementando más procesos interactivos entre las diferentes partes del sistema Tierra, y se han resuelto más detalles de estos procesos.

El modelo del sistema Tierra es un intento de agrupar todo el conocimiento disponible sobre el mismo, que involucra a la atmósfera, la biosfera, la geosfera, la hidrosfera y la criosfera, junto con todas las interconexiones y retroalimentaciones que tienen lugar entre ellas. Sin embargo, la comprensión actual de dichas interacciones dista mucho de ser suficiente. Muchos procesos importantes siguen faltando en los modelos. Además, a medida que estos mejoran, aumenta la exigencia para incluir nuevas interacciones. Por ejemplo, tras alcanzar resoluciones de escala convectiva, es cada vez más importante incluir una representación realista de los efectos de las grandes ciudades para obtener predicciones fiables de la temperatura y las precipitaciones. El carácter de insuficiencia o de falta de completitud de los modelos numéricos tiene sus raíces en la extrema complejidad de la evolución del sistema Tierra en sus diversas escalas.

Nuevo marco para la predicción meteorológica operativa

El marco para la predicción meteorológica operativa debería actualizarse y redefinirse. Dado su carácter indispensable, el modelo numérico del sistema Tierra será sin duda el núcleo de la predicción operativa en los tiempos venideros. La única manera de superar su inexactitud y su carácter incompleto será mediante programas continuos de investigación y desarrollo. Las propiedades de la triple "in" de los modelos numéricos ponen de relieve las características de la investigación en este proyecto meteorológico. Como se ilustra en la figura 2, el nuevo marco para la predicción operativa se puede dividir en cuatro secciones.

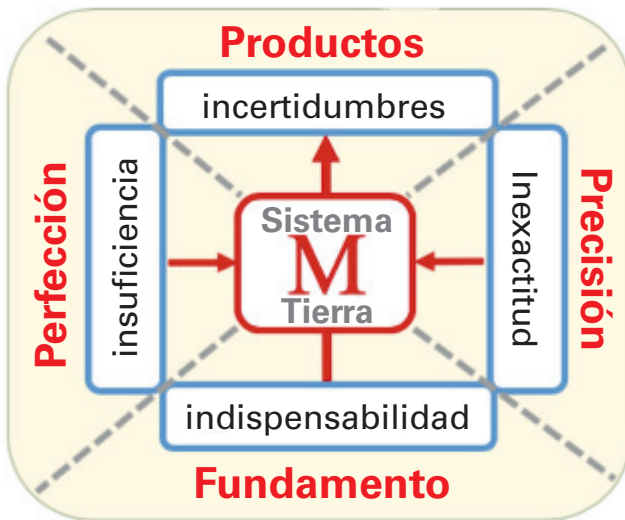


Figura 2. Nuevo marco de predicción meteorológica operativa.

Diseño estratégico: hacia la modelización de un marco perfecto y continuo del sistema Tierra. En el sector inferior de la figura 2, el carácter indispensable del modelo numérico determina el diseño estratégico de las futuras predicciones operativas: crear un marco fiable para la modelización continua del sistema Tierra y aprovechar al máximo los resultados del modelo de manera objetiva. Este es el principio fundamental para el diseño de la investigación científica, el desarrollo técnico y la operatividad. Los sectores derecho e izquierdo de la figura 2 muestran acciones para mejorar los actuales modelos numéricos, en busca de la precisión y perfección. El sector superior representa los esfuerzos para optimizar los resultados de la PNT reconociendo su incertidumbre.

Creación de capacidades para mejorar la precisión de los modelos. El sector derecho de la figura 2 muestra la necesidad de mejorar la precisión de los modelos y de las expresiones matemáticas y técnicas numéricas en orden a una mayor exactitud y eficiencia. Se debería aumentar la resolución espacio-temporal, llevar a cabo estudios meteorológicos fundamentales sobre los procesos físicos y químicos, y desarrollar métodos de asimilación de datos más fiables. Considerando la nueva demanda de predicción continua, se debería diseñar y llevar a cabo una evaluación innovadora y refinada que permita comprender y rastrear el origen de los sesgos en los modelos. De la misma manera, para entender los procesos dinámicos y físicos cruciales en la atmósfera y mejorar el funcionamiento de los modelos, deberían diseñarse y realizarse más campañas sobre el terreno. Por ejemplo, en China han tenido lugar el Tercer Experimento Científico Atmosférico de la Meseta Tibetana

(TIPEX-III) (Zhao y otros, 2018) y el Experimento de Lluvias Monzónicas del Sur de China (SCMREX) (Luo y otros, 2017).

Debería actualizarse el sistema operativo de la PNT para mejorar su precisión. Por ejemplo, en la predicción a corto plazo, deberían utilizarse modelos regionales de alta resolución con procesos mesoescalares explícitamente resueltos. En esta escala espacio-temporal, el foco debe centrarse en el ciclo de actualización rápida y en la participación de forzamientos de pequeña escala como los límites urbanos o montañosos complejos.

Creación de capacidades para completar los componentes del sistema Tierra. El sector izquierdo de la figura 2 muestra las necesidades para completar aún más los componentes del sistema Tierra. Deberían analizarse las interacciones entre los distintos subsistemas. Habría que explorar un método para acoplar eficazmente todos los componentes así como diseñar una asimilación acoplada que combine de manera óptima las observaciones disponibles en todo el sistema Tierra. Para hacer progresar los conocimientos científicos sobre el clima y el sistema Tierra, deberían utilizarse y aplicarse observaciones a largo plazo, continuas, estereoscópicas e integradas de los principales componentes (atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera) y las interacciones entre ellos.

Para llevar a cabo un experimento piloto en los Observatorios Climáticos Nacionales, desde 2006 la Administración Meteorológica de China (CMA) ha seleccionado cinco observatorios con “buena representatividad climática, serie histórica de datos completa y condiciones básicas consolidadas en las estaciones de observación”. En 2019, la CMA puso en marcha 24 Observatorios Climáticos Nacionales para realizar observaciones continuas del sistema Tierra. Estos 24 observatorios cubren superficies terrestres típicas como praderas, bosques, tierras agrícolas, montañas, humedales, desiertos, zonas marinas, lagos y áreas urbanas, y representan las características meteorológicas y climáticas de 16 zonas clave del sistema climático de China. A largo plazo estas observaciones fomentarán estudios sobre los intercambios de masa, humedad, energía y las interacciones entre los distintos sistemas terrestres, y también proporcionarán medidas fiables para la evaluación de un sistema de modelo acoplado.

El modelo de sistema Tierra “completo” debería utilizarse para realizar pronósticos meteorológicos y ambientales completos, continuos y sin fisuras. A medida que aumente la resolución del modelo, se resolverán

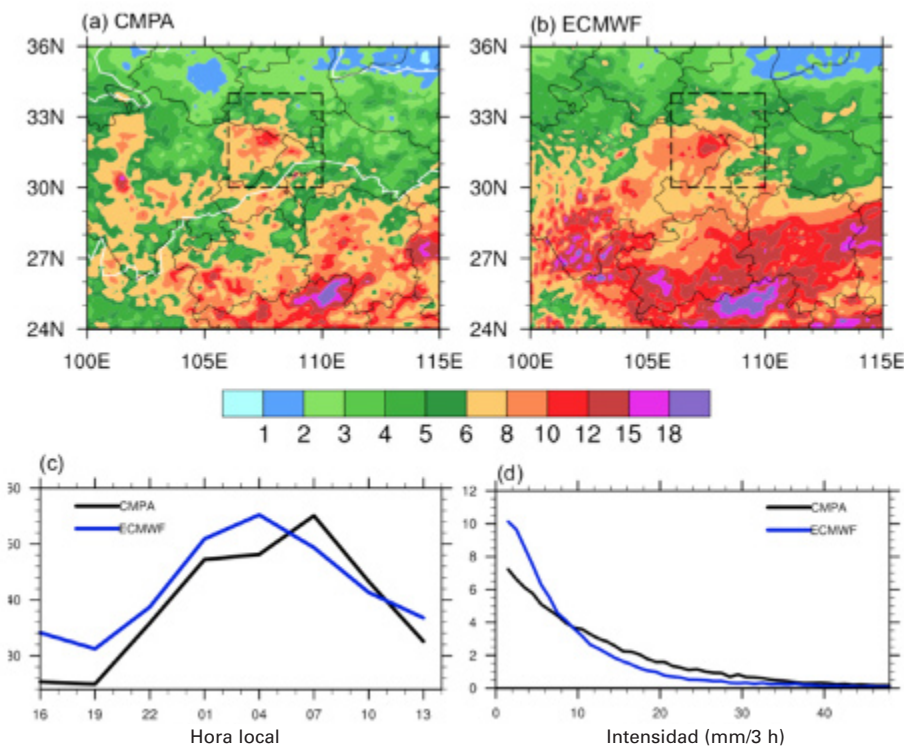


Figura 3. a) Promedio observado y b) predicción de 12 a 36 horas con el modelo de Predicción Integrada del ECMWF de la precipitación media diaria (unidades: mm/d) promediada sobre el oeste de China de mayo a junio de 2019. La línea negra discontinua marca la región objetivo sobre el borde norte de la cuenca de Sichuan. c) Curvas diurnas medias regionales de las lluvias acumuladas de episodios de precipitaciones intensas (con una intensidad en horas punta superior a 5 mm/3 h) en las observaciones (línea negra) y en el pronóstico del modelo (línea azul). d) Porcentaje medio regional de la precipitación total distribuido con diferente intensidad horaria para la observación (línea negra) y el pronóstico del modelo (línea azul).

más características del océano, el hielo marino y la superficie terrestre, y debería reproducirse adecuadamente una gama mucho mayor de procesos químicos y biológicos.

Operación en tiempo real: comprender las incertidumbres en los productos y diseñar algoritmos objetivos y correcciones. La predicción operativa en tiempo real se centrará en las incertidumbres del sistema de predicción numérica, correspondiente al sector superior de la figura 2. En primer lugar, es necesario mejorar la comprensión científica de las características del continuo meteorológico-climático con gran detalle. En segundo lugar, es imprescindible diseñar criterios precisos para evaluar el comportamiento básico de los modelos y sus procesos críticos para así comprender las incertidumbres. En tercer lugar, sobre la base de una evaluación en profundidad, es necesario hacer un buen uso de los macrodatos e innovar en técnicas de automatización inteligente que corrijan objetivamente los productos de la predicción numérica. Un predictor puede minimizar las incertidumbres de los actuales modelos numéricos mediante la validación y corrección de última generación y crear una predicción de gran calidad.

En la figura 3 se muestra como ejemplo el pronóstico de un episodio de lluvias intensas en el borde norte de

la cuenca de Sichuan (en el suroeste de China). La comparación entre la distribución diaria de precipitación en los meses previos al verano (mayo a junio) a partir del Análisis de precipitación combinada de China (CMPA) (figura 3a) y el pronóstico de 24 horas (12 a 36 h) del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF) (figura 3b) revela que el pronóstico del modelo generalmente reproduce los centros de precipitaciones intensas del suroeste de China. La situación y magnitud de dichos centros son comparables con los de la región objetivo (marcada por líneas de puntos negros en la figura 3).

Sin embargo, cuando se consideran las características de las precipitaciones en periodos inferiores a un día, aparecen sesgos en los pronósticos del modelo. Para la variación diurna de las precipitaciones intensas (con intensidad en las horas punta superior a 5 mm/3 h), la hora punta en el modelo se sitúa 3 h antes que la observada (figura 3c). Para la distribución de la cantidad de lluvia con diferentes intensidades, el modelo tiende a sobrestimar (subestimar) la cantidad acumulada de lluvia débil (fuerte) (figura 3d). Sobre la base del reconocimiento de los sesgos del modelo, se pueden establecer relaciones a escalas inferiores a la diaria (ciclo diario y estructura de la intensidad) entre los resultados del modelo y la observación. Al utilizar estas relaciones,

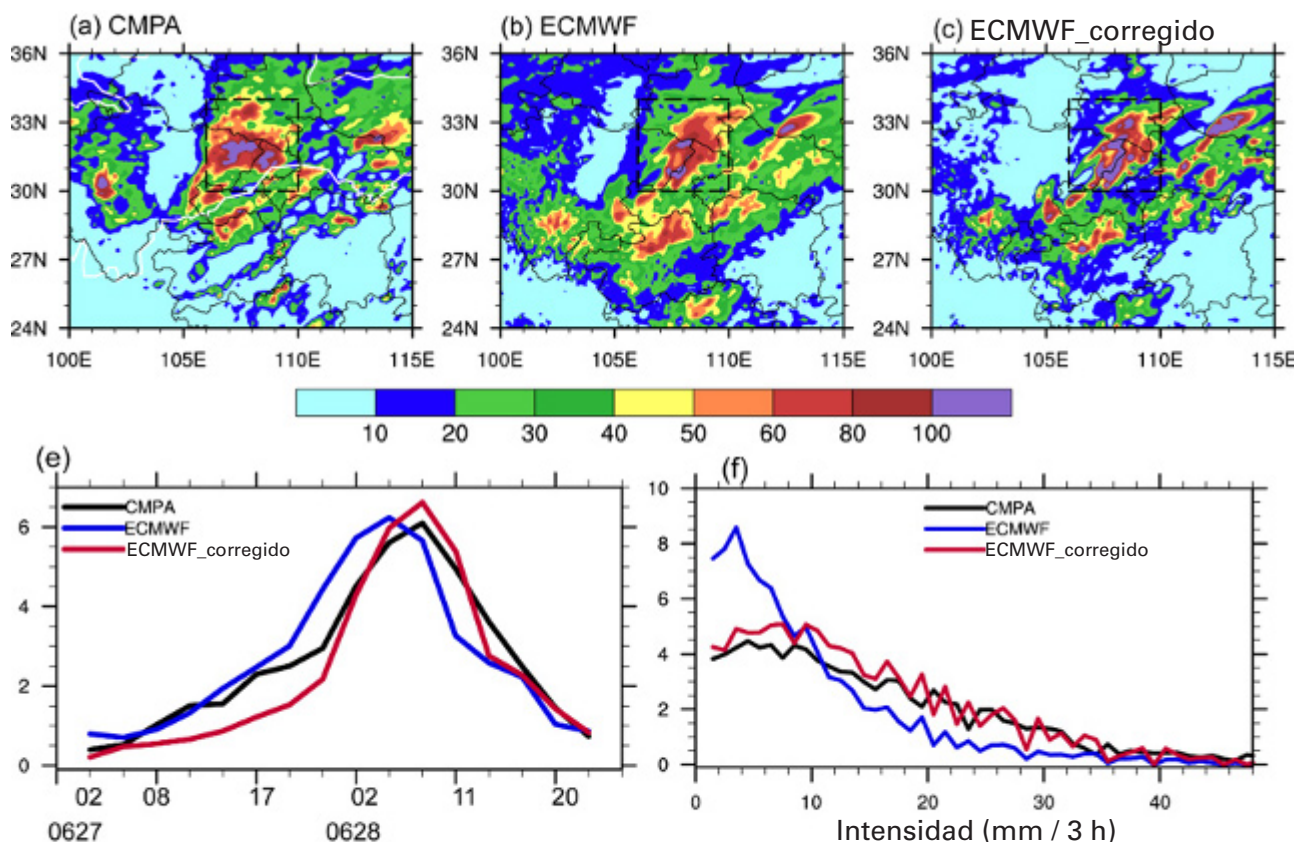


Figura 4. Distribución de la lluvia acumulada en el episodio de precipitaciones torrenciales desde las 02.00 hora local del 27 de junio de 2019 hasta las 23.00 hora local del 28 de junio de 2019: a) observada, b) prevista por el modelo y c) salidas del modelo corregidas. e) Evolución temporal del promedio regional de precipitaciones durante el episodio de lluvias intensas a partir de la observación (línea negra), el pronóstico del ECMWF (línea azul) y el pronóstico del ECMWF después de la corrección (línea roja). f) Igual que e), pero para el promedio regional acumulado de precipitaciones con diferente intensidad horaria.

la corrección de los resultados del modelo para un episodio específico de fuertes lluvias se puede hacer en dos pasos: primero, la evolución temporal se pospone 3 horas desde el inicio del episodio de fuertes lluvias a las 02.00 hora local del 27 de junio de 2019; segundo, se ajusta la distribución de la cantidad de lluvia con diferente intensidad para cada salida prevista cada 3 horas del modelo.

La figura 4 compara la predicción original del modelo del ECMWF con los resultados corregidos por las observaciones para un episodio de lluvias fuertes en la región objetivo. Puede observarse que, al reducirse la parte de precipitaciones débiles, se eliminan parcialmente estas de los alrededores del núcleo de precipitaciones intensas, y las precipitaciones se intensifican en los grandes núcleos. A una escala temporal inferior a la diaria también se aprecia que el momento del pico máximo corregido es coherente con lo observado (figura 4e). La

distribución regional promediada de las precipitaciones con diferente intensidad (figura 4f) después de la corrección (línea roja) es más realista en comparación con los resultados originales del modelo (línea azul).

El camino a seguir

A partir de un profundo conocimiento de las cualidades intrínsecas de los modelos numéricos (la triple "in"), se propone una estrategia para la predicción operativa del tiempo ante la nueva era que se avecina, en la que la indispensabilidad de los modelos numéricos ha quedado firmemente establecida.

La superación de las incertidumbres intrínsecas del modelo implicaría seguir tres direcciones. Para reducir la inexactitud, la precisión de los modelos debería mejorarse según los principales sesgos que presenten las

simulaciones y predicciones. Para superar la insuficiencia (es decir, el carácter incompleto del modelo), deberían reconocerse y entenderse los nuevos procesos fundamentales del sistema climático o terrestre, y ser incluidos adecuadamente en los modelos. Para aprovechar al máximo unos modelos numéricos actualizados e indispensables, sus resultados deberían evaluarse a fondo y corregirse de acuerdo con las desviaciones inherentes a cada caso. Las tres direcciones están estrechamente relacionadas y tienen un solo núcleo de investigación, que es clave para impulsar el desarrollo de la predicción operativa.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a Wenjian ZHANG, Paolo Ruti, Heng ZHOU, Xianghua XU y Xiaodan NA por sus valiosos comentarios sobre el manuscrito.

Referencias

Benjamin, S. G., J. M. Brown, G. Brunet, P. Lynch, K. Saito y T. W. Schlatter, 2019. 100 years of progress in forecasting

and NWP applications. En: *A Century of Progress in Atmospheric and Related Sciences: Celebrating the American Meteorological Society Centennial, Meteorological Monographs*, Vol. 59. Boston, American Meteorological Society.

Charney, J. G., 1951. Dynamic forecasting by numerical process. En: *Compendium of Meteorology* (T. F. Malone, ed.). Boston, American Meteorological Society.

Luo, Y., R. Zhang, Q. Wan y otros, 2017. The Southern China Monsoon Rainfall Experiment (SCMREX). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(5): 999-1013.

National Research Council, 1999. *A Vision for the National Weather Service: Road Map for the Future*. National Academies Press.

Zhao, P., X. Xu, F. Chen y otros, 2018. The third atmospheric scientific experiment for understanding the Earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(4): 757-776.