

# SOBRECARGA DE NIEVE MÁXIMA SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL: DIFERENCIAS REGIONALES EN ESPAÑA

Ana MORATA\*; Peter TANNER\*;  
Yolanda LUNA\*\* y Carlos ALMARZA\*\*

\* *Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, CSIC*

\*\* *Servicio de Desarrollos Climatológicos, Instituto Nacional de Meteorología*

## RESUMEN

El principal objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de mapas de sobrecarga de nieve que sirvan de ayuda en el diseño de infraestructuras. La base de datos empleada ha sido construida a partir de los datos obtenidos de más de 1.000 estaciones termopluviométricas. Asimismo, se ha evaluado el valor esperado de carga de nieve para períodos de retorno de 50 años. La relación empírica existente entre los valores de carga de nieve y la altitud geográfica ha permitido determinar diferencias regionales en España.

**Palabras clave:** Mapas de carga de nieve, diferencias regionales, España.

## ABSTRACT

*The main purpose of this work is to construct snow load maps in Spain that can help structural designers. A data base has been constructed by means of termopluviometric observations in more than 1.000 stations. The snow load value is determined as 50 years mean recurrence interval value. Empirical relationships between snow and altitude are determined for different climatic regions.*

**Key words:** *Snow load maps, regional differences, Spain.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En España existen estudios para el diseño de obras y estructuras (Norma MV 101-1962) basadas en estimaciones de valores extremos de los elementos del clima, para diferentes frecuencias, con el objeto de que las infraestructuras soporten las acciones producidas por el viento, la temperatura, las precipitaciones, etc. En cuanto a la normativa de seguridad para el diseño de infraestructuras, hay que resaltar la preocupación del Ministerio de Fomento en la actualización de la citada normativa y adaptación de nuestro país a la de la Comunidad Europea. Existen también estudios sobre acciones del viento (ROM 0,4-95) en los que se aporta una metodología adecuada para el tratamiento de series de valores extremos. Por otra parte, se han realizado estudios a nivel europeo sobre la evaluación de la carga de nieve potencial sobre estructuras en el territorio de la Unión Europea (DGIII – D3, 1999) que obtienen resultados para el caso de la Península Ibérica muy poco satisfactorios. Surge, pues, la necesidad de profundizar en el estudio de las acciones climáticas variables, tales como la carga de nieve sobre una superficie horizontal o el efecto de temperaturas extremas, que pueden actuar o no sobre una estructura. Este estudio se centra, por tanto, en la evaluación de la carga de nieve sobre una superficie horizontal con una determinada probabilidad de ocurrencia.

## 2. DATOS

Las dificultades encontradas para la evaluación del riesgo de la sobrecarga de nieve sobre las estructuras se derivan de la falta de datos, por lo que ha sido necesario acudir a un método indirecto de evaluación del equivalente en agua de la capa de nieve en función de los datos meteorológicos disponibles. La metodología empleada para llevar a cabo esta evaluación puede verse en detalle en secciones posteriores.

Los datos empleados en este trabajo han sido extraídos de la base de datos climatológica del INM. Esta base de datos está constituida a partir de las observaciones realizadas por la red de estaciones principales completas así como de estaciones termo-pluviométricas. La red de estaciones climatológicas del INM no efectúa medidas directas de espesor y densidad de precipitación acumulada en forma de nieve, únicamente registra en algunos puntos, dentro del conjunto de observaciones de precipitación, el número de días de nieve.

El método empleado para la configuración de la base de datos de precipitación equivalente en forma de nieve utiliza esta información, así como la información de días de nieve que consignan algunas estaciones. Este método consiste en la valoración de la precipitación diaria acumulada en las rachas de días sucesivos en los que la temperatura mínima extrema ha sido igual o inferior a  $0^{\circ}\text{C}$ . Se computa la precipitación registrada en cada una de las rachas en las que  $T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$  y, finalmente, se selecciona la racha en la que mayor cantidad de precipitación se ha acumulado, asignando el valor de precipitación acumulada en dicha racha como valor mensual acumulado de precipitación en forma de nieve. La figura 1 muestra, de manera esquemática, este procedimiento, teniendo en cuenta que la precipitación registrada en  $t$  corresponde a la acumulada en  $t-1$ . El gráfico corrige este desfase de manera que para  $t$  muestra tanto la temperatura mínima como la precipitación acumulada correspondientes. Al tratarse de la medida equivalente en agua de la cantidad de nieve acumulada, la conversión a valores de carga gravitatoria de nieve distribuida uniformemente es una operación directa multiplicando milímetros de precipitación por el valor de la gravedad ( $g = 9,8 \text{ ms}^{-2}$ ), ya que no requiere consideración alguna referente a la densidad de la nieve en función de la altitud.

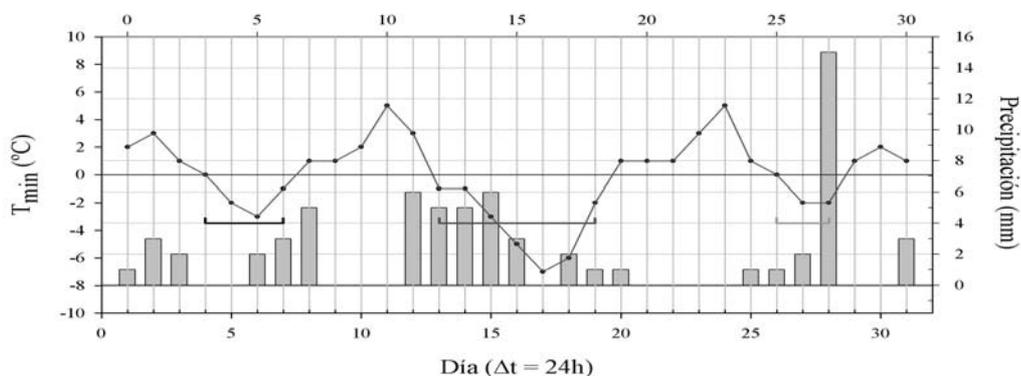


Fig. 1. Esquema del procedimiento empleado en el registro de temperatura mínima extrema y precipitación. Las barras sombreadas indican precipitación acumulada (eje de ordenadas derecha) en  $\Delta t = 24\text{h}$  (eje abcisas superior). La línea continua indica la evolución de la temperatura mínima extrema (eje de ordenadas izquierda) en  $\Delta t = 24\text{h}$  (eje abcisas inferior). Los segmentos señalan las rachas de  $T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$

La figura 2 muestra el proceso de formación de la base de datos de carga de nieve equivalente. Esta base de datos consiste inicialmente en 1936 series de datos cuyo registro consta de periodos temporales diferentes. Las series han sido sometidas a un exhaustivo control de calidad tras el cual ha sido preciso desechar aproximadamente el 40% de ellas. Finalmente, se cuenta con 1.024 series temporales de carga de nieve equivalente correspondientes a observatorios distribuidos de manera no uniforme en todo el territorio (Fig. 3).

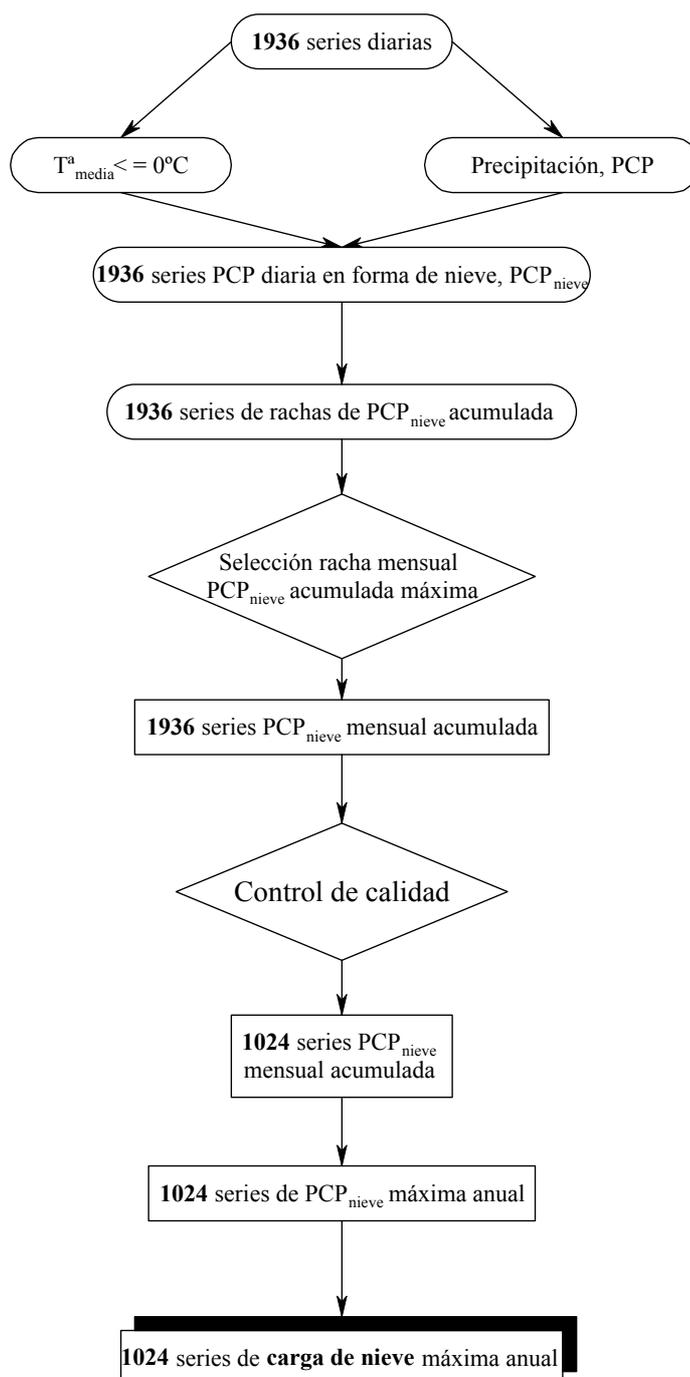


Fig. 2. Esquema de construcción de la base de datos de carga de nieve máxima anual acumulada



Fig. 3. Distribución espacial de la Red Nacional de estaciones termo-pluviométricas empleadas en la configuración de la base de datos de carga de nieve

### 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

La metodología empleada en este trabajo consta de dos fases. La primera de ellas determina el valor que toma cada variable para un período de retorno de 50 años, equivalente a una probabilidad anual de ocurrencia del 2%. En la segunda fase se han caracterizado los conjuntos de las series originales por su semejanza en el comportamiento que presentan en baja frecuencia en función de la altitud geográfica del observatorio sobre el nivel del mar, es decir, se definen zonas homogéneas de comportamiento de los valores extremos en baja frecuencia (períodos de retorno 50 años) en función de la altitud.

#### 3.1. Fase I: Estimación del valor extremo esperado para períodos de retorno de 50 años

Se plantea la utilización de la distribución de valores extremos Tipo I o ley de distribución de frecuencias de Gumbel (GUMBEL, 1958), ya que ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a valores extremos anuales para diferentes variables hidrológicas (BROWN y KATZ, 1995; LANA *et al.*, 1995; LANA y BURGUEÑO, 1996; KIEFFER y BOIS, 1997; KOUTOSOIANNIS, 2003).

La función de Gumbel se define de la siguiente manera:

$$F(x) = \exp \left[ -\exp \left( -\frac{x - x_0}{\alpha} \right) \right] \quad (3.1)$$

Desarrollando la expresión 3.1 se obtiene la variable reducida,  $y$ ,

$$y = \frac{x - x_0}{\alpha} = -\ln(-\ln F(x)) \quad (3.2)$$

donde  $\alpha$  y  $x_0$  son parámetros que se estiman a partir de los valores de la serie.

De esta manera, la relación entre la variable climática extrema y la variable reducida es lineal, y la función de distribución de probabilidades está definida para cualquier valor de la variable.

La distribución espacial de los valores esperados anuales de carga de nieve sobre una superficie horizontal obtenidos de la aplicación del modelo de Gumbel, para una probabilidad de ocurrencia anual del 2% pueden observarse en la figura 4.

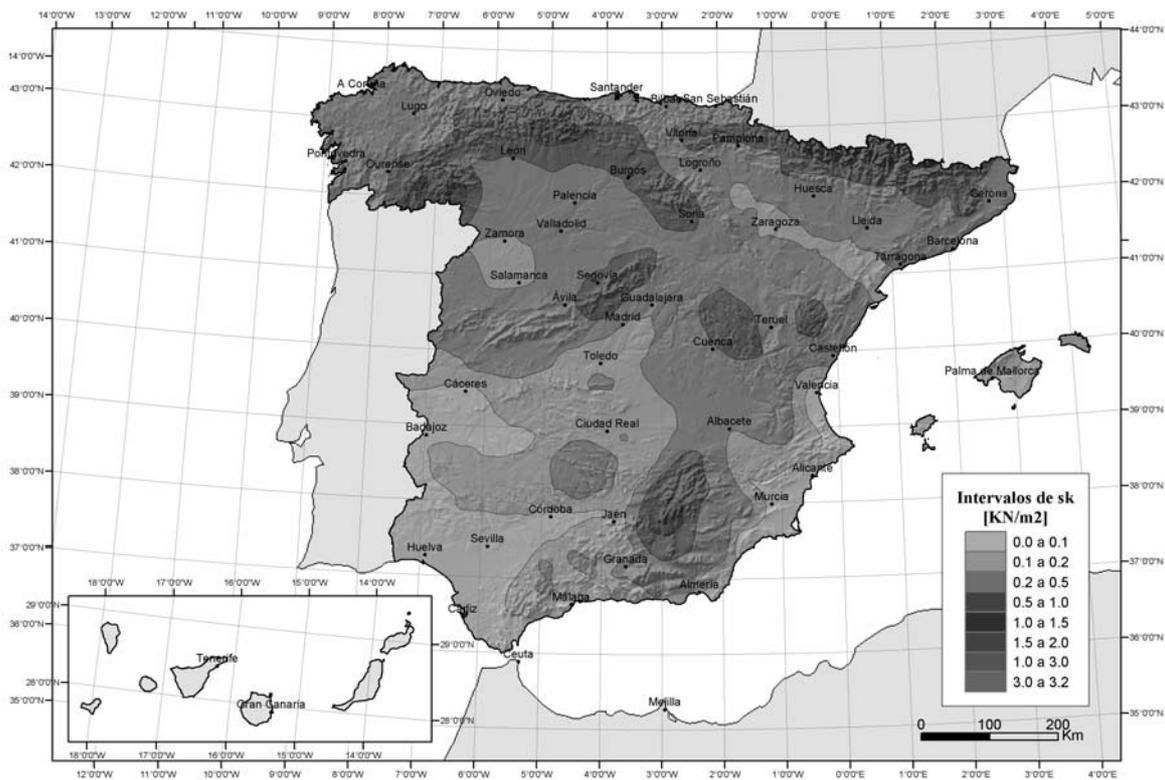


Fig. 4. Isoquonas de carga de nieve sobre una superficie horizontal,  $s$  [kN/m<sup>2</sup>], para períodos de retorno de 50 años

### 3.2. FASE II: Ajuste de los valores característicos esperados

La segunda fase del proceso consiste en la identificación de zonas de comportamiento homogéneo común de los valores característicos de carga de nieve en función de la altitud geográfica sobre el nivel del mar.

Con objeto de organizar de manera consistente los observatorios de comportamiento autosimilar, se han llevado a cabo experimentos de ajuste de la base de datos resultante de la fase anterior a diferentes funciones matemáticas con el fin de obtener las ecuaciones que determinen el comportamiento de la variable en función de la altitud en cada región. Para ello, se ha partido del trabajo realizado previamente para el Atlas Nacional de España (2003) en el que se incluye una descripción del comportamiento espacial del número medio anual de días de nieve. Esto permitirá tener capacidad para interpolar los valores característicos de carga de nieve,  $s_k$  [ $\text{kN/m}^2$ ], esperados en función de la altitud geográfica,  $A$  [m], dentro de una región en puntos espaciales donde no existe registro observacional. El estudio se realiza para las diferentes zonas climáticas de la Península Ibérica, Islas Baleares y Canarias así como Ceuta, Melilla.

En general, el valor característico de una acción climática se define como su principal valor representativo. Puede venir determinado por un valor medio, un valor nominal o, en los casos en los que se fije mediante criterios estadísticos, por su valor correspondiente a una determinada probabilidad de no ser superado durante un período de referencia (EHE, 1999). En este trabajo se asigna al valor característico de carga de nieve el valor medio esperado, estimado a partir de la distribución de frecuencias de Gumbel, para un período de retorno de 50 años. El valor característico de la carga de nieve ha sido ajustado a una función potencial de la forma:

$$s_k = X \cdot Y^A \quad (3.3)$$

donde  $s_k$  son los valores característicos de carga de nieve;  $A$  es la altitud geográfica y  $X$  e  $Y$  son valores constantes determinados en función de la región climática. El ajuste del valor característico de la carga de nieve a una función potencial ha sido realizado en estudios previos por diversos autores (PEINADO y ALMARZA, 1984; ISO 4355, 1981).

Se han identificado 7 zonas de comportamiento homogéneo de las variables estudiadas en función de la altitud geográfica sobre el nivel del mar de cada observatorio (Fig. 5). Estas zonas comprenden áreas de comportamiento climático similar y son las siguientes:

- **Zona 1:** Macizo Galaico, Cordillera Cantábrica, Montes de León y Montes Vascos.
- **Zona 2:** Pirineos, Depresión del Ebro, flanco norte del Sistema Ibérico y Cordillera Costero Catalana.
- **Zona 3:** Depresión del Duero, flanco norte del Sistema Central y flanco suroeste del Sistema Ibérico.
- **Zona 4:** Flanco sur del Sistema Central, Depresión del Tajo y Montes de Toledo.
- **Zona 5:** Flanco sureste del Sistema Ibérico, costa levantina y Archipiélago Balear.
- **Zona 6:** Sierra Morena, Depresión del Guadalquivir, Cordilleras Béticas, Ceuta y Melilla.
- **Zona 7:** Archipiélago Canario.



Fig. 5: Zonas para la determinación de los valores característicos de carga de nieve  $s_k$  [ $\text{kN/m}^2$ ], en función de la altitud geográfica [m]

La tabla 1 muestra las funciones que rigen el comportamiento en función de la altitud de los valores característicos de carga de nieve, tal como se ha definido en la sección anterior, sobre una superficie horizontal con probabilidad anual de ocurrencia del 2%.

Tabla 1: Funciones que representan por zonas el comportamiento del valor característico de la carga de nieve ( $s_k$ ) en función de la altitud geográfica ( $A$ );  $A_{\text{max}}$ : altitud máxima de aplicación de la función;  $vT$ : valor característico de la carga de nieve para  $A > A_{\text{max}}$

	FUNCIÓN [ $\text{kN/m}^2$ ]	$A_{\text{max}}$ [m]	$vT$ [ $\text{kN/m}^2$ ]
ZONA 1	$s_{1k} = 0.148 \times (1.0016)^A$	1600	2,78
ZONA 2	$s_{2k} = 0.146 \times (1.0014)^A$	2200	2,94
ZONA 3	$s_{3k} = 0.0459 \times (1.0021)^A$	1800	2,82
ZONA 4	$s_{4k} = 0.0387 \times (1.0022)^A$	1600	1,48
ZONA 5	$s_{5k} = 0.0777 \times (1.0016)^A$	1600	1,33
ZONA 6	$s_{6k} = 0.0247 \times (1.0026)^A$	1800	1,68
ZONA 7	NO EXISTEN DATOS	1800	1,91

Las funciones expuestas solo pueden aplicarse hasta un valor de altitud máximo determinado, ya que la precipitación para altitudes geográficas extremas no sigue un comportamiento potencial. Las funciones han sido, por tanto, truncadas en la altitud máxima en cada zona para la que se tiene registro, de manera que para puntos espaciales situados en altitudes superiores a la altitud máxima de aplicación de la función ( $A > A_{\max}$ ), el valor característico de carga de nieve se considerará constante y corresponderá al valor del parámetro  $vT$  (valor truncado).

La interpolación espacial de los valores característicos de carga de nieve sobre una superficie horizontal se ha llevado a cabo aplicando, para cada zona climática, la función definida que relaciona la variable con la altitud geográfica de cada punto. No obstante, se ha mejorado la interpolación mediante un método indirecto consistente en la aplicación de un modelo de regresión múltiple entre la variable climática estimada y diversos parámetros fisiográficos, tales como la altitud, la latitud y la distancia al mar. Posteriormente se interpolan las anomalías o residuos mediante *kriging* (DEUTSCH y JOURNAL, 1992) y el campo interpolado se suma al estimado mediante la aplicación del modelo de regresión al modelo digital del terreno. Esta técnica de interpolación no introduce sesgo agregado y se basa en la premisa de que la variación espacial continúa con el mismo patrón. En este sentido ALMARZA y GUTIÉRREZ-MARCO (2001), han desarrollado diversos métodos de interpolación espacial o, lo que es lo mismo, de estimación de valores en puntos donde no hay datos de observación para describir espacialmente el comportamiento de una variable climatológica susceptible de georreferenciar.

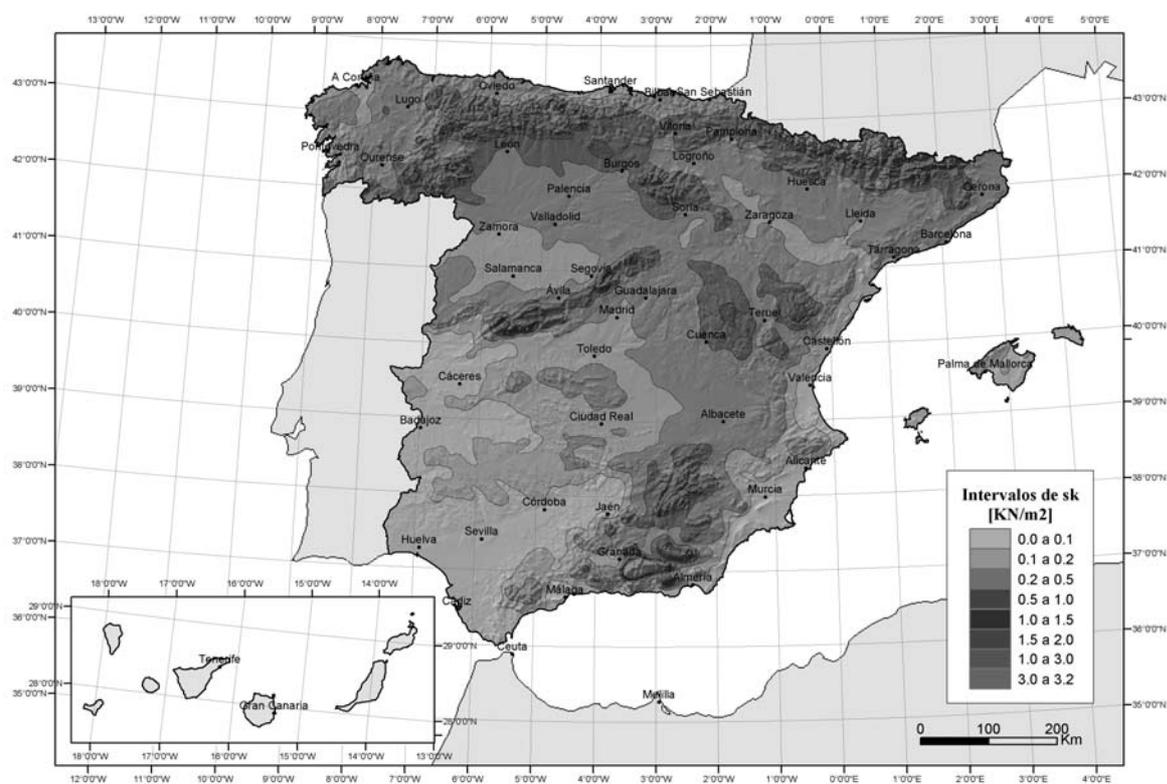


Fig. 6. Isoquionas obtenidas mediante la interpolación por zonas con las funciones determinadas en la tabla 1 de los valores característicos de carga de nieve sobre una superficie horizontal,  $s_k$  [ $\text{kN/m}^2$ ], en función de la altitud geográfica

Se han aplicado modelos de regresión diferentes para las Islas Canarias, Península Ibérica e Islas Baleares, obteniéndose, de este modo, mapas de mayor calidad y detalle, ya que este método suple en cierta medida la insuficiente densidad de estaciones típica de las zonas de montaña. La figura 6 muestra la distribución de isoquionas mediante la interpolación por zonas de los valores característicos de carga de nieve a partir de las funciones determinadas en la tabla 1.

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente estudio se muestran resultados altamente coherentes, y notablemente detallados distinguiéndose 7 zonas de comportamiento climático homogéneo siguiendo criterios climáticos regionales. Asimismo, las funciones elaboradas para cada una de las zonas identificadas se ajustan de manera realista al comportamiento empírico de la carga máxima de nieve sobre una superficie horizontal esperada para períodos de retorno de 50 años, frente a la altitud geográfica. De esta manera, el estudio realizado aporta información necesaria en el ámbito de la ingeniería civil de la que hasta ahora no se disponía.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto más amplio llevado a cabo al amparo del acuerdo suscrito entre el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC). Asimismo, los autores agradecen a los integrantes del equipo de Desarrollos Climatológicos su inestimable colaboración en la obtención de los datos.

#### 6. REFERENCIAS

- ALMARZA, C. y GUTIÉRREZ-MARCO, E. (2001). El Sistema de Información Geográfica con fines climatológicos del Instituto Nacional de Meteorología. En: *XIV Congreso Internacional de Climatología*.
- ATLAS Nacional de España*. (2003). Fascículo de Climatología, Instituto Geográfico Nacional. (en prensa).
- BROWN, B.G. and KATZ, R.W. (1995). "Regional analysis of temperature extremes: Spatial analog for climate change?". *J. Climate*, 8, pp. 108-119.
- DEUTSCH, C.V y JOURNEL, A.G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, Oxford, 340 pp.
- DGIII – D3. Commission of the European Communities (1999). *Scientific support activity in the field of structural stability of civil engineering works snow loads*. Contract nº 500990. Final Report. University of Pisa.
- EHE Instrucción de Hormigón Estructural*. (1999). Ministerio de Fomento, Secretaria General Técnica.
- GUMBEL, E.J. (1958). *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, 375 pp.
- ISO 4355. Norme Internationale (1981). *Bases du calcul des constructions- Détermination de la charge de neige sur les toitures*. Première édition 1981-08-15. Organisation internationale de normalisation.
- KIEFFER, A. and BOIS, P. (1997). "Variability of the statistical characteristics of extreme rainfall values in the French Alps". *Rev. Sci. Eau*, 10 (2), pp. 199-216.
- KOUTOSOYIANNIS, D. (2003). On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. En: *Proceedings of the ESF LESC Exploratory Workshop held at Bologna*.

- LANA, X.; FERNÁNDEZ-MILLS, G. and BURGUEÑO, A. (1995). "Extreme winter minimum temperatures in Catalonia (North-East Spain): Expected values and their spatial distribution". *Int. J. Climatol.*, 15, pp. 341-354.
- LANA, X. and BURGUEÑO, A. (1996). "Extreme winter minimum temperatures in Catalonia (North-East Spain): Expected values and their spatial distribution". *Int. J. Climatol.*, 16, pp. 1365-1378.
- Norma MV 101-1962. Acciones en la edificación. Decreto 195/1963, de 17 de Enero.
- PEINADO, A. y ALMARZA, C. (1984). *Notas para una climatología de la nieve y bases para un estudio de la cobertura nivosa invernal en España*. Serie A-88, Instituto Nacional de Meteorología.
- ROM 0.4-95. (1995). *Acciones climáticas II: viento*. Recomendaciones para obras marítimas. Puertos del Estado.