

# Modelización espacial del régimen bioclimático medio en la Comunidad Autónoma de Madrid mediante la aplicación de la temperatura fisiológica equivalente (PET)

REVISTA **MAPPING**  
Vol. 26, 183, 20-29  
mayo-junio 2017  
ISSN: 1131-9100

*Spatial modeling of mean bioclimatic regime in the Comunidad Autónoma de Madrid by applying physiological equivalent temperature (PET)*

Alfredo Millán López, Victor Lallana Llorente

## Resumen

El análisis espacial de los valores mensuales del índice PET, calculados para la Comunidad Autónoma de Madrid, se realiza mediante la elaboración de una cartografía bioclimática. Esta cartografía permite identificar los sectores donde hay un mayor riesgo de sufrir estrés térmico y, por el contrario, los sectores donde hay una mayor probabilidad de situaciones de confortabilidad termofisiológica. Por lo tanto, este tipo de cartografía se transforma en una herramienta imprescindible para comprender las condiciones térmicas y las situaciones de estrés a las que están expuestas las personas en determinadas regiones, y así poder planificar actuaciones dirigidas a paliar los efectos negativos de estas situaciones.

Los resultados muestran una característica fundamental de la distribución espacial de los valores calculados de PETmax y PETmin: una considerable heterogeneidad de estos valores, tanto máximos como mínimos, pese a la limitada extensión territorial del ámbito de estudio. Esta variabilidad espacial de las condiciones termofisiológicas se debe a un factor principal: las características y disposición del relieve que modifican los rasgos generales de las condiciones de confort térmico.

## Abstract

The spatial analysis of the monthly values of the PET index, calculated for the Comunidad Autónoma de Madrid, is made by the development of a bioclimatic cartography. This mapping allows the identification of the sectors where there is a greater risk of thermal stress and, on the other hand, the sectors where there is a greater probability of situations of thermophysiological comfort. Therefore, this type of mapping becomes an essential tool to understand the thermal conditions and stress situations to which people are exposed in certain regions, and to be able to plan actions aimed at alleviating the negative effects of these situations

The results show a fundamental characteristic of the spatial distribution of the calculated values of PETmax and PETmin: a considerable heterogeneity of these values, both maximum and minimum, in a Community with territory of limited proportions. This spatial disparity of the thermophysiological conditions is due to a main factor: the topographic characteristics and the layout of the relief that modify the general features of the thermal comfort conditions.

**Palabras clave:** modelo bioclimático, modelización espacial, PET, Comunidad Autónoma de Madrid, confort.

**Keywords:** bioclimatic model, spatial modeling, PET, Comunidad Autónoma de Madrid, confort..

Doctorando en Geografía Física, Departamento de Geografía,  
Universidad Autónoma de Madrid, Grupo Geoclima  
[millan330@msn.com](mailto:millan330@msn.com)

Profesor ayudante, Departamento de Geografía, Urbanismo y  
Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria  
[v.lallana.llorente@gmail.com](mailto:v.lallana.llorente@gmail.com)

Recepción 17/01/2017  
Aprobación 21/03/2017

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo científico de la climatología aplicada se realizan diferentes y numerosas investigaciones donde se requiere el análisis y evaluación del componente térmico del clima, por ejemplo, en la planificación urbana o regional, así como en el turismo y la medicina ambiental (Matzarakis et al, 1999). En este sentido, desde la bioclimatología se estudia las relaciones causa-efecto entre el medio ambiente atmosférico, el confort climático y la salud de las personas, teniendo en cuenta, el complejo térmico<sup>(1)</sup>, el complejo de la contaminación del aire<sup>(2)</sup> y el complejo actínico<sup>(3)</sup> (Matzarakis et al, 2008). En este estudio se plantea la caracterización de las condiciones del confort climático, que influyen directamente en el confort termofisiológico de las personas en la Comunidad Autónoma de Madrid, con el análisis del complejo térmico mediante la aplicación del índice bioclimático PET (Physiological Equivalent Temperature), «uno de los índices que está alcanzando mayor difusión en el contexto de la bioclimatología europea. Ello supone potenciar la componente bioclimática, con especial preferencia hacia la evaluación del impacto termofisiológico del entorno atmosférico» (García F. et al, 2012, p.86).

La propuesta de este estudio es realizar una aproximación sintética de las condiciones climáticas naturales del clima regional madrileño, que van a influir directamente sobre el confort climático de las personas (también denominado estrés térmico). Este estrés térmico se explica cómo la interacción entre los procesos atmosféricos y el ser humano, ya que «la atmósfera es la parte del entorno con el cual el organismo humano está en permanente estado de adaptación debido a las continuas variaciones que sus componentes presentan, tanto los relacionados con el complejo térmico (radiación, temperatura, humedad y viento), como con el conjunto químico que constituyen los diversos componentes del aire» (García F. et al, 2012, p.87).

Por lo tanto, nos marcamos como objetivo caracterizar el régimen bioclimático medio de la Comunidad Autónoma de Madrid, siendo el primer trabajo de investigación donde se determinan y se representan en mapas, mediante la aplicación y generación de un Sistema de Información Geográfica, las condiciones de confort termofisiológico del territorio madrileño. Esta caracterización, que se realiza mediante el análisis del índice bioclimático PET, nos permite «cuantificar las sensaciones térmicas y

establecer escalas que permitan determinar las respuestas de la persona ante unas condiciones climáticas específicas» (García F. et al, 2012, p.89). Lo que se pretende con este tipo de análisis es conocer el estrés térmico al que se encuentran expuestas las personas, siendo una importante herramienta que facilita el desarrollo y puesta en marcha de medidas dirigidas a la protección de la salud y el bienestar (Royé et al, 2011).

## 2. MATERIAL

Los materiales empleados en este estudio han supuesto una valiosa fuente de información climática, que ha permitido la obtención de índices sintéticos capaces de expresar las sensaciones térmicas experimentadas por el organismo humano. Para calcular el año bioclimático medio de la Comunidad Autónoma de Madrid se obtuvieron datos climáticos (2001-2010) de observatorios o estaciones meteorológicas (48 en total) localizadas dentro del territorio madrileño (Figura 1) pertenecientes a distintos organismos públicos: estaciones meteorológicas de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología);

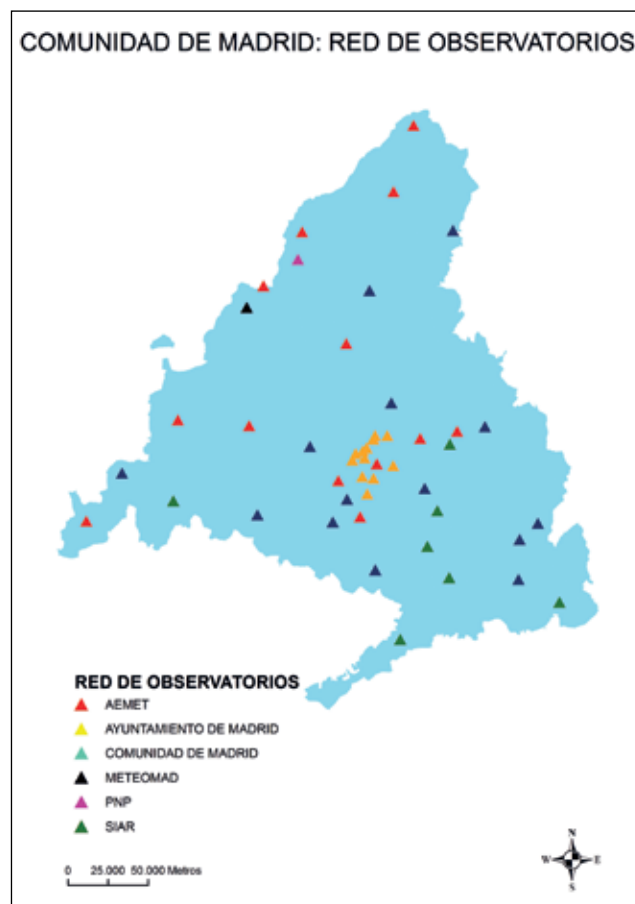


Figura 1. Distribución de la red de observatorios utilizados en la elaboración del estudio. Elaboración propia

<sup>(1)</sup>El complejo térmico comprende los elementos meteorológicos que tienen un efecto termofisiológico en los seres humanos

<sup>(2)</sup>El complejo de contaminación del aire comprende contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos, naturales y antropogénicos, que tienen un efecto sobre la salud humana.

<sup>(3)</sup>El complejo actínico comprende el espectro visible y ultravioleta de la radiación solar que tiene un efecto biológico directo.

estaciones de medición de contaminación del Sistema Integral de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid; red de estaciones de la Comunidad de Madrid; estación meteorológica de METEOMAD; estaciones meteorológicas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medioambiente) y estaciones meteorológicas del Parque Natural de Peñalara (PNP).

### 3. MÉTODO

La metodología llevada a cabo a partir de los datos climáticos recogidos se ha basado inicialmente en el cálculo del índice PET, empleando para ello la aplicación informática del modelo RAYMAN PRO, desarrollada por Matzarakis y Rutz en el 2010 a partir de la versión anterior (2005). Una vez calculados los índices PET, se elaboró cartografía bioclimática empleando el software SIG Arcgis 10 mediante modelos de interpolación.

#### 3.1. Cálculo del índice PET

Para su cálculo se han tenido en cuenta dos tipos de parámetros: parámetros ambientales y parámetros personales. Dentro de los parámetros ambientales se utilizan variables climáticas y variables geográficas:

- a) Las variables climáticas utilizadas son:
  - Temperatura (Temperatura máxima y mínima, expresada en grados centígrados °C)
  - Velocidad el viento (medida a las 7 y 18 horas en m/s)
  - Humedad relativa media diaria (máxima y mínima)
  - Nubosidad media (octas)
  - Radiación solar (W/m<sup>2</sup>)
- b) Las variables geográficas utilizadas son:
  - Latitud
  - Longitud
  - Altitud sobre el nivel del mar

Todos estos parámetros se completan con la incor-

poración de la temperatura radiante media (a partir de ahora Tmrt)<sup>(4)</sup>:

- a) En el cálculo de la PET mínima se utiliza la Tmrt igual a la temperatura del aire.
- b) El cálculo de la PET máxima se realiza a partir de dos supuestos: la PET máxima calculada con Tmrt igual a la temperatura del aire (Tmrt=Ta) y la PET máxima calculada con Tmrt obtenida con el modelo RAYMAN (Tmrt≠Ta). Los umbrales de la sensación de confortabilidad térmica de la PET máxima se calculan obteniendo la media de las dos opciones (García F. et al, 2012).

Los parámetros personales se componen de:

- Persona de 35 años
- Género masculino
- 1.75 metros de altura
- 75 kilogramos de peso
- Aislamiento de la ropa: 0,90 clo<sup>(5)</sup>
- Actividad reducida a un paseo tranquilo, 4 km/h, y en terreno llano, lo que representa una producción de calor interno equivalente a 2 met<sup>(6)</sup>.

En la tabla 1 se muestran los valores del índice PET en diferentes ambientes: esta tabla nos indica que en un espacio interior las condiciones en las que se da la neutralidad térmica o la sensación de confort con una PET de 21°C (Höppe, 1999) se corresponden a:

- Temperatura media radiante igual a la del aire
- Una velocidad del viento de 0,1 m/s
- Una humedad relativa del 50%

En la tabla 1 también se puede observar cómo con los cambios en la temperatura del aire, el índice PET experimenta desviaciones importantes. Por ejemplo: en un día de verano al sol con 30 °C de temperatura, la temperatura radiante puede alcanzar 60 °C y el valor del índice los 43°C; si ambas temperaturas se igualan, la del aire y la radiante, el índice desciende a 29 °C en un día de verano a la sombra (García F. et al, 2012). Por lo tanto, la inclusión de la temperatura radiante en el índice PET es indispensable para su aplicación en espacios abiertos, donde la tempe-

	T °C	Tmr °C	V m/s	Vp hPa	PET °C
En espacio interior	21	21	0.1	12	21
Invierno al sol	-5	40	0.5	2	10
Invierno a la sombra	-5	-5	5	2	-13
Verano al sol	30	60	1	21	43
Verano a la sombra	30	30	1	21	29

Tabla 1. Valores de la PET en diferentes ambientes. Elaboración propia a partir de Höppe 1999. (T: temperatura; Tmrt: temperatura radiante media; V: velocidad del viento; Vp: presión vapor del agua; PET: Temperatura Fisiológica Equivalente)

<sup>(4)</sup>Índice que calcula el aislamiento térmico que genera la vestimenta

<sup>(6)</sup>Met: unidad de medida del índice metabólico que se define como la cantidad de calor emitido por una persona en posición de sentado por metro cuadrado de piel.

ratura del aire y muy especialmente en los días cálidos de verano, no es suficiente para diferenciar los matices relacionados con los diferentes usos del suelo (Höppe, 1999). Numerosos estudios llevados a cabo en diferentes ciudades europeas (Matzarakis et al, 1999; Andrade, 2008; Jendritzky et al, 2002; Friedrich et al, 2001; Matzarakis y Rutz, 2005; Gulyas et al, 2003) dejan patente el beneficio e importancia de la temperatura radiante «para caracterizar los matices bioclimáticos que se producen dentro de las ciudades como consecuencia de los diversos materiales, usos del suelo y estructuras que aparecen en ella» (García et F. al, 2012, p.92).

Para constituir escalas de sensaciones térmicas se crean umbrales a partir de los rangos del PET establecidos por Matzarakis y Mayer (1996) en su trabajo sobre clima, confort térmico y turismo. Estos rangos establecen diferentes grados de percepción térmica y estrés fisiológico en los seres humanos [tabla 2] basados en valores en los que se produce el equilibrio térmico. Se fija la escala absoluta entre 18°C y 23 °C siguiendo las recomendaciones del Grupo 6 de la Sociedad Biometeorológica Internacional (IBS), intervalo en el que se produce la neutralidad térmica, es decir, la confortabilidad térmica. Este intervalo se fija a partir del modelo Fiala (2001) donde una PET de 18 °C constituye el umbral inferior de confort (LCC, Lower Constant Comfort) y 23°C es el umbral superior o UCC (Upper Constant Comfort). El PET inferior a 18 °C representa el comienzo de la sensación térmica de frío; el PET superior a 23°C representa el comienzo de la sensación térmica de calor.

La caracterización general del régimen bioclimático medio de la Comunidad Autónoma de Madrid se realiza mediante un análisis espacial, a partir de la realización de distintos mapas que permiten la visualización de la distribución espacial de los distintos valores del régimen bioclimático medio (mapas de la distribución estacional). Este tipo de análisis espaciales permite una comprensión

fácil y rápida de este tipo de caracterizaciones bioclimáticas, que incluyen una amalgama inmensa de datos de difícil interpretación. Este análisis se realiza a partir de los resultados del cálculo del valor medio de los diferentes umbrales de confort correspondientes a cada uno de los 365 días del año (año juliano), para PETmax y PETmin por estación meteorológica, a partir de los cuales se obtienen los valores medios estacionales (García F. et al, 2012).

### 3.2. Modelización de los valores PET

En la elaboración de la cartografía bioclimática se utiliza el SIG comercial Arcgis 10, representando los valores estacionales de PETmax y PETmin. Esta representación se realiza a partir de los valores del índice PET y la creación de una base de datos relacionada.

La información generada en la base de datos es una información puntual, relacionada con las estaciones meteorológicas, o puntos de observación. Sin embargo, uno de los rasgos fundamentales del clima de la Comunidad de Madrid es la variabilidad espacial de las condiciones de confort climático. Este es un problema general en climatología que se trata de solucionar a partir de la modelización espacial, proceso que constituye la base de todo estudio climático. El análisis espacial de estos datos puntuales exige un proceso de transformación, que permita describir las relaciones con otras variables geográficas, determinar los principales parámetros de la correlación y elaborar un modelo de distribución a partir de estos parámetros. En este caso hemos aplicado una combinación de técnicas estadísticas de regresión lineal entre el índice bioclimático y las variables geográficas, y técnicas geoestadísticas para la interpolación de los resultados (García F. y Millán, 2012). En el proceso de modelización se utilizan archivos shapefile (formato vectorial de almacenamiento digital) donde se guarda la localización de los elementos geográficos y los atributos asociados a ellos, y se incorpora

PET(°C)	SENSACIÓN TÉRMICA	NIVEL DE ESTRÉS
Sup. 41	Muy cálido (Bochornoso)	Extremo
35 a 41	Caluroso (muy cálido)	Fuerte, intenso
29 a 35	Cálido (caluroso)	Moderado
23 a 29	Ligeramente cálido(cálido)	Ligero
18 a 23 (LCC y UCC)	Confortable	Nulo
13 a 18	Ligeramente frío(suave)	Ligero
8 a 13	Fresco	Moderado
4 a 8	Frío	Fuerte, intenso
Inf. 4	Muy frío	Extremo

Tabla 2. Umbrales absolutos de la temperatura fisiológica, basado en el modelo de balance energético. Elaboración propia a partir de Matzarakis y Mayer (1996)

un Modelo Digital de Elevaciones (archivo de tipo raster). El desarrollo de la modelización espacial consta de los siguientes pasos (García F., 2007):

Generación de una base de datos relacional en ArcGIS: compuesta por tres variables:

- climática: se incorporan las variables climáticas que influyen en el modelo climático-turístico a partir de las cuales se calcula el índice PET.
- geográficas: coordenadas UTM y altitud.

A su vez se incorpora un campo identificador con los datos de los observatorios: ID, nombre y red a la que pertenece.

- a) Modelización espacial: aplicación de técnicas estadísticas. Estas técnicas permiten evaluar las relaciones existentes entre los índices bioclimáticos y los parámetros geográficos. En este caso utilizamos una herramienta de correlación-interpolación, *Spatial Analyst-Interpolation*, que consiste en pronosticar valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra (ARCGIS RESOURCES).
- b) Resultado de la modelización espacial: representación cartográfica de los resultados del índice PET, utilizado en el análisis y caracterización del año bioclimático medio.

El proceso de desarrollo de la modelización espacial consta de los siguientes pasos (García, F, 2007):

- 1) Cálculo de las ecuaciones de regresión: se trata de calcular la relación que existe entre las variables climáticas y las geográficas a partir de una regresión lineal simple donde: la variable independiente o predictora (x) es la altitud; la variable dependiente (y) es la variable bioclimática (índice PET) cuya distribución espacial depende de la anterior:

$$y = a * x + b$$

a y b son dos parámetros calculados por el modelo:

a es la intersección

b es la pendiente e indica el ritmo de variación de una respecto a la otra.

La correlación entre la variable predictora (altitud) y la variable dependiente PET es la siguiente:

	Coef. R <sup>2</sup>
PETMAX	0,83
PETMIN	0,39

- 2) A partir de estos resultados se calculan dos nuevas variables:

- Variable calculada: a partir de la función de regresión:

$$VC = x + (b * z)$$

Donde VC es la variable calculada; (x) es el valor que toma la variable dependiente PET; (b) es la pendiente de la recta, en este caso el gradiente altitudinal; (z) la altitud del observatorio.

- Variable de los valores residuales: la distribución de los residuales debería mostrar una tendencia aleatoria; en caso contrario (concentración en un área) pueden indicar anomalías positivas o negativas relacionadas con factores microclimáticos. Se calcula a partir de la función:

$$MP = x + (b * MDE)$$

Donde VR es variable residual; V variable climática; VC variable calculada

A partir de estas variables se obtienen el mapa potencial y el mapa de valores residuales, a partir de los cuales se obtiene el mapa definitivo:

- 3) Obtención del mapa potencial (MP): partiendo de las coordenadas de localización X e Y de los diferentes observatorios, se calcula la función de regresión incorporando para el cálculo un archivo raster con el MDE (modelo digital de elevaciones). Se utiliza la herramienta *Map algebra-raster calculator* incluida dentro de la extensión *Spatial Analyst*, donde se integra la fórmula:

$$MP = x + (b * MDE)$$

Donde MP es el mapa potencial; (x) es el valor que toma la variable dependiente PET; (b) es el gradiente altitudinal; MDE es el modelo digital de elevaciones

- 4) Obtención del mapa de residuales (MA): se elabora a partir de la interpolación de los valores residuales. La interpolación se realiza mediante la distancia inversa ponderada (IDW) que determina los valores de celda a través de una combinación ponderada lineal de un conjunto de puntos de muestra. Posteriormente los valores calculados se han recortado y ajustado al territorio de la CAM.
- 5) Obtención del mapa definitivo: es el resultado de la agregación del mapa potencial y el mapa de anomalías.

$$MD = MP + MA$$



## 4. RESULTADOS

La caracterización del año bioclimático medio de la Comunidad Autónoma de Madrid presenta una elevada heterogeneidad que responde a ciertos factores que definen el clima madrileño. Un primer factor, lo constituye tanto su localización latitudinal, que encuadra sus caracteres climáticos anuales dentro de un régimen de clima mediterráneo, como su posición geográfica interior en la Península Ibérica, que introduce un importante grado de continentalidad. Un segundo factor sería el definido por la variable altitud, que establece un marcado gradiente climático entre las áreas ubicadas a mayor altitud, frente a aquellas del interior de la cuenca del Tajo. Ambos factores definitorios del clima regional se encuentran fuertemente influenciados en esta región, por la perturbación que supone el espacio urbanizado de la ciudad de Madrid y su área metropolitana, introduciendo fuertes anomalías en el clima regional, más apreciables en la ciudad de Madrid. Son principalmente estos tres factores y su influencia como modificadores de los registros térmicos climáticos, los que van a definir los niveles de confortabilidad o estrés térmico que soportan los habitantes a lo largo del año.

Los modelos de cartografía bioclimática generados para la Comunidad de Madrid, con los cálculos de PETmax y PETmin, presentan en sus valores una notable heterogeneidad territorial con un marcado gradiente NW-SE. Esta diferencia en las condiciones termofisiológicas, parece estar controlado principalmente por factores topográficos como la altitud, anteriormente comentado, que introduce una fuerte variación altitudinal entre la Cuenca del Tajo (430 m) y las áreas de montaña y cumbres (2400 m), la propia orientación del relieve y los valles fluviales, y las anomalías que introduce el núcleo urbano de Madrid. Se aprecia de igual modo, diferencias este-oeste especialmente marcadas en el ámbito sur de la Comunidad Autónoma.

La heterogeneidad en los valores de la PET, parecen variar de un sector suroeste donde los valores tanto diurnos como nocturnos son más elevados, frente a una zona este-sureste donde se produce una acusada disminución de los mismos, especialmente en sus valores nocturnos. Los espacios de piedemonte y plataforma suponen franjas lineales de transición norte-sur, entre el sector de depresión de la cuenca y valles fluviales próximos al Tajo y los de montaña y cumbres, estos últimos de valores extremos invernales y suaves estivales, matizados según vertientes.

### Invierno

Los modelos climáticos implementados de los valores de PET para la estación invernal (Figura 2), muestran los patrones de distribución tanto norte-sur como este-oeste ya comentados. Los valores diurnos (PETmax) alcanzan un gradiente máximo de 16 °C, manteniendo los valores de PET en niveles de estrés moderado y con sensación

térmica fresca en las zonas más bajas del interior de la depresión del Tajo y valles intracuenca, agudizándose las condiciones de estrés de un modo intenso y fuerte con sensación térmica de frío en las zonas de transición y montaña, alcanzándose niveles extremos en las áreas de cumbre.

Los registros de PETmin por su parte, presentan valores inferiores a 4 °C, que suponen niveles de sensación y estrés térmico de frío extremo y muy intenso en toda la Comunidad (inferior a 4 °C), haciéndose notable el efecto de isla de calor que supone el núcleo urbano de Madrid y la reducción gradual de la temperatura desde el centro.

### Primavera

El modelo bioclimático de esta estación muestra las mismas pautas anteriores, aunque con un tránsito más brusco y marcado en las condiciones del PET entre el piedemonte y la cuenca (Figura 3). La amplitud térmica recogida en el PETmax de primavera alcanza los 21 °C, entre las máximas recogidas al sur (26 °C) ligeramente desplazadas del núcleo urbano de la ciudad de Madrid, y las mínimas del sector de cumbres (5 °C). Durante este periodo los niveles de sensación térmica de confort y estrés pasan a ser ya ligeramente cálidos en torno a la ciudad de Madrid, y de sensación de confort térmico y niveles nulos de estrés en la periferia metropolitana, especialmente al norte, este y oeste. En la zona serrana y de transición, se mantiene aún una sensación térmica de ligero frío, que llega a alcanzar estrés fuerte e intenso a medida que aumentamos en altitud.

Por su parte, los registros de PETmin siguen presentando una sensación térmica fresca, con niveles de estrés moderados en las zonas centro y sur de la comunidad, alcanzando niveles fuertes en el piedemonte y zonas de transición, y valores extremos en las cumbres. De nuevo, especialmente en los valores de PETmin se hace notable el efecto isla de calor en la atenuación de los niveles de estrés térmico de las mínimas, en este caso hacia condiciones más confortables.

### Verano

El modelo bioclimático estival calculado muestra los mayores niveles de desconfort, relacionado con el aumento significativo de las temperaturas, reflejando los valores máximos anuales tanto de PETmax y PETmin (Figura 4). Los valores medios del PETmax alcanzan valores que superan los 31 °C en el interior de la cuenca, generando sensaciones térmicas muy cálidas y situaciones de estrés térmico que alcanza niveles moderados especialmente en el área metropolitana y periférica a la ciudad Madrid, mientras que llegan a ser de estrés fuerte e intenso en el interior de la ciudad y zona sur. Por su parte el sector

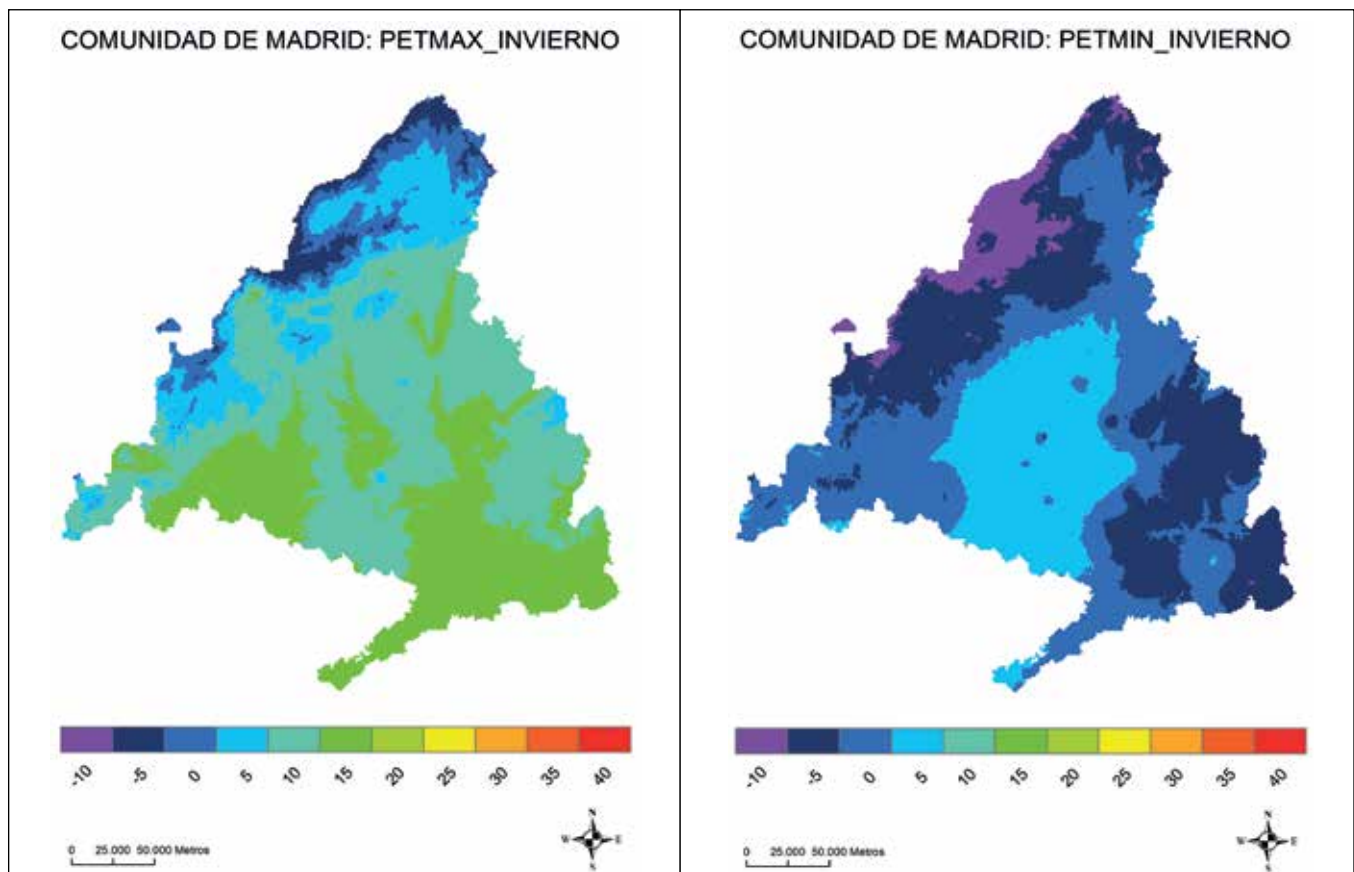


Figura 2. Distribución espacial de la PETmax y PETmin en invierno.

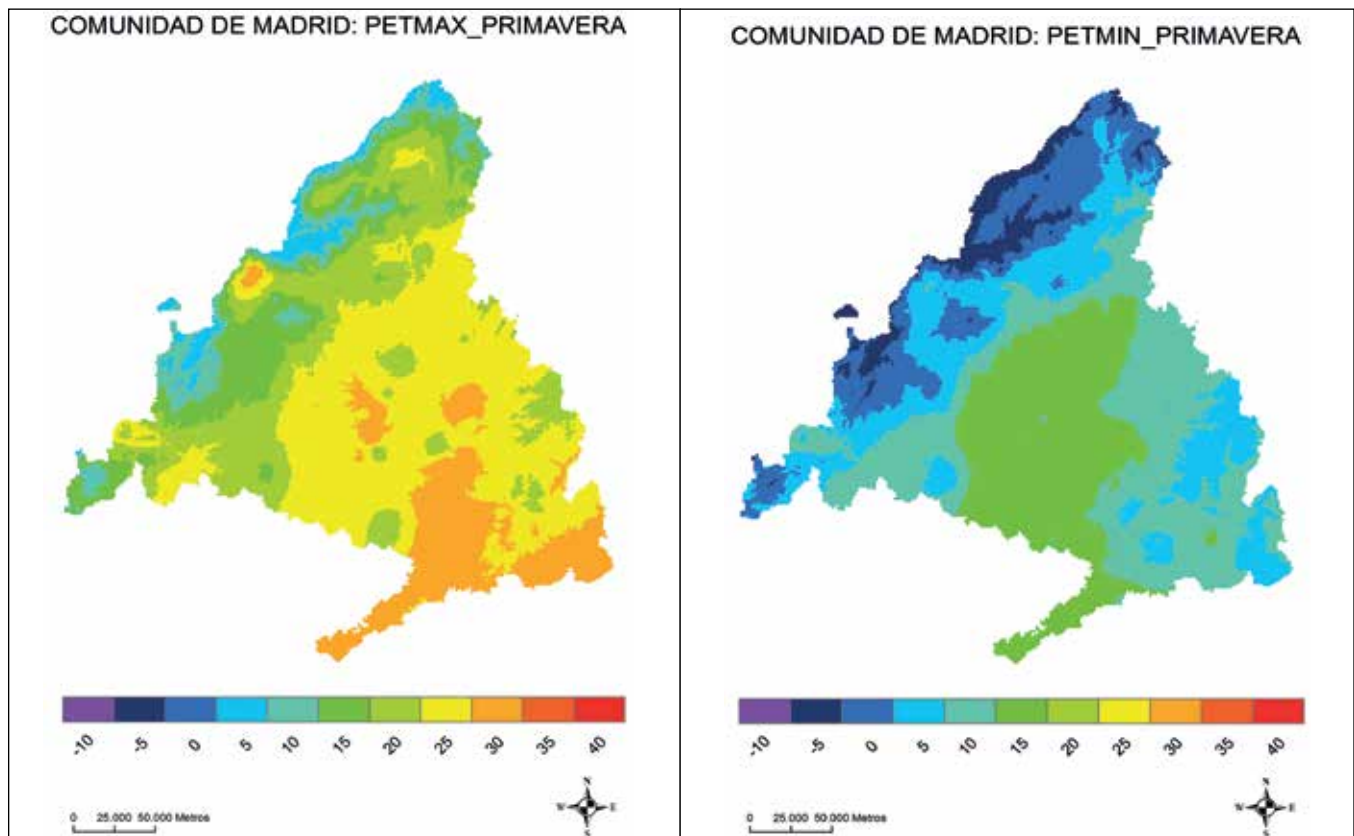


Figura 3. Distribución espacial de la PETmax y PETmin en primavera.

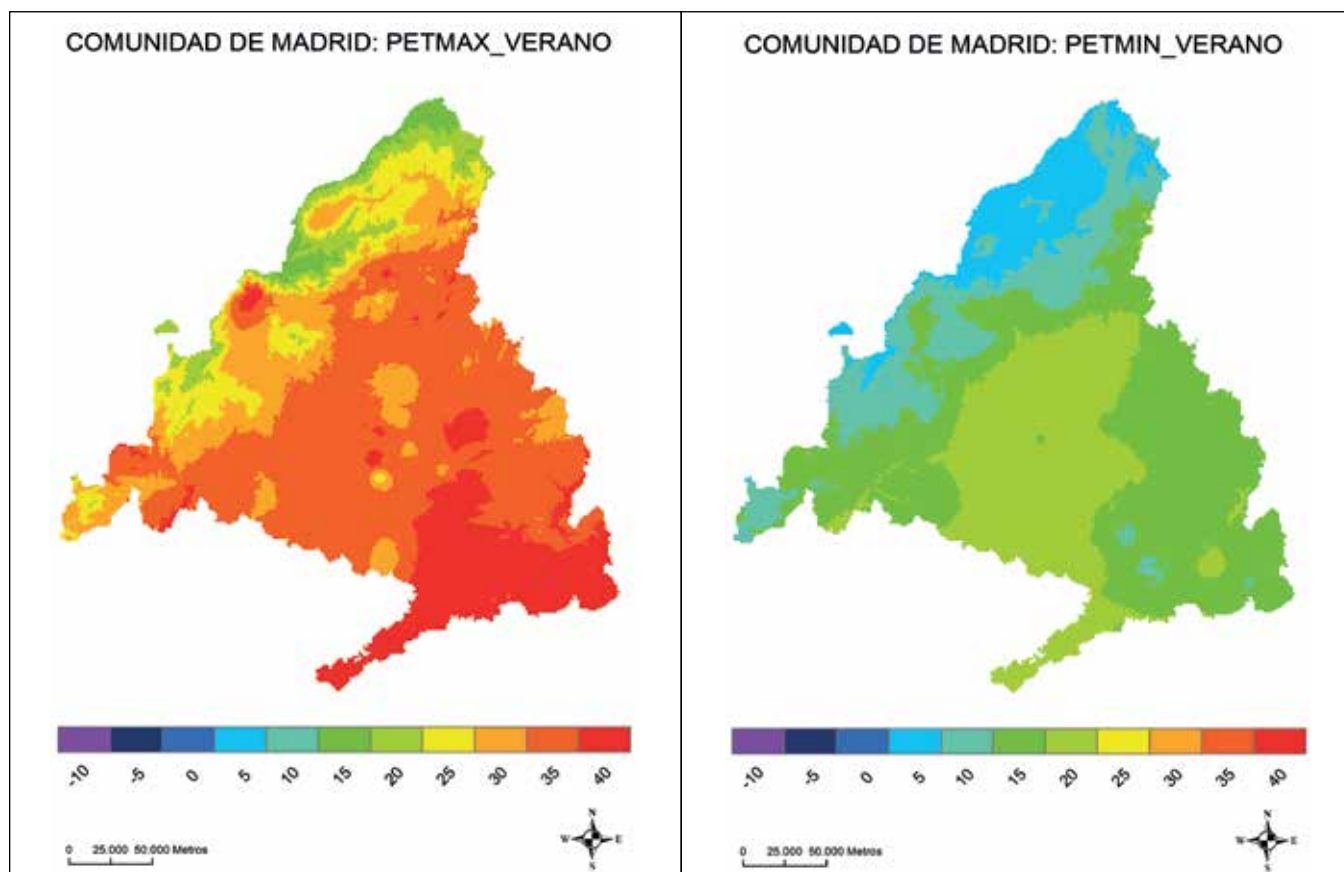


Figura 4. Distribución espacial de la PETmax y PETmin en verano.

de piedemonte, aunque también se ve afectado por valores de temperatura estival elevados, mantiene niveles ligeros de estrés térmico e incluso sensación de confort en las regiones intramontañosas del norte de la comunidad. El efecto urbano, vuelve a reflejarse de un modo claro en este caso en los valores de PETmin para la ciudad de Madrid y su área metropolitana, donde se genera una importante isla de desconfort térmico en el centro de la ciudad, suavizándose las condiciones a medida que nos alejamos hacia niveles de estrés ligeramente fríos en la periferia y que pueden llegar a ser de frío intenso en las zonas de montaña.

#### Otoño

Otoño se presenta como una estación transicional (figura 5). En esta se produce un descenso significativo en los valores de la PET con máximos en la zona sur (PETmax de 19 °C), suponiendo esto situaciones de sensación térmica confortable, que van gradando hacia el norte a sensaciones térmicas de ligero frío, y que en el piedemonte pasan a ser ya de frescas y de estrés moderado, aumentando este estrés con la altitud hasta alcanzar las cumbres. Es de nuevo en los valores recogidos por la PETmin donde vuelve a hacerse notable la incidencia de la urbanización en los valores de sensación y estrés térmicos, observándose

una reducción menor de la temperatura en el interior del núcleo urbano y su periferia. Pese a ello las sensaciones térmicas medias para esta estación, muestran ya una sensación de frío en estas áreas, con un nivel de estrés intenso. El espacio comprendido fuera del área metropolitana de la ciudad y libre de urbanización, presenta ya valores de PETmin por debajo de los 4 °C, mostrando situaciones de estrés térmico de frío fuerte y extremo.

## 5. CONCLUSIONES

Cabe destacar el principal rasgo de los valores de confort termofisiológico obtenidos: la heterogeneidad de los niveles de confort, tanto en los valores diurnos como nocturnos. En un territorio de escasas dimensiones, como es el de la Comunidad Autónoma de Madrid, las diferencias entre zonas son considerables con elevadas amplitudes en los valores de PETmax y PETmin. Esta heterogeneidad permite que en situaciones de desconfort por estrés térmico en una zona, se estén produciendo situaciones de confort en otra, y viceversa. También destacar la particularidad que introduce la ciudad de Madrid dentro del modelo bioclimático de la Comunidad. El clima urbano produce una intensa modificación de la distribución de



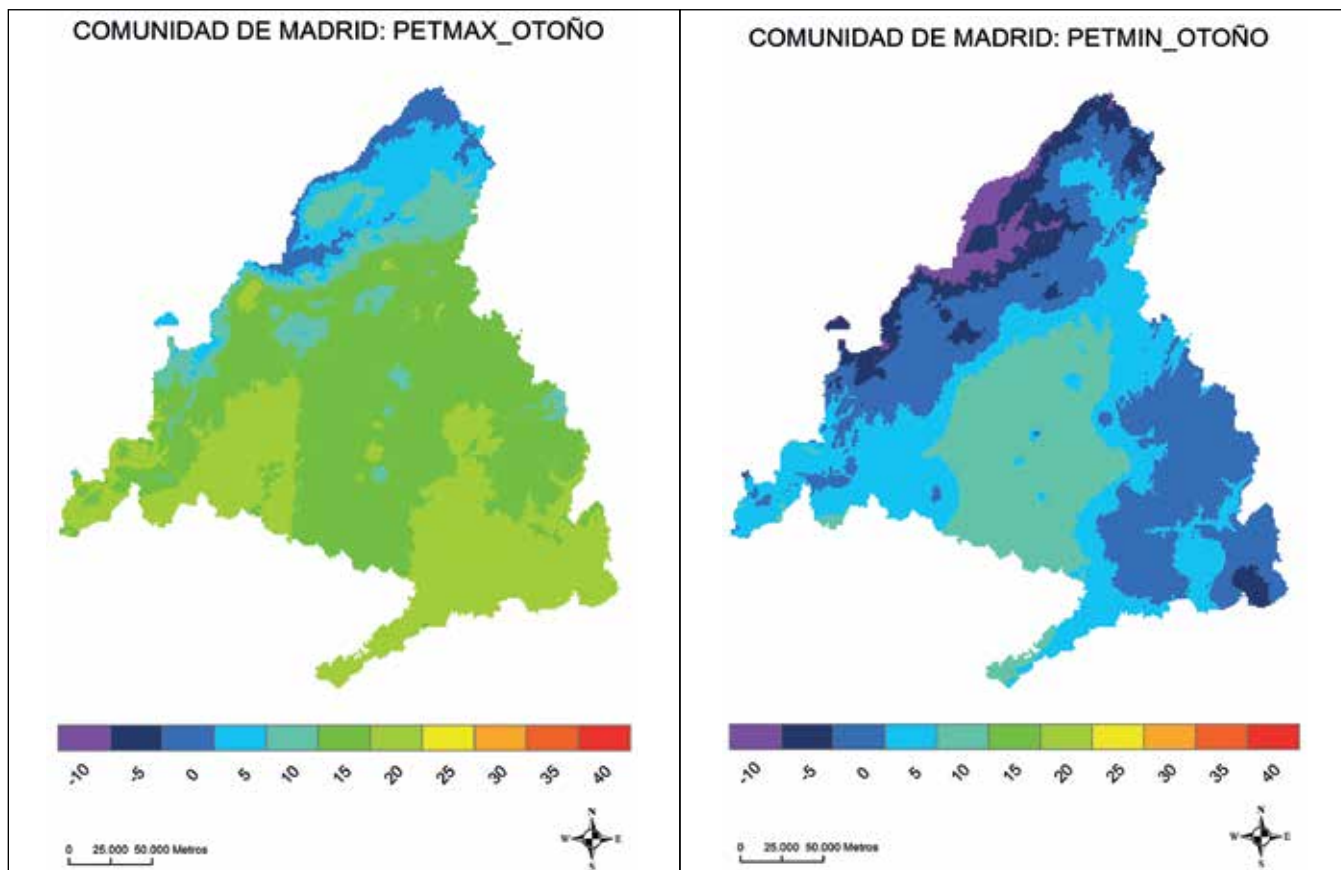


Figura 5. Distribución espacial de la PETmax y PETmin en otoño.

los valores diurnos y nocturno, con fluctuaciones de 8 °C entre el centro urbano y la periferia.

En cuanto a la metodología, enfatizar el valor del índice PET como herramienta que permite conocer el nivel de estrés térmico al que se enfrentan las personas, a partir de la integración de las variables climáticas que contribuyen tanto al confort como al disconfort climático. Como señala García F. «las aplicaciones potenciales de este índice son muy variadas y entre ellas, destacamos: la caracterización de situaciones extremas, como olas de calor, que pueden provocar riesgos para la salud de las personas, tomando como referencia los valores diarios de la temperatura fisiológica; también, la estimación de los consumos energéticos, en calefacción o refrigeración, necesarios para mantener unas condiciones de confort aceptables y la definición del potencial climático-turístico de la zona» (2012, p. 90).

Por último, señalar que la metodología aplicada en la modelización espacial introduciendo, junto a la interpolación por distancia entre observatorios, el gradiente altitudinal, parece a priori dar buenos resultados. Este método nos ha permitido conocer con una mayor precisión la distribución espacial de los niveles de confort al introducir la variable climática del gradiente altitudinal.

## REFERENCIAS

- Andrade, H., & Alcoforado, M. J. (2008). Microclimatic variation of thermal comfort in a district of Lisbon (Telheiras) at night. *Theoretical and Applied Climatology*, 92(3-4), 225-237.
- Fiala, D., Lomas, K. J., & Stohrer, M. (2001). Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*, 45(3), 143-159.
- Friedrich, M., Grätz, A., & Jendritzky, G. (2001). Further development of the urban bioclimate model UBI-KLIM, taking local wind systems into account. *Meteorologische Zeitschrift*, 10(4), 267-272.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Nauß, T., Peters, T., & Bendix, J. (2012). Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and forest meteorology*, 152, 17-30.
- García, F. F. (2013). El medio ambiente urbano y su integración en el avance del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid. Propuesta de creación de un sistema de información climático ambiental (SICAMAD). In *Reflexiones a propósito de la revisión*

- del Plan General de Madrid (183-206).*
- García, F. F., & Galán, E. (2012). Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET). *Territoris*, 8(1), 83-101.
- García, F. F., Gallego, E. G., López, A. M., & Montero, J. L. (2012). Disponibilidades hídricas en la comunidad de Madrid: situación actual y proyecciones a lo largo del presente siglo. En *Planificación y gestión del agua ante el cambio climático: experiencias comparadas y el caso de Madrid (703-766)*. La Ley. Grupo Wolters Kluwer..
- García, F.F., & Rasilla Álvarez, D. (2008). Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana. *Estudios Geográficos*, 69(265), 495-518.
- García, F. F. (2007). Creación de nuevos mapas a partir de MDE. Aplicación de las funciones de análisis de superficies. *Moreno Jiménez, A. Sistemas y análisis de información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGis. España, RA-MA*, 623-643
- García, F. F. (2003). Fundamentos físicos y métodos de evaluación del confort climático en los estudios de Bioclimatología humana. *VI Reunion nacional de climatología, Asociación de Geógrafos Españoles Santiago de Compostela*, 135-170
- García, F. F. (2001). Clima urbano y confort térmico en Madrid, España. III Congresso Brasileiro de Biometeorologia. Maringá, Brasil. Recuperado de [www.unemet.org.br](http://www.unemet.org.br)
- García, F. F. (2001). Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid. *Proyectos y métodos actuales en Climatología*, 4, 41-66.
- García, F. F. (2001). El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, (137), 169-186
- Gulyas, A., Unger, J., & Matzarakis, A. (2003). Analysis of the thermophysiological significant conditions within a medium-sized city with continental climate (Szeged, Hungary). En *First International Conference on Urban climate*.
- Höppe, P. (1999). The Physiological Equivalent Temperature: a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International journal of Biometeorology*, 43(2), 71-75.
- Jendritzky, G., Maarouf, A., Fiala, D., & Staiger, H. (2002, October). An update on the development of a Universal Thermal Climate Index. In *15th Conf. Biomet. Aerobiol. and 16th ICBO2*, 27, 129-133.
- Jiménez, A. M., & García, F. F. (2004). Confort climático y nivel de renta en la Comunidad de Madrid: un estudio exploratorio de su relación espacial. En *Historia, clima y paisaje: estudios geográficos en memoria del profesor Antonio López Gómez (305-322)*. Universitat de València.
- Matzarakis, A. y Rutz, F. (2005). *Visual manual Rayman-Pro*. Universidad de Freiburg, 58 pp.
- Matzarakis, A., & Amelung, B. (2008). Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In *Seasonal forecasts, climatic change and human health*, 161-172.
- Matzarakis, A., & Mayer, H. (1996). Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO newsletter*, 18, 7-10.
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a Universal Thermal Index: Physiological Equivalent Temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76-84.
- Royé, D., Martí, A., & López, R. (2011). La aplicación del índice bioclimático PET al noroeste de España para la delimitación de espacios con estrés térmico. In *Actas de la Conferencia Geográfica Regional*.

## Sobre los autores

### Alfredo Millán López

Licenciado en Geografía por la Universidad Autónoma de Madrid. Obtuvo el Diploma de Estudios Avanzados y en la actualidad realiza el Doctorado en la UAM, con una Tesis Doctoral sobre el confort climático-turístico. Su línea de investigación se basa en la climatología, más en concreto en Bioclimatología Humana, con diversos artículos relacionados con el tema. Además, sigue otras líneas de investigación como son la cartografía y los recursos hídricos.

### Víctor Lallana Llorente

Profesor ayudante del Departamento de Geografía Urbana y Ordenación del Territorio de la Universidad de Cantabria y Doctor en el Área de Geografía Física. Sus líneas de investigación principales se centran en la dinámica y análisis de la evolución del paisaje mediante el uso de herramientas y procesos de análisis SIG.