

**XXXIV Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica  
Española (Teruel, 29 febrero – 2 marzo 2016)**  
ISBN 978-84-617-5240-9

**RESULTADOS PRELIMINARES DEL MODELO DE IMPACTO  
ECONÓMICO PARA LAS SITUACIONES DE RACHAS MÁXIMAS  
EXTREMAS EN LA ESPAÑA PENINSULAR**

M. Rodrigo <sup>(1)(2)</sup>, J.A. López <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), Paseo de la Castellana, 32, 28046,  
Madrid (España), ccseguros@aemet.es

<sup>(2)</sup> Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Calle Leonardo Prieto Castro, 8, 28040,  
Madrid (España), jlopezd@aemet.es

## 1. INTRODUCCIÓN

El Consorcio de Compensación de Seguros, CCS, es el organismo nacional que proporciona seguros contra fenómenos meteorológicos que implican un riesgo extraordinario y compensa los daños producidos. Dentro de estos fenómenos se encuentra la TCA, Tempestad Ciclónica Atípica, en la que están incluidos los tornados y los vientos extraordinarios, definidos actualmente como rachas máximas de viento superiores a 120 km/h, de acuerdo con el Reglamento del Seguro de Riesgos Extraordinarios (RSRE). Sin embargo, la delimitación precisa de las áreas en las que se cumple esta condición presenta considerables dificultades en la España peninsular debido, principalmente, a la falta de observación y a la complejidad del terreno.

La Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, realiza los informes técnicos que delimitan las zonas geográficas afectadas por vientos extremos aplicando las técnicas de interpolación geoestadísticas más adecuadas y utilizando las mediciones existentes. El estimador utilizado, el krigeado universal, se apoya en los datos de observación y toma como variables externas la elevación del terreno, la distancia a la costa y las salidas de racha máxima de alcance más corto del modelo operativo de predicción HIRLAM 0.05 (High Resolution Limited Area Model).

El krigeado es una técnica de interpolación geoestadística en la que la estimación en un punto cualquiera es una combinación lineal de las observaciones en el resto de puntos debidamente ponderadas (se busca que el estimador sea insesgado y que tenga varianza mínima). En concreto, la técnica del krigeado universal es la elegida para las estimaciones de las áreas de rachas máximas de

viento, y se basa en un modelo de tendencia lineal en el que entra en juego las variables auxiliares citadas y se obtienen, de esta manera, variaciones suaves en la interpolación.

La estructura del semivariograma usada se especifica “sin efecto pepita” de tal forma que el estimador del krigeado es exacto: en los puntos de observación el valor estimado coincide con el valor observado. Esto es importante para el CCS puesto que es necesario respetar al máximo los valores observados ya que son los que tienen mayor fuerza legal.

En este trabajo se presentan algunos pasos preliminares en el desarrollo de un modelo de catástrofes de situaciones de rachas máximas de viento extremas en la España peninsular. El objetivo fundamental de este modelo es proporcionar información significativa para la cobertura del riesgo y su correspondiente evaluación para las situaciones extremas de viento en un corto plazo de tiempo.

Los resultados se presentan a nivel de municipios, por ser la unidad aplicada por el CCS en la cobertura de daños. Con objeto de delimitar geográficamente el área de afectación del fenómeno meteorológico, el CCS solicita colaboración a AEMET para acotar las áreas con viento extremo, de forma que se procure la mayor homogeneidad y se evite la exclusión de puntos aislados. Posteriormente el CCS extiende la zona afectada a todo el municipio siempre que exista algún punto en el que se cumpla la condición de TCA.

## 2. PLANIFICACIÓN

Los primeros estudios en el desarrollo del modelo se refieren: a) generación de la climatología de las zonas afectadas por el viento extraordinario en el período de años comprendido entre 2009 y 2014,

ambos incluidos, y b) análisis de las pérdidas cubiertas (costes actualizados) en situaciones reales para estos mismos años con datos del CCS. La aplicación conjunta de esta información mediante un modelo preliminar permite obtener unas estimaciones iniciales del coste de las pérdidas esperadas por vientos extremos a nivel de municipios.

Los fenómenos meteorológicos extremos a veces pasan desapercibidos pero con cierta frecuencia se manifiestan debido a su impacto en la sociedad, con sus correspondientes consecuencias. Además, la naturaleza catastrófica de un fenómeno depende de diversos factores, no sólo del valor extremo que presente el elemento climático, sino de la distribución de la población o de las características geomorfológicas, entre otros muchos.

Posteriormente se incorporarán una serie de variables como son: elevación del terreno, distancia a la costa, información catastral, población, intensidad de la TCA... que permitan desarrollar un modelo de impacto económico más realista. En la Figura 1 se muestra la planificación inicial para el desarrollo de este modelo.



Fig. 1.- Esquema general para la planificación del Modelo de Impacto Económico.

### 3. MODELO PRELIMINAR

#### 3.1. CLIMATOLOGÍA

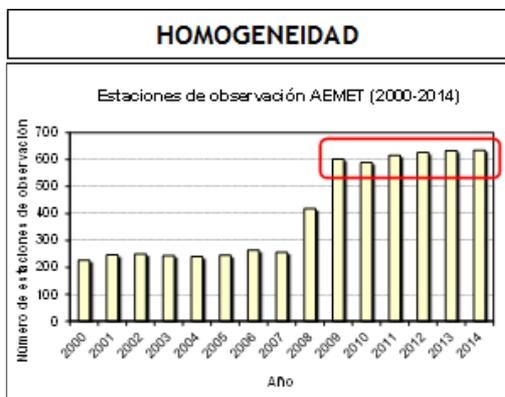


Fig. 2.- Número de estaciones de observación de AEMET para la variable de racha máxima entre los años 2000 a 2014.

En primer lugar el estudio climatológico tiene en cuenta la necesaria homogeneidad que tendrá que existir en el número de estaciones de observación anual. Tal y como se muestra en la Figura 2, para el período comprendido entre el año 2000 a 2014, el número de estaciones de AEMET comienza a ser homogéneo en el año 2009, año del que parte nuestro estudio.

Para estudiar la frecuencia con la que se producen las situaciones de viento extremo se han tomado sólo los datos de observación de las estaciones de AEMET. Los criterios impuestos consisten en seleccionar aquellos días en los que al menos una estación de observación presenta rachas máximas superiores a 110 km/h. Posteriormente se calculan las estimaciones de racha máxima para estos días y se toman aquellos en los que si aparecen valores superiores a 120 km/h.

Una vez seleccionados estos días vamos a intentar simular las situaciones de TCA que se hubiesen dado. Para ello aplicamos unas condiciones restrictivas para poder diferenciar un período de otro. En primer lugar unimos los días consecutivos (cronológicamente, hasta un máximo de 5 días, puesto que ninguna situación de TCA suele sobrepasar este rango). Además, unimos los días sueltos que aparecen, siempre que la separación sea de 1 único día con el período anterior, puesto que por norma general pertenecerán a la misma situación sinóptica. Así, una vez definidas las fechas en las que las situaciones de TCA tienen lugar, se realizarán las estimaciones de racha máxima según el procedimiento operativo, utilizando el krigeadado universal.

Es necesario distinguir dos períodos que tendremos en cuenta para el desarrollo de todo el trabajo. Esta división surge de un cambio en el RSRE en el que la definición de TCA es modificada. En años anteriores al 27 de octubre de 2011 el límite impuesto en el valor de racha máxima para las situaciones de TCA era de 135 km/h, pasando luego al valor actual de 120 km/h. Además, en el primer período, en el que el límite es de 135 km/h, no se incorpora el modelo Hirlam en la interpolación, ya que las estimaciones realizadas en ese momento tampoco tenían en cuenta esta información.

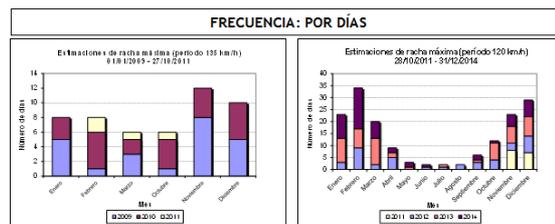


Fig. 3.- Frecuencia por días de las situaciones de viento extremo de la climatología desarrollada y para los años comprendidos entre el 2009 a 2014, diferenciando 2 períodos.

En la Figura 3 se presentan el número de días en los que se han producido situaciones de viento extremo para el período 2009-2014. La distribución mensual presenta notables diferencias para ambos períodos, esto es debido al umbral tomado en cada uno de ellos y a la incorporación del modelo Hirlam para las situaciones más recientes, principalmente.

### 3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PÉRDIDAS

El objetivo del modelo preliminar es estimar el coste de las pérdidas esperadas por vientos extremos para una TCA típica, a nivel de municipios, que tal y como hemos explicado está basado en: la climatología de las áreas afectadas (desarrollado anteriormente) y las pérdidas reales cubiertas por el CCS (aplicando costes actualizados).

En primer lugar se desarrolla un modelo inicial que calcula esta pérdida para una TCA típica basándose en una fórmula sencilla (ecuación 1).

$$Pérdida \Big|_{muni} (\text{€}) = \frac{\sum_{i \in muni} \text{costes}^i \text{ (CCS)}}{\sum_{i \in muni} n^{\circ} TCA^i \text{ (CLIMA)}} \quad (1)$$

Para cada municipio simplemente se realiza un sumatorio sobre todos los costes reales que ha tenido ese municipio en todo el período para dividirlo por el número de TCA dadas en nuestra climatología en las que aparece ese municipio. Este modelo simple tiene un problema principal, se pierde información de gran importancia cuando en un municipio aparecen costes sin TCA en la climatología, esto se debe a que no siempre existe sincronización entre las fechas de las situaciones reales y las estimadas en la climatología. Algunas de las causas que producen esto son: utilización de las estaciones de observación de los Servicios Meteorológicos Externos para las estimaciones de racha máxima de las situaciones reales de TCA que utilizan sus costes asociados, cobertura ampliada respecto a las primeras estimaciones para las situaciones reales, cambios en la metodología aplicada para obtener las estimaciones... entre otras. Como dato, señalar que para este modelo inicial y para el segundo período, el del límite de 120 km/h, obtenemos una estimación de las pérdidas solamente para 550 municipios.

Se desarrolla otro modelo basado en el anterior, que denominaremos modelo preliminar, el cual utiliza la misma fórmula pero intenta subsanar el error de perder la información aportada por el CCS de los costes cubiertos en situaciones reales. Para ello, el cálculo se realiza para cada municipio y para cada mes de manera que si en alguno de ellos hay coste sin TCA en la climatología se le imputa el valor de 1 (como si se hubiese dado). Con este modelo modificado obtenemos información para un total de

1600 municipios para el segundo período de 120 km/h.

El estudio de ambos modelos, inicial y preliminar, se analizó originariamente para el segundo período, como muestran los datos detallados con el número de municipios de los que se dispone información. Ahora, una vez seleccionado el modelo preliminar, ampliamos la información para ciertos municipios incluyendo también el período correspondiente a los 135 km/h, esta ampliación produce un aumento superior al 20% en cuanto a número de municipios con estimación de la pérdida.

En la Figura 4 podemos ver la comparación entre ambos períodos. En este se muestran los municipios de los que se dispone información para el modelo preliminar. En rojo aparecen los municipios correspondientes al segundo período, límite de 120 km/h, y en azul los municipios añadidos según el período de 135 km/h.

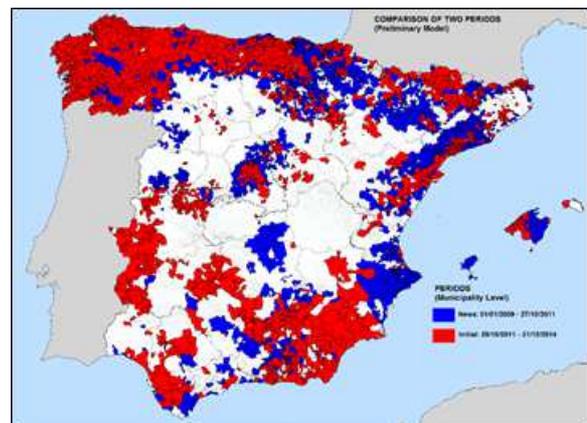


Fig. 4.- Comparación del número de municipios con información para ambos períodos utilizando el Modelo Preliminar.

### 3.3. MODELO PRELIMINAR LOGARÍTMICO

Una vez seleccionado el modelo preliminar incluyendo ambos períodos, lo que se busca es poder referenciar todas las pérdidas medias calculadas para los diferentes municipios a un solo período de referencia, este será el período de 120 km/h, puesto que es el límite impuesto actualmente en el RSRE.

Se estudia la relación existente entre los municipios comunes a ambos períodos. En general no existe buena correlación y en vista a los resultados se decide tomar la relación logarítmica puesto que además existe una gran disparidad de los datos. Tenemos así un modelo preliminar logarítmico en el que los valores para los municipios que se obtienen del período de 120 km/h son directos del modelo preliminar y los del período de 135 km/h son valores ajustados según una relación logarítmica.

En la Figura 5 se muestra el mapa del modelo preliminar logarítmico, para aquellos municipios de los que se dispone información, y ya para ambos períodos, en el que se indica la pérdida media (en miles de €) asociada para cada municipio y por TCA, una vez aplicada la transformación logarítmica.

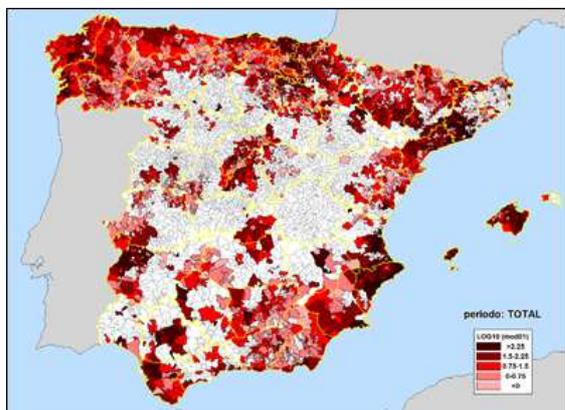


Fig. 5.- Modelo preliminar logarítmico (2009-2014): estimación de la pérdida media (miles de €) por TCA y por municipio debida a viento extremo.

Los resultados de la Figura 6 son similares a los de la Figura 5, la diferencia es que las pérdidas se normalizan por habitante, para evitar la dependencia que presentan municipios demasiado poblados con esta variables (por ejemplo Madrid).

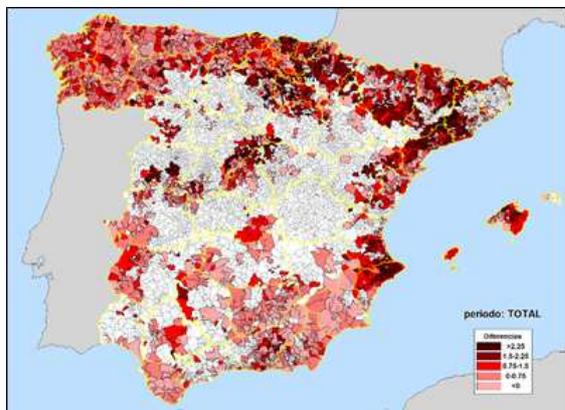


Fig. 6.- Modelo preliminar logarítmico por habitante (2009-2014): estimación de la pérdida media (miles de €) por TCA, por municipio y por habitante debida a viento extremo.

#### 4. MODELO LOGARÍTMICO ESTIMADO

Para ampliar la información aportada por el modelo anterior, y poder obtener valores para todos los municipios de la España peninsular y suavizarlos al mismo tiempo, se efectúa una regresión múltiple del logaritmo de la pérdida media (en miles de €) por cada 1000 personas sobre otras variables relevantes adicionales tras un proceso de selección paso a paso

de las más significativas. En concreto, estas variables son: logaritmo decimal de la población, desviación estándar de la altitud, distancia al mar media y logaritmo decimal de la extensión (número de puntos de grid).

En la Figura 7 se presenta el resultado de esta regresión, se muestra la pérdida media por TCA, por municipio y por persona.

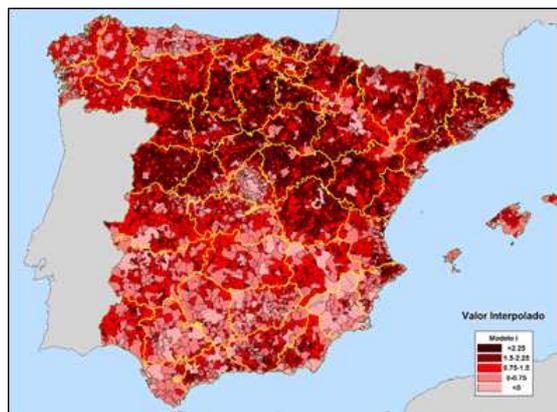


Fig. 7.- Modelo de la pérdida media por TCA, por municipio y por persona una vez aplicada la regresión.

### 5. ÍNDICES DE CARACTERIZACIÓN

El objetivo es construir un modelo categórico final de manera que se evalúe de forma rápida el impacto económico previsto para cada municipio en cada nueva TCA. Puesto que las situaciones con vientos extraordinarios poseen características y extensiones muy diferentes surge la necesidad de caracterizar estos eventos para poder aplicar el modelo final según la importancia de la TCA. Por ello se definen tres índices de caracterización para cada municipio: índice máximo (ecuación 2), índice de excesos (ecuación 3) e índice de excesos cuadrático (ecuación 4). Para los índices de excesos se utiliza el umbral de 90 km/h puesto que suele ser el límite impuesto por las compañías de seguros para aplicar la cobertura de los daños producidos.

$$I_{\max}|_{muni} = \max_{i \in muni} (R_{\max}^i) \quad (2)$$

$$I_{exc}|_{muni} = \frac{\sum_{i \in muni} \max(0, R_{\max}^i - 90)}{n^{\circ} \text{ptos grid}|_{muni}} \quad (3)$$

$$I_{exc2}|_{muni} = \frac{\sum_{i \in muni} \max(0, R_{\max}^i - 90)^2}{n^{\circ} \text{ptos grid}|_{muni}} \quad (4)$$

siendo  $R_{\max}^i$  la racha máxima en el punto de grid  $i$ -ésimo.

Además, se añaden otros tres índices definidos del mismo modo pero tomando la variable de velocidad máxima del viento medida en 10 minutos, pues se considera que esta variable puede ser de importancia para la caracterización de las situaciones en términos de su impacto en daños. Para los índices de excesos, en el caso de esta variable, se impone el umbral de 50 km/h puesto que es el valor correspondiente a los 90 km/h de la velocidad de racha máxima según un estudio climatológico en términos de frecuencias.

Estos índices se estudiarán en situaciones reales aplicándolos en el modelo final de estimaciones de pérdidas para poder compararlos con el importe pagado por el CCS. Esto permitirá, una vez caracterizada la TCA mediante los índices, encontrar el modelo más adecuado para estimar el impacto económico previsto para cada municipio.

## 6. CONCLUSIONES

Hemos construido un modelo preliminar basado en una climatología de TCAs y el inventario de indemnizaciones realizadas por el CCS en situaciones pasadas. Mediante este modelo se obtiene una estimación de la pérdida media asociada a cada municipio por TCA. Dado que en el pasado se ha utilizado un límite que define la situación de TCA distinto al actual se han relacionado ambos mediante un modelo logarítmico.

Para extender la estimación de pérdida a todos los municipios y al mismo tiempo suavizarla espacialmente se ha aplicado una regresión múltiple de la pérdida media logarítmica por cada 1000 personas sobre otras variables relevantes relacionadas con la población, la extensión, la altitud y la distancia al mar.

En desarrollos posteriores del modelo, la idea es incluir la información referente al catastro, concretamente los valores catastrales de la construcción, para que los resultados obtenidos de las pérdidas medias por municipio para una determinada TCA sean más realistas.

El objetivo final consiste en obtener un modelo categórico que permita evaluar de forma rápida el impacto económico previsto para cada municipio ante una nueva situación de TCA. Esto requiere caracterizar cada una de las situaciones de TCA en términos de su previsible impacto. Para ello se han desarrollado una serie de índices que se consideran suficientemente representativos de cada situación.

En la Figura 8 y Figura 9 se muestran los esquemas generales del procedimiento seguido hasta el momento para la construcción del Modelo de

Impacto Económico para las situaciones de Rachas Máximas Extremas.

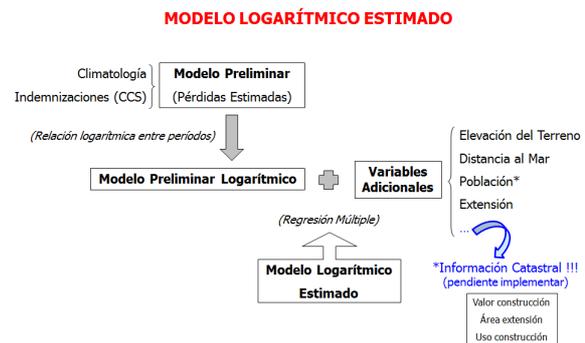
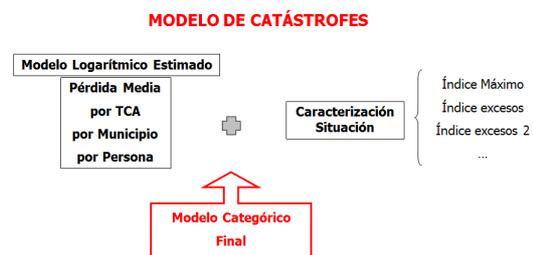


Fig. 8.- Esquema general para la construcción del Modelo Logarítmico Estimado.



Impacto económico previsto para cada municipio por TCA dado por categorías

Fig. 9.- Esquema general para la construcción del Modelo de Catástrofes Final a partir del Modelo Logarítmico Estimado.

## REFERENCIAS

Bivand, Roger S., Pebesma, Edzer J., Gómez-Rubio, V., 2008: Applied Spatial Data Analysis with R, Springer, 374 pp.

Burrough, P.A. y McDonnell, R.A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 333 pp.

Consorcio de Compensación de Seguros, 2012: Recopilación Legislativa, Edición de febrero de 2012, 202 pp.

Cressie, Noel A. C., 1991: Statistics for spatial data, A Wiley – Interscience Publication, 900 pp.

Dalgaard, P. (2008). Introductory Statistics with R. Springer.

López, J.A. y Rodrigo, M. (2013). Desarrollo de una técnica para la delimitación de zonas de racha de viento máxima alta en situaciones de viento extremos. En: García-Legaz, C. y Valero, F. (Eds.). Fenómenos meteorológicos adversos en España, AMV Ediciones, pp. 81-96.

R Core Team, 2013: R. A language and environment for statistical computing. Technical report, R

Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rodrigo, M. y López, J.A. (2013). “Mejora del procedimiento operativo de AEMET para la estimación de las áreas con rachas máximas de viento”. Tethys, 10, pp. 35-44.