

EVALUACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE RACHAS DE VIENTO

José María Vindel⁽¹⁾, Javier Calvo⁽²⁾, José del Hoyo⁽³⁾

⁽¹⁾ Servicio de Aplicaciones Meteorológicas, jmvindel@inm.es

⁽²⁾ Servicio de Modelización Numérica del Tiempo, j.calvo@inm.es

⁽³⁾ Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción, jdelhoyo@inm.es

Instituto Nacional de Meteorología, c/ Leonardo Prieto Castro, 8, 28071 Madrid

1. Introducción

Según convenio de colaboración firmado entre el INM y el organismo ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias), el primero suministra al segundo previsiones de viento y rachas, cuatro veces al día, a lo largo de las líneas ferroviarias de alta velocidad (LAV), a intervalos de 5 km y de hora en hora para los alcances H+6 hasta H+30.

Los vientos proporcionados se toman de las salidas directas del modelo Hirlam 0.05, las cuales son interpoladas, por el inverso de la distancia al cuadrado, a los puntos de las LAV.

En cuanto a las rachas, dado que el Hirlam no proporciona salidas para ellas, su estimación se realiza según procedimiento *ad hoc* establecido en el INM, que se describe en el epígrafe 2.

Mensualmente el INM elabora un breve informe de verificación para ADIF, en el que se presentan los errores y sesgos de las predicciones de viento y rachas del mes correspondiente, para el conjunto de una serie de observatorios próximos a las líneas de alta velocidad. Las figuras 1 y 2 son una muestra de las gráficas de verificación que se presentan en estos informes.

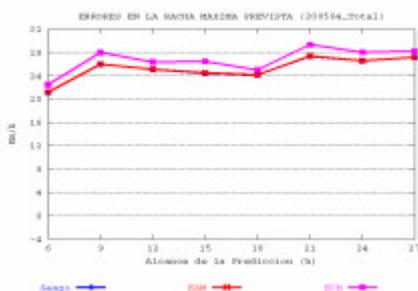


Fig.1 Errores y sesgo de los valores previstos como límite superior de racha máxima, respecto a las rachas máximas observadas, en abril del 2005.

En este estudio comparamos distintos métodos de estimación de rachas, no solo para mejorar las predicciones suministradas a ADIF sino también

para incluirlos –los que se consideren más adecuados- en el postproceso Hirlam y para su utilización en otras aplicaciones. En este sentido, hemos comparado además, previamente, los vientos medios previstos por las versiones 0.05 y 0.16 del modelo Hirlam. En la sección 2 describimos los distintos métodos utilizados, en las secciones 3 y 4 presentamos los resultados de la verificación frente a observaciones del viento medio y las rachas, y en la sección 5 incluimos las conclusiones más relevantes de este trabajo.

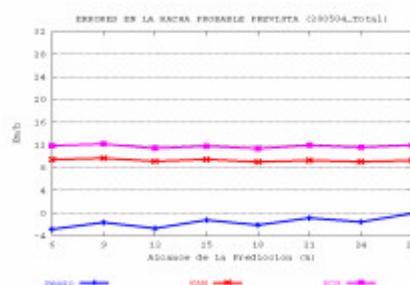


Fig.2 Errores y sesgo en la predicción del valor de racha máxima considerado como más probable, en abril del 2005.

2. Métodos de estimación de rachas

2.1 Método INM

Se utiliza la siguiente regla práctica para la estimación del valor más probable de la racha:

$$INM = \min(A * V_{10m}, V_{925}, V_{850}) \quad (1)$$

Siendo V_{10m} el viento medio a 10 metros previsto por el modelo, V_{925} a 925 hPa y V_{850} a 850 hPa. El coeficiente $A=1.73$ para $V_{10m} < 40$ km/h y $A=2$ para vientos medios mayores. EL nivel de 925 hPa sólo se utiliza en los puntos en que queda por encima de la superficie de acuerdo con la orografía del modelo.

Se estima como umbral máximo posible de las rachas:

$$INM \max = \max(A * V_{10m}, V_{925}, V_{850}) \quad (2)$$

Se considera que tanto la racha más probable como el umbral máximo no pueden ser menores que V_{10m} ni mayores que $4 \cdot V_{10m}$. En las estimaciones suministradas actualmente a las líneas de alta velocidad, sólo se calculan las rachas para vientos medios previstos a 10 m por encima de 20 km/h, y el máximo de rachas por encima de 40 km/h de viento medio.

2.2 Método KNMI

Se utiliza uno de los algoritmos utilizados por el servicio meteorológico holandés para la estimación de las rachas turbulentas (Código proporcionado por Ben W. Schreur)

$$KNMI = f(TKE_n, V_{10m}) \quad (3)$$

Donde las rachas se hacen depender de la energía cinética turbulenta (TKE) en el primer nivel del modelo y el viento medio a 10 m. La función trata de tener en cuenta los distintos intervalos de muestreo de las observaciones y el modelo.

2.3 Método DWD

Basado en un método utilizado por el servicio meteorológico alemán

$$DWD = V_n + a u_* \quad (4)$$

Siendo V_n el viento en el primer nivel del modelo, a una constante y u_* la velocidad de fricción relacionada con el flujo de momento en superficie

2.4 Método ECMWF

Una descripción del método de estimación de rachas del modelo ECMWF puede encontrarse (Ecmwf, 2004).

$$ECMWF = V_{10m} + c_u \left(\frac{z_i}{L} \right) S_u(z_0) u_* \quad (5)$$

El algoritmo es similar a (3) pero se incluye además el efecto de la estabilidad, z_i/L y se trata de corregir la influencia de los flujos de momento muy altos con orografía, introduciendo la rugosidad superficial, z_0 .

2.5 Método Brasseur

Se considera que las rachas se originan por el flujo hacia la superficie procedente de cualquier nivel dentro de la capa límite turbulenta que satisfaga que la TKE media es mayor a la flotabilidad en la capa (Brasseur, 2001). Las rachas se estiman como el viento máximo entre todos los niveles satisfaciendo la condición (6).

$$\frac{1}{z_p} \int_0^{z_p} TKE(p) \geq \int_0^{z_p} \frac{\Delta q_v(z)}{q_v} dz \quad (6)$$

3. Verificación de las predicciones del viento medio.

El estudio de verificación se ha realizado, con datos de los meses de septiembre de 2005 a enero de 2006, en una serie de estaciones meteorológicas automáticas situadas en puntos cercanos a las líneas de alta velocidad y en algunas otras estaciones automáticas ubicadas en zonas consideradas ventosas, no próximas a las LAV, elegidas con el fin de incrementar el número de datos con fuerza de viento de cierta consideración. Las estaciones próximas a las LAV elegidas son: Lérida, Bujaraloz, Zaragoza, Calatayud, Sigüenza, Guadalajara, Tablada, Córdoba, Villanueva de Córdoba, Ciudad Real, Toledo, Sariñena y Huesca. Y las consideradas ventosas: Tarifa, Capdepera (Mallorca), Mahón, Pollensa, Castello D'Empuries y Sant Jaume (Delta del Ebro). La localización del conjunto de estaciones utilizadas se muestra en la figura 3.

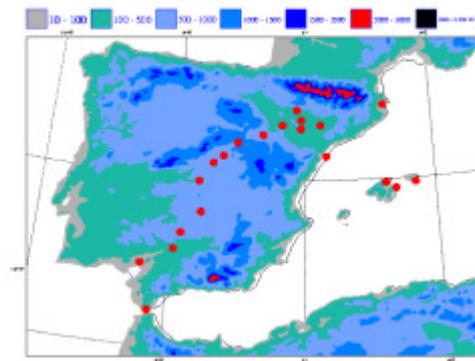


Fig.3. Estaciones utilizadas para la verificación

3.1 Fuerza

En las figuras 4 y 5 podemos ver representadas las fuerzas del viento medio previstas por los modelos Hirlam 0.16 y 0.05 frente a las observaciones correspondientes.

Aunque la diferencia entre ambas figuras es pequeña, parece que la distribución correspondiente al Hirlam 0.05 es ligeramente mejor que la del Hirlam 0.16: la distribución es algo más estrecha y simétrica respecto a la diagonal.

En la tabla 1 se indican los coeficientes de determinación R^2 entre los vientos medios previstos y observados, para los modelos Hirlam 0.16 y 0.05, en las estaciones de verificación indicadas.

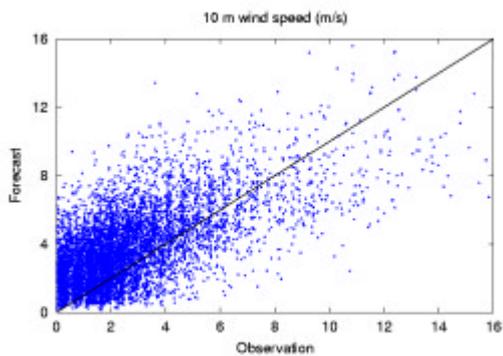


Fig.4. Viento medio previsto por Hirlam 0.16 frente a las observaciones. ($R^2=0.39$ y $n=39943$)

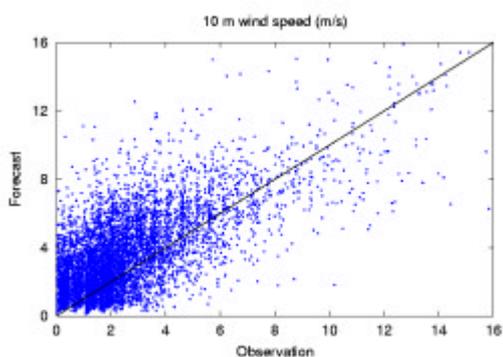


Fig.5. Viento medio previsto por Hirlam 0.05 frente a las observaciones. ($R^2=0.44$, $n=35184$)

Nombre	Número de datos		R^2	
	H0.16	H 0.05	H 0.16	H 0.05
Huesca	2599	2526	0.52	0.52
Sariñena	1881	1825	0.58	0.59
Sant Jaume	429	453	0.40	0.41
Villanueva de C.	2496	2429	0.41	0.44
Castello d'Emp.	1732	875	0.45	0.45
Bujaraloz	2596	2525	0.54	0.54
Toledo	2370	2296	0.39	0.38
Ciudad Real	2671	2596	0.47	0.48
Sigüenza	1990	1939	0.36	0.35
Lérida	2506	2440	0.36	0.35
Pollensa	2100	1290	0.26	0.38
Sevilla/Tablada	2725	2651	0.25	0.30
Calatayud	2346	2277	0.26	0.35
Córdoba Aerop.	2084	2016	0.29	0.32
Zaragoza	2780	2708	0.45	0.45
Guadalajara	1510	1440	0.29	0.25
Menorca Mahón	2633	1556	0.55	0.69
Tarifa	2495	1342	0.61	0.71

Tabla 1. Coeficientes de determinación R^2 entre los vientos medios previstos y observados, para los modelos Hirlam 0.16 y Hirlam 0.05.

Los bajos valores de R^2 (0.39, en promedio, para el ONR y 0.44 para el HNR) resultantes y la variabilidad de estos coeficientes, entre unas estaciones y otras, puede explicarse por el hecho de que las resoluciones del modelo –incluso la 0.05- no

son suficientes para captar particularidades locales de menor escala que sin duda influyen de manera importante en el viento observado en superficie.

En la mayoría de los puntos de observación comparados, el R^2 correspondiente al Hirlam 0.05 resulta superior al del Hirlam 0.16, confirmándose así el mejor comportamiento del modelo de mayor resolución en todos los puntos de comparación.

En la figura 6 se representan los errores cuadráticos medios y los sesgos del Hirlam 0.05 (HNR) y Hirlam 0.16 (ONR) en función de la velocidad del viento observado.

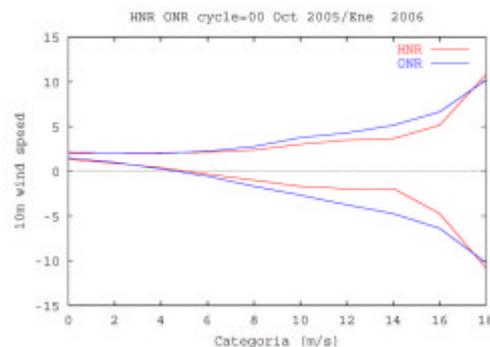


Fig.6. Errores cuadrático medio y sesgos del Hirlam 0.05 (HNR) y 0.16 (ONR).

Se ve que para velocidades observadas entre 0 y 6 m/s las diferencias entre los errores y sesgos de ambos modelos son prácticamente inapreciables, y que por encima de 6 m/s los errores y sesgos del HNR son claramente menores que los del ONR, lo que indica un mejor comportamiento del modelo de mayor resolución –como era de esperar-. Los valores favorables al ONR que se observan en el límite superior de velocidades representado (18 m/s), no deben ser tenidos en cuenta, por corresponder a un número de casos muy pequeño.

3.2 Dirección

En cuanto a la dirección del viento, la figura 7 representa el error absoluto medio y el sesgo de las predicciones realizadas con el Hirlam 0.05, correspondientes al mes de enero de 2006, en las estaciones automáticas próximas a las LAV, para todos los casos y para los casos de velocidad prevista mayor de 20 km/h. Puede verse que el error en la predicción de la dirección disminuye notablemente cuando se restringe el estudio a velocidades mayores de 20 km/h, pasando el error absoluto medio desde unos 55° cuando se analizan todas las predicciones conjuntamente, hasta valores de unos 25° para velocidades mayores de 20 km/h.

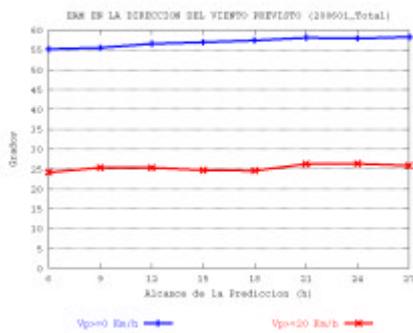


Fig. 7. Error absoluto medio de las predicciones de dirección del viento efectuadas con el Hirlam 0.05 durante enero de 2006, para el conjunto de todas predicciones realizadas durante ese mes (en azul), y para los casos de velocidad prevista mayor de 20 km/h (en rojo).

4. Verificación de las predicciones de rachas del viento.

En las figuras 8 y 9 se presenta la evolución temporal de las rachas máximas previstas por los distintos métodos, junto con las observaciones correspondientes, en el período del 1 al 20 de noviembre de 2005 en la estación de Bujaraloz.

Al observar estos diagramas en los que se representa, de forma continua en función del tiempo, los valores de las rachas máximas previstas, por los distintos métodos, y los valores correspondientes de rachas máximas observadas, la impresión que se obtiene es de que los métodos estudiados funcionan razonablemente bien, pareciéndose, en general, las rachas previstas y las observadas, y captándose de forma bastante aceptable los episodios de rachas altas o bajas.

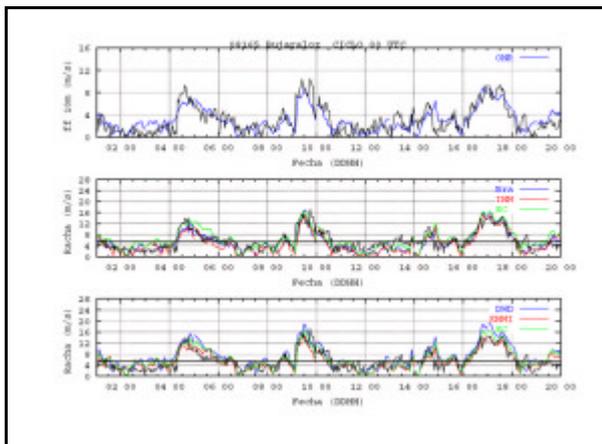


Fig. 8. Rachas máximas previstas y observadas (en negro) en el período entre el 1 y el 20 de noviembre de 2005 en la estación meteorológica automática de Bujaraloz. La gráfica superior corresponde a la comparación entre la fuerza del viento medio previsto por el Hirlam 0.16 y la observación correspondiente. Los métodos de rachas están aplicados mediante el Hirlam 0.16.

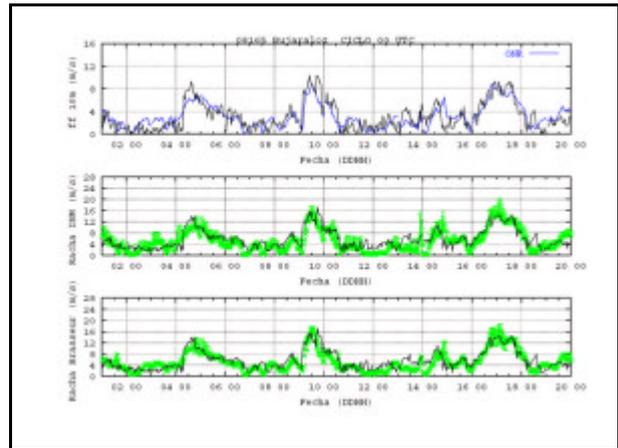


Fig. 9. Rachas máximas previstas (en verde) y observadas (en negro) en el período entre el 1 y el 20 de noviembre de 2005 en la estación meteorológica automática de Bujaraloz. La impresión en verde corresponde al rango de variación entre las rachas previstas por los métodos INM max e INM, o Brasseur max y Brasseur min. La gráfica superior corresponde a la comparación entre la fuerza del viento medio previsto por el Hirlam 0.16 y la observación correspondiente. Los métodos de rachas están aplicados mediante el Hirlam 0.16.

4.1 Predicciones frente a observaciones

Las figura 10 muestra la distribución de los pares de puntos de rachas previstas frente a observadas, para los distintos métodos verificados.

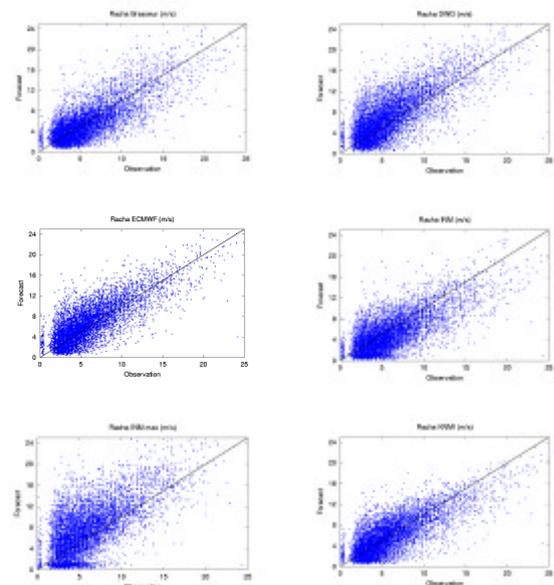


Fig. 10. Rachas previstas frente a observadas, para los distintos métodos indicados, aplicados con el Hirlam 0.05.

Las rachas previstas han sido obtenidas utilizando el modelo Hirlam 0.05. Parece difícil obtener conclusiones definitivas de la observación de estos diagramas, aunque sí parece observarse que la distribución de puntos obtenida mediante el método ECMWF pudiera ser algo mejor que las demás, pues se distribuyen de una manera más estrecha y

centrada en relación a la diagonal. La distribución correspondiente al INMmax muestra una clara tendencia a la sobrestimación, que es debida a su carácter de umbral máximo de racha.

Los coeficientes R^2 correspondientes a los distintos métodos verificados se muestran en la tabla 2. Una vez más se constata un claro mejor comportamiento del Hirlam 0.05 frente al Hirlam 0.16. Las diferencias entre los valores de R^2 obtenidos por los distintos métodos, aunque escasas, apuntan de nuevo hacia el método ECMWF como el que obtiene mejores resultados.

	HIRLAM 0.16		HIRLAM 0.05	
	n	R^2	n	R^2
BRASSEUR	44524	0.51	39206	0.57
BRAS min.	44524	0.50	39206	0.57
BRAS max.	44524	0.47	39206	0.54
DWD	44524	0.49	39192	0.54
ECMWF	44524	0.54	39206	0.59
INM	44524	0.45	39192	0.51
INM max.	44524	0.36	39192	0.45
KNMI	44524	0.52	39192	0.58

Tabla 2. Coeficientes de determinación R^2 entre las rachas previstas y observadas, para los distintos métodos comparados.

En consecuencia, dado el mejor comportamiento observado en el Hirlam 0.05, continuaremos nuestro estudio con los datos proporcionados por esta versión.

4.2 Errores en las predicciones de rachas

4.2.1 Errores cuadráticos y sesgos en función de la velocidad observada

La figura 11 muestra los errores cuadráticos medios y los sesgos de las rachas previstas por los distintos métodos, en función de la racha observada.

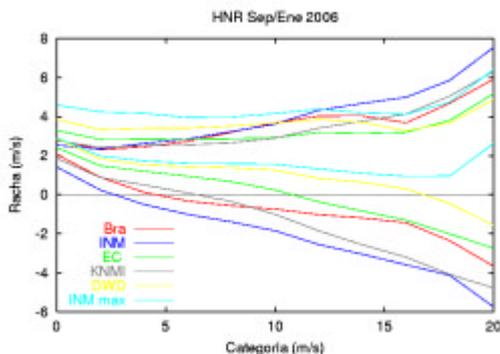


Fig.11. Errores cuadráticos medios y sesgos de las predicciones de racha en función de la racha observada, para cada uno de los métodos indicados.

Cuando las rachas observadas son elevadas, que en general son los casos de mayor interés, los menores errores cuadráticos parecen corresponder al ECMWF y DWD, mientras que para las categorías de racha inferiores, los menores errores corresponden al INM, Brasseur o KNMI. Esto plantea dudas sobre cuál es el método más adecuado de una manera global, pues carecemos de un único valor numérico que nos indique cuál es el mejor. Para tratar de superar en parte este inconveniente se ha realizado un estudio de los errores globales, en función del alcance de predicción, para los casos de fuerza del viento medio observado mayor de 20 km/h y de 40 km/h, es decir, en los casos en que el viento es de cierta consideración, que son los de mayor interés, en general. Este estudio se muestra en el siguiente epígrafe.

4.2.2 Errores cuadráticos y sesgos en función del alcance de predicción.

Las figuras 12 y 13 muestran los errores cuadrático medio y sesgos de las rachas previstas por los distintos métodos, en función del alcance de predicción, y para los casos en que la fuerza del viento medio observada es de cierta consideración: se presentan los resultados para los casos de fuerza del viento medio mayor de 20 km/h y de 40 km/h.

Se observa que para los casos de fuerza media del viento observado mayor de 20 km/h, el método del ECMWF es el de menor error cuadrático medio en todos los alcances. Esto, junto con el hecho de que para vientos medios mayores de 40 km/h los errores del ECMWF y del DWD son prácticamente iguales, indica que el método ECMWF es el más adecuado para ser elegido como método de predicción de rachas, al menos en lo referente al error entre las rachas previstas y observadas.

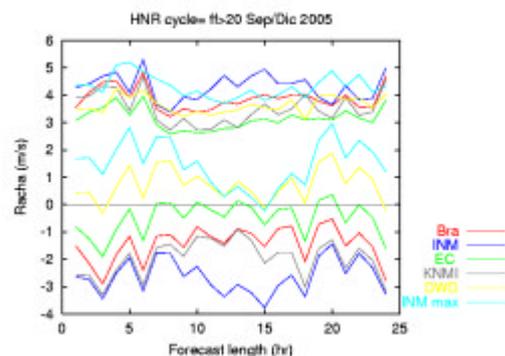


Fig. 12. Errores cuadráticos medios y sesgos de las rachas previstas por los distintos métodos indicados, en función del alcance de predicción, cuando la fuerza del viento medio observada es mayor de 20 km/h.

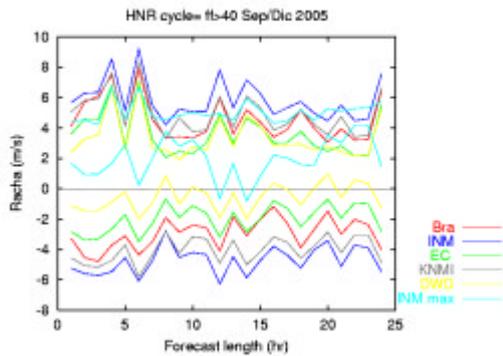


Fig. 13. Errores cuadráticos medios y sesgos de las rachas previstas por los distintos métodos indicados, en función del alcance de predicción, cuando la fuerza del viento medio observada es mayor de 40 km/h.

4.3 Errores en la predicción de rachas significativas

Un estudio similar al realizado en el epígrafe 4.2 se ha realizado exclusivamente para los casos, que hemos denominado, de rachas significativas: rachas cuya diferencia con la fuerza del viento medio es mayor o igual que 10 kt. Los resultados obtenidos fueron prácticamente los mismos que los obtenidos en 4.2, por lo que carece de interés reiterar la presentación de estos resultados. Y las conclusiones obtenidas en 4.2 pueden considerarse perfectamente válidas también para los casos de rachas significativas.

4.4 Superación de umbrales

En muchas ocasiones es de gran interés, no tanto conocer con exactitud la fuerza que alcanzarán las rachas, sino sólo saber si éstas superarán o no determinados umbrales. Para tener en cuenta este aspecto, se han obtenido las probabilidades de detección (PD) y de falsas alarmas (PFA), así como el “critical success index” (CSI), para diferentes umbrales y para cada uno de los métodos evaluados.

La probabilidad de detección (PD) se refiere al cociente del número de sucesos que superan el umbral y han sido detectados (“sí previstos y sí observados”) dividido por el número total de sucesos observados que superan este umbral (“sí observados”).

La probabilidad de falsas alarmas (PFA) nos indica la proporción entre el número de falsas alarmas (“sí previstos y no observados”) y el número total de alarmas emitidas (“sí previstos”).

El índice CSI (critical success index) representa, en cierta manera, en un solo valor numérico los dos índices anteriores; y viene dado por la proporción

entre el número de predicciones de superación de umbral acertadas (“sí previstos y sí observados”) y el número total de casos de superación de umbral que han sido previstos u observados (“sí previstos o sí observados”).

Las figuras 14 a 16 muestran los índices PD, PFA y CSI de cada uno de los distintos métodos comparados, para los distintos umbrales indicados en el eje de abscisas.

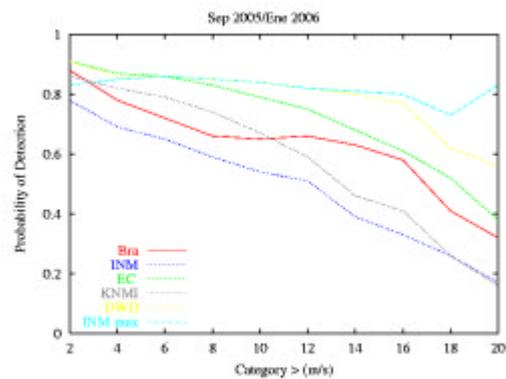


Fig.14. Probabilidades de detección (PD), para los distintos métodos comparados.

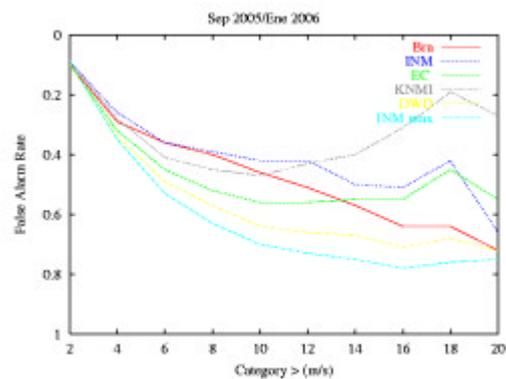


Fig.15. Proporción de falsas alarmas (PFA,) para los distintos métodos comparados.

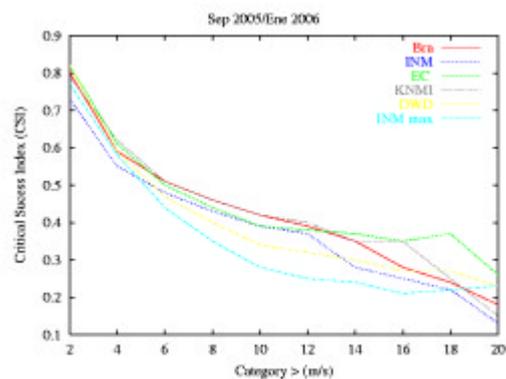


Fig.16 Critical success index (CSI), para los distintos métodos comparados.

Los resultados obtenidos, en cuanto a los valores absolutos, son poco satisfactorios. Sólo el método INMmax es capaz de detectar alrededor de un 80 % de los casos, para umbrales elevados. Los demás métodos, para el umbral de 20 m/s, detectan porcentajes bastante inferiores: alrededor del 60% el DWD, alrededor del 40% el ECMWF y alrededor del 20% el INM (el considerado como más probable). Además las falsas alarmas son muy altas: alrededor de un 75% para el INMmax y un 55% para el ECMWF; el mejor porcentaje de falsas alarmas corresponde al KNMI -alrededor de un 25% para el umbral de 20 m/s-, por el contrario este método presenta el peor valor de probabilidad de detección para ese umbral: sólo detecta alrededor de un 18% de los sucesos.

El CSI, que de alguna manera evalúa conjuntamente las probabilidades de detección y las de falsas alarmas, presenta también valores bajos: alrededor de 0.25 en el mejor de los casos, para el umbral de 20 m/s. Este índice, a pesar de sus bajos valores, podemos utilizarlo para comparar los distintos métodos, y apunta de nuevo al ECMWF como el mejor de ellos: para umbrales de 50 km/h en adelante el CSI del ECMWF es claramente el más alto, y para umbrales inferiores –quizá de menos interés- las diferencias con los mejores son escasas.

Los aparentemente malos resultados obtenidos en las PD y PFA inducen a pensar que los distintos métodos comparados no deberían utilizarse directamente para realizar predicciones de superación de umbrales, sino teniendo en cuenta las distribuciones de frecuencias de las observaciones correspondientes a cada categoría de predicción. En el epígrafe siguiente se discutirá este aspecto.

4.5 Percentiles de las observaciones correspondientes a cada valor de racha prevista

A partir de los percentiles de las observaciones correspondientes a cada categoría de racha prevista será posible hacer una estimación de la probabilidad de que las rachas superen determinados umbrales, así como obtener umbrales superiores de racha con determinados niveles de confianza. En las figuras 17 a 19 se muestran las distribuciones de frecuencias de las observaciones correspondientes a las categorías de rachas previstas: 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 y 20 m/s, para los métodos INM, INMmax y ECMWF.

Se han representado mediante diagramas de cajas, que consisten en la representación, de menor a mayor, del percentil 5, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil y el percentil 95 de dichas observaciones. Las categorías, o clases de rachas previstas, se han definido de 2 m/s de anchura, haciendo corresponder la distribución de frecuencias

de las observaciones de cada categoría con el valor central de la categoría o clase de predicción.

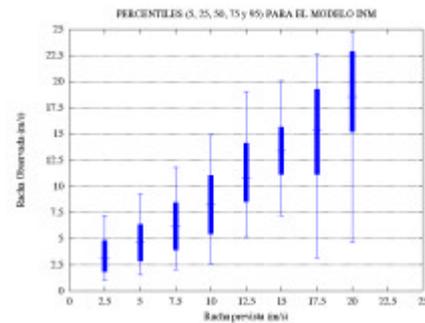


Fig.17. Diagramas de cajas para las categorías de rachas previstas indicadas, según el método INM. Se representan el percentil 5, el 1^{er} cuartil, la mediana, el 2^o cuartil y el percentil 95.

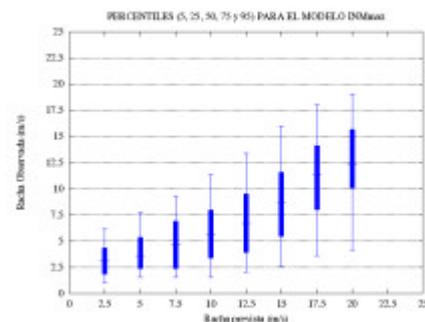


Fig.18. Diagramas de cajas para las categorías de rachas previstas indicadas, según el método INMmax. Se representan el percentil 5, el 1^{er} cuartil, la mediana, el 2^o cuartil y el percentil 95.

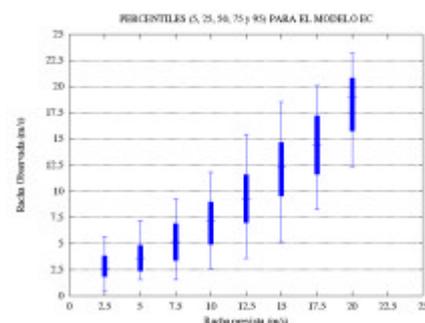


Fig.19. Diagramas de cajas para las categorías de rachas previstas indicadas, según el método ECMWF. Se representan el percentil 5, el 1^{er} cuartil, la mediana, el 2^o cuartil y el percentil 95.

Puede observarse que la variación de un mismo percentil en función de la racha prevista puede ser fácilmente ajustable a determinadas funciones, lo que puede suponer una gran ventaja en la aplicación de estas distribuciones de frecuencias para realizar estimaciones probabilistas de rachas. Asimismo, y especialmente en el método ECMWF, puede observarse que las distribuciones de frecuencias podrían ser simétricas y posiblemente ajustarse a una distribución normal, lo que supondría de nuevo una gran ventaja, para los cálculos, a la hora de aplicar estas distribuciones para realizar estimaciones probabilistas, a partir de la media y la desviación típica. Debido a un todavía insuficiente número de datos de vientos fuertes durante el período de verificación, se ha tenido que restringir el estudio de distribución de frecuencias a categorías inferiores o iguales a 20 m/s, no obstante, el buen ajuste que parece que pueden presentar los distintos percentiles a determinadas funciones sencillas, parece presagiar que no se cometerán errores importantes si se extrapolan los resultados a categorías de racha prevista algo superiores.

Vemos de nuevo que el método ECMWF parece presentar un mejor comportamiento que los otros dos: sus distribuciones son en general más simétricas, pero sobre todo los rangos de variación en las categorías más altas son los más estrechos.

Con el fin de facilitar las aplicaciones prácticas de los resultados obtenidos de este estudio de distribución de frecuencias, en la tabla 4 se muestran los valores numéricos de los percentiles que se han considerado de mayor utilidad: 5, 25, 30, 50, 60, 75, 90 y 95. Los percentiles, 30, 60 y 90 serán de gran ayuda para adaptar las predicciones probabilistas, que puedan realizarse en base a estas distribuciones, a los términos de probabilidad utilizados en el lenguaje de términos meteorológicos del INM: posible (probabilidad entre 10 y 40 %), probable (probabilidad entre el 40 y el 70 %) y seguro (probabilidad superior al 70 %).

Del análisis de los datos contenidos en esta tabla se desprende que el método INMmax tiene un comportamiento que se ajusta bastante bien a lo que se esperaba de él, es decir, a partir de 10 m/s (36 km/h) de racha prevista, funciona aproximadamente como umbral máximo de las rachas reales, en un porcentaje comprendido entre el 90 y el 95% de los casos (superior al 95 % para la categoría de 20 m/s). Y en cuanto al método INM, que hasta ahora ha sido utilizado en las predicciones para las LAV como valor más probable de racha, podemos decir, a la vista de esta gráfica, que presenta un comportamiento bastante aceptable en relación con los otros 2 métodos, ya que para valores de rachas previstas inferiores a 20 m/s (72 km/h), es el que presenta modas más cercanas a la racha prevista,

incluso más que el ECMWF, que es el método, de los comparados, que en general presenta un mejor comportamiento.

ECMWF								
Rp	2.5	5.0	7.5	10	12.5	15.0	17.5	20.0
P0	0	0	0	0	0	1.03	3.6	4.12
P5	0.51	1.54	1.54	2.57	3.6	5.14	8.23	12.35
P25	2.06	2.57	3.6	5.14	7.2	9.77	11.83	15.95
P30	2.06	2.57	4.12	5.14	7.72	10.29	12.35	16.98
P50	2.57	3.6	5.14	7.2	9.26	12.35	14.4	19.03
P60	3.09	4.12	5.66	7.72	10.29	12.86	15.43	20.06
P75	3.6	4.63	6.69	8.75	11.32	14.4	16.98	20.58
P90	5.14	6.17	8.23	10.8	13.89	16.46	19.03	22.12
P95	5.66	7.2	9.26	11.8	15.43	18.52	20.06	23.15
100	24.2	18.5	18.5	22.6	23.15	23.15	46.3	46.3
Mo	2.06	3.6	5.14	7.72	8.75	12.35	15.95	20.06

INM								
Rp	2.5	5.0	7.5	10	12.5	15.0	17.5	20.0
P0	0	0	0	0	0	1.03	1.54	4.12
P5	1.03	1.54	2.06	2.57	5.14	7.2	3.2	4.6
P25	2.06	3.1	4.12	5.66	8.75	11.32	11.32	15.43
P30	2.57	3.09	4.63	6.17	9.26	11.83	12.35	15.95
P50	3.09	4.63	6.17	8.23	10.8	13.38	15.43	18.52
P60	3.6	5.14	6.69	9.26	11.83	13.89	16.98	20.58
P75	4.63	6.17	8.23	10.8	13.89	15.43	19.03	22.64
P90	6.17	8.23	10.3	13.4	16.98	18.0	21.1	23.66
P95	7.2	9.26	11.8	14.9	19.03	20.06	22.64	24.69
100	24.2	17.0	22.6	21.6	46.3	46.3	25.21	24.69
Mo	2.57	3.6	5.14	8.75	9.77	13.38	16.98	15.95

INMmax								
Rp	2.5	5.0	7.5	10	12.5	15.0	17.5	20.0
P0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	1.03	1.54	1.54	1.54	2.06	2.57	3.6	4.12
P25	2.06	2.57	2.57	3.6	4.12	5.66	8.23	10.29
P30	2.06	2.57	3.09	4.12	4.63	6.17	8.75	10.8
P50	3.09	3.6	4.63	5.66	6.69	8.75	11.32	12.35
P60	3.6	4.12	5.14	6.17	7.72	9.77	12.35	13.38
P75	4.12	5.14	6.69	7.72	9.26	11.32	13.89	15.43
P90	5.66	6.69	8.23	9.77	11.8	14.4	16.46	18.01
P95	6.17	7.72	9.26	11.3	13.4	15.95	18.01	19.03
100	24.2	17.0	17.0	19.6	22.6	22.12	23.15	36.01
Mo	2.57	2.57	2.57	5.14	5.14	8.75	11.83	12.35

Tabla 4. Percentiles y moda, en m/s, de las observaciones correspondientes a las categorías de rachas previstas indicadas. (Rp: racha prevista, Mo: moda)

5. Conclusiones finales

5.1 Viento medio a 10 m

Aunque no se ha pretendido en este trabajo realizar una verificación exhaustiva del viento medio, presentamos las principales conclusiones a este respecto que hemos obtenido:

- El Hirlam 0.05 predice mejor la fuerza del viento medio que el Hirlam 0.16: en la mayoría de los observatorios utilizados en la verificación los coeficientes de determinación R^2 de la fuerza del viento medio y sus errores cuadráticos medios son favorables al modelo de mayor resolución.
- Los coeficientes R^2 de la fuerza del viento medio a 10 m previstos por el Hirlam 0.05 presentan, en promedio, un valor de 0.44, frente a los 0.39 del Hirlam 0.16, existiendo una notable variabilidad de estos coeficientes entre unas estaciones y otras, dependiendo,

probablemente, esta variabilidad de particularidades locales que escapan a la resolución del modelo. A pesar de los relativamente bajos valores R^2 , las predicciones de viento medio realizadas con el Hirlam se consideran de utilidad, ya que los razonablemente buenos resultados obtenidos en la predicción de rachas –que se basa, entre otros factores, en el viento medio previsto- así lo indican, al menos en este sentido.

- En cuanto a la dirección del viento medio, las verificaciones de vientos realizadas en los informes mensuales que elabora el INM para las líneas férreas de alta velocidad muestran que los errores en la predicción de la dirección del viento medio a 10 m obtenida por el Hirlam 0.05, presentan unos valores que pueden considerarse bastante buenos: el error absoluto medio es de unos 55° para el conjunto de las predicciones, sin distinción por tramos de velocidad, y de unos 25° para velocidades previstas mayores de 20 km/h.

5.2 Rachas

- Los distintos métodos de predicción de rachas comparados muestran un comportamiento aceptable, sin grandes diferencias entre ellos en la mayor parte de los casos, no obstante, los índices de verificación apuntan hacia el método ECMWF como el mejor de ellos, ya que es el que obtiene los mejores resultados.
- Los distintos métodos comparados no deberían utilizarse directamente para realizar predicciones de superación de umbrales, pues las probabilidades de detección correspondientes son escasas. El INMmax, es capaz de detectar alrededor del 80% de los fenómenos, aunque con una proporción de falsas alarmas bastante elevada. Un ajuste del método ECMWF, o de cualquier otro, en el sentido de obtener un umbral de racha máximo (ECMWFmax) basado en las distribuciones de frecuencias obtenidas en este estudio, podría probablemente mejorar los resultados obtenidos por el INMmax.
- Las distribuciones de frecuencias de las observaciones correspondientes a las distintas categorías de rachas previstas, para los métodos INM, INMmax y ECMWF, constituyen una herramienta muy importante para la obtención de estimaciones probabilistas de rachas, así como para fijar umbrales máximos para las mismas.
- El método INM, que hasta ahora ha sido utilizado en las predicciones para las líneas férreas de alta velocidad (LAV) como valor más probable de racha, presenta un comportamiento bastante aceptable a este respecto, ya que para valores de rachas previstas inferiores a 20 m/s

(72 km/h), es el que presenta modas más cercanas a la racha prevista.

- Finalmente, el método INMmax presenta un comportamiento que se ajusta bastante bien a lo esperado de él en sus actuales aplicaciones prácticas para las LAV, es decir, a partir de 10 m/s (36 km/h) de racha prevista, funciona aproximadamente como umbral máximo para las rachas reales, en un porcentaje comprendido entre el 90 y el 95% de los casos (superior al 95 % para la categoría de 20 m/s). Comportamiento que, como ya hemos apuntado, podría probablemente mejorarse mediante la utilización ajustada (no directa) del método ECMWF, ya que éste método es el que ha presentado los mejores resultados en la verificación.

6. Referencias

- Brasseur, O., 2001: Development and Application of a Physical approach to Estimating Wind Gusts, *Mon. Wea. Rev.*, 129, 5-25
- Ecmwf, 2004: IFS Documentation CY28r1. <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY28r1/Physics/index.html>
- Wilks, W., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press, 467 pp.