

EL SISTEMA DE PREDICCIÓN ANALÓGICA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL INM (PAP-INM)

Alberto Fernández
José del Hoyo
Candelas Peral
Antonio Mestre

Servicio de Aplicaciones Meteorológicas. INM

RESUMEN

La predicción probabilista de la precipitación constituye una herramienta muy valiosa para la toma de decisiones en diferentes sectores, en particular los relacionados con la energía, la gestión de los recursos hídricos, la agricultura, la silvicultura, y el propio INM. Por ello, y dado que la utilización de las salidas directas de precipitación de los modelos numéricos sigue planteando ciertos problemas para su uso cuantitativo, se decidió abordar el desarrollo de un sistema de predicción probabilista cuantitativa de la precipitación, puntual y areal, a partir de la reinterpretación estadística, mediante metodología analógica, de las salidas del modelo de predicción del Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio. Los resultados de la verificación realizada durante los 2 últimos años indican en general un comportamiento muy aceptable de las predicciones, obteniéndose valores positivos del Brier Skill Score frente a la climatología muestral en todos los casos, incluso para el rango de precipitaciones superiores a 20 mm en 24 h.

1. Introducción

El sistema de predicción analógica de la precipitación PAP-INM surge por la necesidad de que el INM dispusiera de un sistema de predicción de la precipitación de calidad, con el fin de atender demandas tanto de usuarios externos como internos al propio Instituto, ya que en la actualidad las salidas directas de precipitación que dan los modelos de predicción numérica no son todo lo fiables que sería necesario. Con este fin, se abordó el desarrollo de un sistema de predicción probabilista cuantitativa de la precipitación, mediante la reinterpretación estadística de las salidas del modelo del Centro Europeo, utilizando técnicas analógicas. El núcleo del sistema fue desarrollado por la empresa SMA, y dirigido desde el Instituto a través del Área de Predicción y el Servicio de Aplicaciones Meteorológicas. La Sección de Aplicaciones Especiales se encargó de poner en funcionamiento el sistema, automatizando todo el proceso y diseñando una serie de salidas en forma de mapas y tablas que se muestran diariamente en la página *web* del INM, con el fin de que los usuarios tengan un acceso ágil y cómodo a las salidas del Sistema, y también se ha diseñado y puesto en operación un sistema de verificación objetiva que genera informes mensuales que se presentan asimismo en la *web* interna del INM. Existe una nota técnica del Servicio de Aplicaciones Meteorológicas (<http://www0.inm.es/wwl/publicaciones/pap-inm/papinm.html>), que puede consultarse también en la *intranet* del Instituto, donde se describe en detalle el modelo analógico desarrollado y todo el sistema PAP-INM, así como su verificación.

2. Descripción general del modelo

Los métodos analógicos se basan en la hipótesis de que configuraciones meteorológicas similares dan lugar a fenómenos meteorológicos similares. Su aplicación se lleva a cabo mediante la elección de una medida de similitud óptima que permita encontrar la situación más parecida a la situación problema, de entre todas las situaciones de una base de datos de referencia. Es necesario definir, pues, las variables o campos predictores que mejor caractericen la situación problema para predecir la variable en cuestión, así como la formulación matemática de la medida de similitud. Y es necesario contar también con una base de datos histórica de la variable a predecir, que en este caso es la precipitación acumulada en el día pluviométrico.

El sistema PAP-INM predice la precipitación en términos de probabilidad. Estima las probabilidades de que la precipitación totalizada en el día pluviométrico sea superior o igual a determinados umbrales: 0,5 mm, 2 mm, 10 mm y 20 mm. Las predicciones se realizan para 88 observatorios sinópticos de la Península y Baleares y para 203 puntos de *grid* también de la Península y Baleares, para alcances hasta

D+3. (En la actualidad se está ensayando la aplicación del sistema PAP-INM a los miembros del Ensemble Prediction System con objeto de alargar el alcance de las predicciones).

El método sigue el siguiente proceso: Primero, escoge -entre todos los días pertenecientes a un banco de referencia (los reanálisis del Centro Europeo entre 1979 y 1997, del proyecto ERA 15)- los 30 días más parecidos al día problema, atendiendo a determinados campos predictores y según una cierta medida de similitud. Después, una vez determinados los 30 días más similares al día problema (los 30 análogos); para la predicción en puntos de grid, el dato de precipitación proviene de un banco de datos de precipitación reticular, y la probabilidad se calcula como la frecuencia observada en los 30 días seleccionados, ponderada según la similitud entre el análogo en cuestión y el día problema; y para la predicción en cada observatorio sinóptico, el proceso es idéntico, pero utilizando la base de datos local de observatorios sinópticos.

La base de datos reticular se ha construido utilizando 7.948 observatorios pluviométricos (número de observatorios con al menos 1 dato digitalizado en el período 61-97). Los datos fueron sometidos a diferentes filtros, para garantizar su calidad y detectar posibles errores, y homogeneizados. Para el cálculo de la precipitación en cada punto de grid se realizó un promedio ponderado por el inverso de la distancia de los datos de los observatorios cercanos (al menos 3 en un entorno de 57 km). Para la base de datos synop local, de los 96 observatorios sinópticos disponibles, se excluyeron 8 por escasez de dato grabado. Esta base de datos no está homogeneizada completamente y contiene lagunas, ya que 76 de los 88 observatorios utilizados no fueron susceptibles de homogeneización debido a que las condiciones que se impusieron para que las series pudieran ser homogeneizables fueron muy restrictivas.

3. Los campos predictores

Como campos predictores se han utilizado, por una parte los geopotenciales de 500 y de 1000 hPa, y por otra parte la humedad relativa media de la capa comprendida entre los 1000 y los 700 mb, por considerar que dichos campos contienen gran parte de la información que afecta a la variable precipitación. Los geopotenciales de 500 y de 1000 hPa no se utilizan directamente, sino a través de los módulos y las direcciones de los vientos geostróficos en esos niveles. Por tanto, los campos utilizados son 4: los módulos y las direcciones en 500, y los módulos y las direcciones en 1000 hPa.

En cuanto a los alcances de los campos previstos, para predecir la precipitación acumulada en el día pluviométrico, se deberían utilizar los campos más sincrónicos con el período de acumulación. Las posibilidades eran las siguientes: Utilizar sólo los campos previstos para las 12 z, utilizar sólo los campos previstos para las 24, utilizar los campos medios de ambas, o utilizar simultáneamente los campos de las 12 UTC y las 24 UTC. Los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizaban los campos de ambas horas, bien como promedio o bien sin promediar, siendo ligeramente mejor los resultados cuando se utilizaban 8 campos sin promediar. No obstante la diferencia era poco sustancial y como el tiempo de cálculo era casi el doble se optó por utilizar los campos promedios de ambas horas.

La información de humedad relativa se introduce con posterioridad a la estratificación por vientos geostróficos en forma de una segunda estratificación. Se consideró que la precipitación diaria en un punto presentaba una relación con la humedad relativa atmosférica mucho más local, por lo que la segunda estratificación se llevó a cabo teniendo en cuenta sólo los valores en la vertical del punto de predicción.

4. La medida de similitud

La pseudodistancia euclídea entre los campos de los días i y j tiene la siguiente expresión, para el caso de módulo en 1000 hPa:

$$D_{\text{mod}1000;h}(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (\text{Mod}1000_{ik}(h) - \text{Mod}1000_{jk}(h))^2 \cdot p_k}{\sum_{k=1}^N p_k}} \quad [1]$$

Donde $Mod1000_{ik}(h)$ es el valor del módulo del viento geostrófico en 1000 hPa, del día i , en el punto de rejilla k a la hora h (para la opción escogida de utilizar los campos promedios de las 0 y las 12, h carece de sentido), y $Mod1000_{jk}$ es el valor del módulo en 1000 hPa, del día j , en el mismo punto k ; p_k es el peso asociado a ese punto k de la rejilla (en general se da más peso los puntos más próximos al punto para el que se hace la predicción). “N” es el número de puntos de la rejilla atmosférica utilizada, que son 836, y viene determinado por el dominio de trabajo (30,375° N – 54° N; 27° W – 14,625° E) y la resolución espacial (1,125° latitud-longitud), que se corresponde con la del reanálisis utilizado del Centro Europeo. Para los demás campos, las expresiones de las distancias son análogas.

Sin embargo la medida de similitud empleada no utiliza directamente las distancias euclídeas entre los campos, sino que se realiza una previa normalización de éstas expresándolas en percentiles, para poder utilizarlas en igualdad de condiciones aunque pertenezcan a diferentes campos. La estructura general de la medida de similitud empleada en la estratificación por vientos geostróficos es la siguiente:

$$\sum_{h=1}^H [w_{mod1000;h} cent_{mod1000;h} + w_{dir1000;h} cent_{dir1000;h} + w_{mod500;h} cent_{mod500;h} + w_{dir500;h} cent_{dir500;h}] \quad [2]$$

Donde cada uno de los $cent_{qh}$ es el centil en el que se encuentra la distancia entre los campos q del día problema y el día de comparación, con respecto a la población total de distancias euclídeas entre todos los campos q ; y w_{qh} es el coeficiente de ponderación que se le asigna al campo predictor “ q ” con el fin de dar más o menos peso a la dirección que a la velocidad o más o menos peso a los campos de 500 o de 1000 hPa; (H=1 si se utilizan campos de una sola hora o de la media de las 12 y las 24, y H=2 si se utilizaran campos de las 12 y las 24 sin promediar; en nuestro caso H=1 ya que se utilizan los campos promedios de las 12 y las 24).

5. El proceso de ajuste del método analógico

Para realizar el ajuste de los distintos coeficientes que intervienen en la medida de similitud y de todo el método en general, los índices de calidad empleados, durante el período de calibración 1981-1985, fueron:

$$RPS = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K (F_{ij} - X_{ij})^2}{N} \quad [3]$$

$$RPA = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K |F_{ij} - X_{ij}|}{N} \quad [4]$$

Donde, en ambos casos:

$$F_{ij} = \sum_{K=1}^j f_{ik} \quad [5]$$

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^j x_{ik} \quad [6]$$

K: número de rangos en que se divide la precipitación (en este caso, 3)

N: número de días del período de calibración (años 1981-1985, 1826 días)

f_{ik} : diagnóstico (en tanto por uno) de la probabilidad de precipitación en el rango “K”, para el día “i”.

x_{ik} : observación de la precipitación en el rango “k”, para el día “i” (1 si la precipitación observada pertenece al rango k, 0 si no pertenece a dicho rango).

Estos índices son similares al más conocido Brier Score y son función de las diferencias entre la probabilidad prevista y la observada. La probabilidad observada vale 1 cuando el suceso ocurre y 0 cuando no.

Se probaron en total 230 diferentes combinaciones de los coeficientes w y p que intervienen en la medida de similitud, es decir, 230 medidas de similitud. Para realizar el ajuste de estos coeficientes, se partió de una zonificación de la precipitación, por componentes principales, que dividía el área de estudio en 5 zonas: NW, NN, NE, SW y SE. Para cada zona se definieron 5 ventanas rectangulares diferentes que se

correspondían con 5 combinaciones de pesos "p" de los puntos de rejilla, que dan más peso a los puntos del rectángulo central y menos a los más alejados. En total 25 ventanas o combinaciones de pesos "p" para cada nivel. Del estudio de las diferentes combinaciones de estas ventanas con diferentes combinaciones de los coeficientes w que se asignan a los diferentes campos predictores, se obtuvieron la 230 medidas de similitud ensayadas.

Para cada uno de los 203 puntos de grid de superficie, se calcularon los RPA de cada una de las 230 medidas de similitud y se analizaron las 10 mejores de cada punto. Obteniéndose las siguientes conclusiones: a) Las mejores medidas para un punto suelen corresponder a ventanas atmosféricas centradas sobre el mismo. b) En numerosos puntos, las ponderaciones w en las que se daba más importancia a los campos de dirección que a los de módulo, ofrecían mejores resultados. c) Con respecto a las ponderaciones relativas de los campos en 1000 y 500, los mejores RPA se obtuvieron asociados a las medidas con relaciones 1000/500, de 5/5 y 7/3, pero los puntos en los que la mejor medida tenía la relación 3/7, no eran una minoría despreciable. Es decir, ambos campos aportan capacidad de predicción de manera importante, pudiendo considerarse el viento geostrófico en 1000 ligeramente más discriminante.

Finalmente se optó por elegir 5 medidas de similitud, de estas 230, para utilizar en el conjunto de la Península y Baleares. Para la elección de estas 5 medidas se ensayaron todas las combinaciones de las 230 medidas tomadas de n en n, realizándose cálculos para n desde 1 hasta 7. Eligiéndose en cada caso las n medidas que mejor RPA daban a nivel nacional. A partir de n=5 la mejora en el RPA se hacía muy pequeña por lo que se optó por tomar este valor como definitivo. Es decir, el sistema emplea para cada punto de grid y para cada observatorio la medida de estas cinco que mejor funciona en ese punto.

Otras pruebas realizadas, que no mejoraron los índices de calidad, fueron: a) Utilización de distintas medidas de similitud según el tipo de situación sinóptica. b) Utilización de distintas medidas en estaciones astronómicas diferentes. c) Limitación de la búsqueda de análogos en entornos de 20, 30, 45 ó 90 días alrededor del día problema. d) Limitación de la búsqueda de análogos en dos periodos: estival (con los meses de julio, agosto y septiembre) y no estival (con los 9 meses restantes). En este ensayo se consiguieron mejoras en las estaciones de invierno y primavera, pero empeoraron los resultados para los meses de verano, otoño y para el promedio anual. A la vista de estos resultados se desestimó la conveniencia de realizar estratificación estacional.

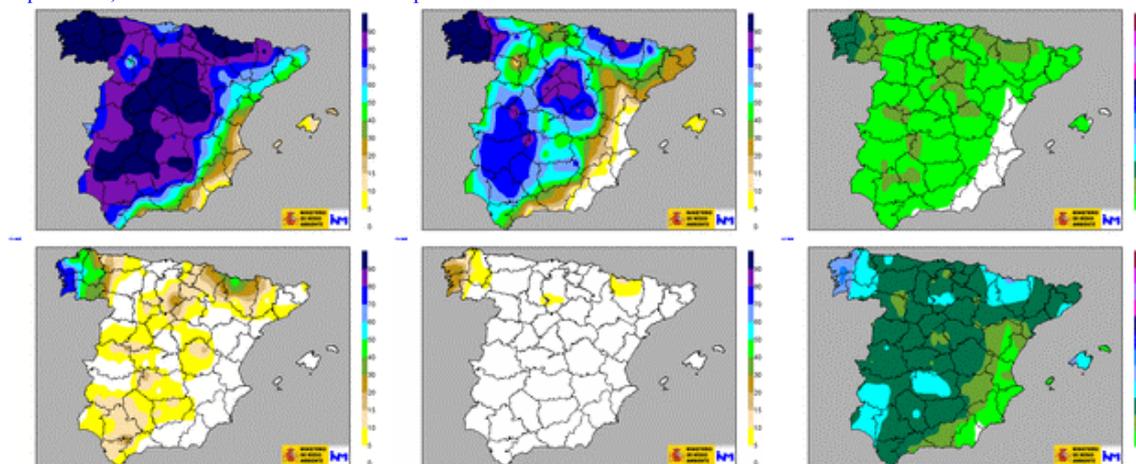
6. La estratificación por humedad relativa

Como hemos dicho anteriormente, una vez realizada la estratificación por vientos geostróficos se realiza una segunda estratificación por humedad relativa. Una vez elegidos los 100 días más parecidos en vientos geostróficos, se eligen los 30 -de esos 100- que más se parecen al día problema en humedad relativa media en niveles bajos en la vertical del punto problema. Y estos 30 se ordenan según la similitud en vientos geostróficos con el día problema. La razón de elegir los valores de 100 y 30 fue porque resultó ser la combinación de valores n1 y n2 para los que mejores RPS se obtuvieron. Para fijar estos valores óptimos se realizaron pruebas con 18 combinaciones diferentes de estos parámetros y comparando también con la sola estratificación por vientos geostróficos, resultando los mejores RPS para esta combinación de n1=100 y n2=30, y siendo mejores también que los resultados obtenidos sin utilizar la humedad relativa. Pero esta mejora era menor según avanzaba el alcance de la predicción, y podría ocurrir que a partir de D+3 o D+4 la segunda estratificación por humedad no sólo no mejore la 1ª, sino que incluso la empeore. Las dieciocho pruebas realizadas para cada alcance fueron las resultantes de combinar los valores de n1 y n2 siguientes. Para n1: 6 940, 300, 150, 100, 75 y 50. Y para n2: 10, 20 y 30.

7. Productos finales

El Sistema produce salidas en formato de texto donde para cada punto de grid y cada observatorio sinóptico el programa escribe la precipitación media ponderada de los 30 análogos, la máxima de éstos, y las probabilidades de ocurrencia; salidas en formato GRD para la representación gráfica mediante SURFER; y representaciones gráficas en forma de mapas, realizadas mediante METVIEW y MAGIC. También se presentan diariamente en las web interna (<http://www0.inm.es/www/analog.html>) y externa (<http://www.inm.es/web/infmet/predi/preci.html>) del INM, una serie de tablas y mapas con las predicciones. La figura siguiente muestra el aspecto de los mapas que aparecen en la página web.

Probabilidad de precipitación igual o superior a 0,5 mm Probabilidad de precipitación igual o superior a 2 mm Predicción de precipitación total en 24 h



Probabilidad de precipitación igual o superior a 10 mm Probabilidad de precipitación igual o superior a 20 mm Predicción de precipitación total máxima en 24 h

Figura 1: Mapas de precipitación prevista para el 6 de octubre de 2001 (alcance D+2).

8. Verificación objetiva de las predicciones

La verificación se ha realizado comparando las predicciones para observatorios sinópticos en el día *pluvio*, con las observaciones de 06 a 06 UTC obtenidas de los partes *synop*. La comparación se ha hecho conjuntamente para todo el ámbito nacional, y para cada uno de los alcances D+1 y D+2. El período de verificación abarca desde el 1 de octubre de 1999 hasta el 30 de setiembre de 2001. Las figuras siguientes muestran diagramas de fiabilidad correspondientes a las clases de precipitación superior a 0,5 y 20 mm.

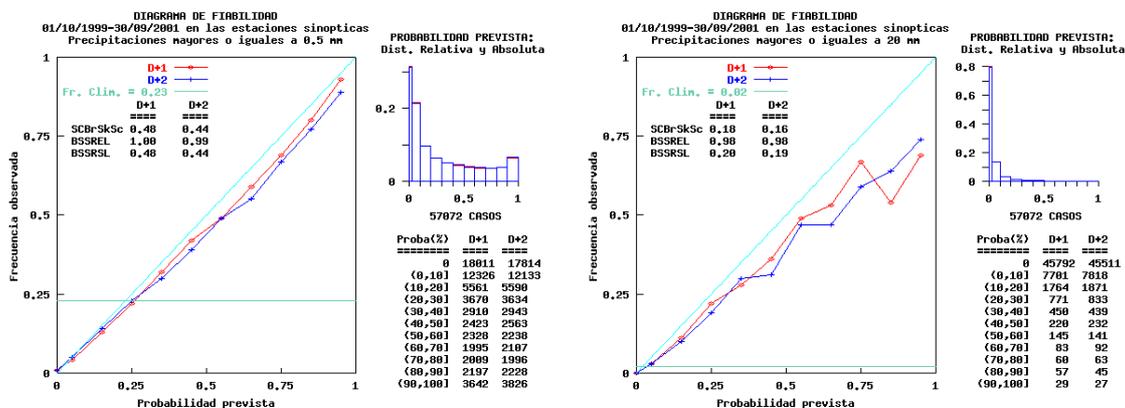


Figura 2: Diagramas de fiabilidad correspondientes a las predicciones probabilistas de precipitación superior a 0,5 y 20 mm, para el período del 1 de octubre de 1999 al 30 de setiembre de 2001.

Los gráficos muestran buena fiabilidad, ya que las predicciones realizadas con una determinada probabilidad se corresponden, con frecuencias observadas muy parecidas; existiendo una ligera sobrestimación de la probabilidad de precipitación, que en general no es superior al 5%. La menor fiabilidad que aparece en el extremo superior de la gráfica de la derecha se debe al escaso número sucesos en los intervalos de probabilidad superiores. Muestran también buena resolución. Es decir, las predicciones realizadas con probabilidades distintas van seguidas de frecuencias de observación distintas, y estas frecuencias son, a su vez, claramente distintas de la frecuencia climatológica muestral, representada por la línea verde. La definición o ambigüedad de las predicciones se deduce del estudio de las distribuciones de frecuencias de las probabilidades previstas (zona derecha de los gráficos). Atendiendo al léxico de términos meteorológicos del INM, que considera como sí previstas las predicciones cuya probabilidad es superior al 70% y no previstas aquellas cuya probabilidad es inferior al 10%, las predicciones han sido definidas un 67% de las veces, para las precipitaciones $\geq 0,5$ mm, y un 94%, para las ≥ 20 mm. El Brier Score se ha empleado en la verificación como indicador numérico de la

calidad de la predicción. Este índice integra la fiabilidad y la resolución, y es una medida del error cuadrático medio de las probabilidades previstas. Viene definido como:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_i (Ppr_i - Pob_i)^2 \quad [7],$$

donde Ppr_i es la probabilidad prevista del suceso i , y Pob_i es la probabilidad correspondiente a una predicción perfecta: vale 1 si el suceso i ocurre y 0 si no ocurre. El Brier Score, los índices derivados de su descomposición y sus Skill Scores respecto a la climatología muestral (Murphy, 1973) son calculados sistemáticamente para evaluar la calidad de las predicciones. En los gráficos de la figura 2 aparecen los valores (SCBrSkSc) del skill score del Brier de la predicción analógica relativos al Brier de la predicción realizada mediante la climatología muestral, que muestran una apreciable mejora de aquella sobre ésta, así como las componentes de fiabilidad (BSSREL) y resolución (BSSRSL) del Brier Skill Score. Los valores absolutos de los índices Brier para el intervalo de precipitación $\geq 0,5$ mm son de 0,09 para D+1 y de 0,10 para D+2. La calidad de las predicciones a D+2 es sólo ligeramente inferior a la correspondiente a D+1. Las curvas ROC (Relative Operation Characteristic) se obtienen también sistemáticamente. En estas curvas se representan las proporciones de aciertos y de falsas alarmas correspondientes a la categorización de las predicciones como seguras cuando se efectúan con probabilidad superior a determinados umbrales (entre 0 y 90 % a intervalos de 10 en 10). Estas curvas permiten categorizar las predicciones en función de las necesidades de cada usuario en relación con los umbrales de proporción de aciertos o de falsas alarmas requeridos. El valor del área encerrada bajo la curva ROC es otro indicador de la calidad de la predicción. Este valor es, para el caso de precipitaciones $\geq 0,5$ mm, de 0,93 para las predicciones a D+1 y de 0,91 para las predicciones a D+2. Son valores próximos a 1, que confirman la buena calidad del sistema de predicción. La predicción de tipo determinista realizada con la media de los análogos es también objeto de verificación sistemática. El error absoluto medio correspondiente a las predicciones de precipitación mayor o igual a 0,1 mm, a D+1, es de 2,6 mm. Este valor es de 0,6 para predicciones en el intervalo de 0,1 a 1 mm, 3,4 para el intervalo entre 1 y 10 mm, 9,0 para el intervalo entre 10 y 20 mm y 14,5 para las predicciones mayores o iguales a 20 mm. Los valores para D+2 son ligeramente superiores. Los skill scores del error absoluto medio de la predicción determinista frente al de la predicción de la persistencia, para todos los intervalos y alcances, son positivos. La distribución de errores de la predicción realizada con la media muestra una clara tendencia a sobrestimar la precipitación: el 80% de los casos en que se prevé precipitación igual o superior a 0,1 mm, la cantidad prevista es superior a la observada. Por otra parte, el 84% de las veces en que el sistema predice cantidades entre 0,1 y 1 mm la observación correspondiente es 0 mm; este porcentaje de predicciones de precipitación seguidas de ausencia de precipitación, es del 38% para predicciones entre 1 y 10 mm, del 6% para predicciones entre 10 y 20 mm e inferior al 3 % para predicciones superiores a 20 mm. Los valores son similares para D+1 y para D+2. Los detalles de los resultados de la verificación, que se actualizan mensualmente, pueden consultarse en: <http://www0.inm.es/wwl/analogos/veri/html/verifica1.html>.

9. Conclusiones

El Sistema PAP-INM es un sistema de predicción probabilista cuantitativa de la precipitación que presenta buena fiabilidad y resolución, y un suficiente grado de definición (no ambigüedad). Además, permite realizar una categorización de las predicciones probabilistas a la medida de cada usuario, a partir del estudio de los resultados de las curvas ROC. Los resultados de los índices Brier y de las áreas encerradas bajo las curvas ROC, confirman la calidad del método. Del estudio de los errores de la predicción realizada con la media de los análogos, se deduce que estos valores medios no deberían utilizarse directamente como una predicción determinista, sino sólo como un elemento más de información, complementario de la predicción probabilista, teniendo en cuenta sus errores y distribución. Los máximos de precipitación previstos para cada observatorio o punto de rejilla proporcionan una indicación bastante acertada del umbral superior de precipitación prevista. Esta es una apreciación subjetiva que se desprende del seguimiento que hemos realizado del sistema durante los dos últimos años. La aparición de valores elevados de estos máximos alerta de que pueden ocurrir cantidades de precipitación importantes, teniendo en cuenta además que, en los puntos de rejilla, estos máximos pueden estar bastante suavizados por corresponder a un promedio de varios observatorios próximos. En resumen, el sistema PAP-INM se comporta como un buen sistema de predicción probabilista cuantitativa de la precipitación, que puede resultar de gran utilidad para la predicción operativa.