

APROXIMACIÓN AL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DEL ESTRÉS TÉRMICO EN GALICIA MEDIANTE EL USO DEL ÍNDICE BIOCLIMÁTICO PET

Dominic ROYÉ, Alberto MARTÍ EZPELETA, Manuel CABALAR FUENTES
Departamento de Geografía, Universidade de Santiago de Compostela
dominic.roye@usc.es, alberto.marti@usc.es, manuel.cabalar@gmail.com

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es hacer una aproximación al comportamiento espacial y temporal del estrés térmico en Galicia mediante la aplicación del índice bioclimático PET (Physiological Equivalent Temperature) y del modelo RayMan. El cálculo del PET se ha realizado a partir de los datos diarios de temperatura máxima, de humedad, de viento, de insolación, de radiación y de nubosidad para el período 2006-2010. A través de un modelo geoestadístico se ha obtenido una variada cartografía bioclimática que hemos intentado sintetizar en un solo mapa en el que se identifican las áreas con mayor riesgo de sufrir situaciones de estrés térmico, tanto por frío como por calor.

Palabras clave: bioclimatología, sensación térmica, PET, estrés térmico.

ABSTRACT

The aim of this paper is to approximate the spatial and temporal behavior of thermal stress in Galicia by applying the bioclimatic index PET (Physiological Equivalent Temperature) and the RayMan model. The calculation of PET was performed from the daily data of maximum temperature, humidity, wind, sunlight, radiation and cloud cover for the period 2006-2010. Through a geostatistical model we have obtained varied bioclimatic cartography which we summarize in a single map that identifies areas with higher risk of cold and heat thermal stress.

Key words: bioclimatology, thermal sensations, PET, thermal strain.

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía bioclimática, basada en el balance humano de energía, constituye un método idóneo para conocer las condiciones térmicas en las que vive el ser humano y para aplicar a diferentes situaciones y estudios. El análisis del bioclima térmico de una región, es una importante herramienta para conocer el estrés térmico al que está expuesta la población y, en consecuencia, para poder desarrollar medidas adecuadas de protección de su salud. Además, la información que aporta sirve de base para valorar el potencial impacto del cambio climático sobre el confort y la salud de la población. Ambos extremos del estrés térmico, tanto por frío como por calor, son causa de aumento de la morbilidad y de la mortalidad (Tobías *et alt*, 2010, Analitis *et alt*, 2008, Pantavou *et alt*, 2008, Kirch *et alt*, 2005), una razón, entre otras, que subraya la importancia del conocimiento de las características bioclimáticas de una región.

La temperatura del aire no coincide habitualmente con la sensación térmica real que siente una persona, que depende también de otros factores como la velocidad del viento, la radiación, la humedad, etc. (Tornero *et alt*, 2006, Epstein y Moran 2006). Por ello, para un análisis bioclimático hay que elegir entre los diversos índices térmicos existentes uno adecuado para dicho análisis. Estos índices se clasifican

en dos tipos principales: empíricos (ET, WCI) y analíticos (PET, PMV, SET*, ET*) (Tornera *et al.*, 2006). En el trabajo que presentamos se ha aplicado el índice de la Temperatura fisiológica equivalente (PET, Physiological Equivalent Temperature) (Höppe, 1999; Matzarakis, 1999). Se trata de uno de los índices térmicos más usados en la actualidad (Fernández García *et al.*, 2010; Lin y Matzarakis, 2008; Deb y A; 2010). Este índice utiliza dos tipos de variables, las variables meteorológicas y las del balance humano de la energía. PET es definido como la temperatura de aire en el típico interior (velocidad de viento 0,1; presión de vapor 12hPa; Temperatura de aire (T_a) igual a temperatura radiante media (T_{mrt}), metabolismo energético (trabajo) 80W, aislamiento de la ropa 0.9 clo) en la que se equilibra la temperatura de la piel y la temperatura corporal con las condiciones meteorológicas exteriores (Höppe; 1999). Las ventajas de este índice son su independencia del tipo de ropa y de la actividad metabólica, su unidad en grados Celsius y su facilidad de uso tanto en climas cálidos como fríos (Deb y A, 2010).

Utilizando este índice se han llevado a cabo diversos estudios en España, Hungría, Suecia o Austria (Roya *et al.*, 2011; Fernández García *et al.*, 2010; Matzarakis *et al.*, 2010; Gulyás y Matzarakis, 2007; Svensson *et al.*, 2003; entre otros), con el objetivo de evaluar sus características bioclimáticas.

Este trabajo se centra en el análisis del PET máximo con el objetivo de analizar las sensaciones térmicas extremas en Galicia, combinando el posible estrés por calor en el semestre de verano y el estrés por frío en el semestre invernal. De este modo se podrán identificar claramente aquellas áreas en las que la población se vea más afectada por uno o por otro tipo de estrés térmico, o por ambos. Un método similar ya ha sido aplicado por el Servicio Meteorológico Alemán (DWD), generando un mapa bioclimático para Alemania y ofreciendo análisis regionales para usuarios específicos del servicio meteorológico (Grätz, 2002).

2. METODOLOGÍA

El área de estudio es la región de Galicia, situada en el extremo Noroeste de la Península Ibérica y expuesta directamente a la influencia del Océano Atlántico. Se trata de un territorio con un relieve muy compartimentado, con importantes y continuos cambios de altitud. Al oeste y al norte presenta una extensa franja litoral de más de 1.000 kilómetros. A todo ello se une que Galicia es un territorio encrucijada entre las regiones biogeográficas Atlántica y Mediterránea, con unas condiciones climáticas templadas oceánicas (temperaturas suaves y precipitaciones abundantes), matizado en algunas áreas del sur y sureste por la influencia mediterránea (con veranos más cálidos y secos). Todo ello hace de esta región un interesante espacio para el análisis bioclimático.

Para llevar a cabo este estudio se ha utilizado el índice bioclimático PET calculado a través del modelo RayMan; a los resultados se les aplicó métodos geoestadísticos para poder desarrollar el análisis espacial, utilizando ArcGis. Para este estudio se han utilizado 6 estaciones completas de la Agencia Estatal de Meteorología y 59 estaciones automáticas pertenecientes al servicio meteorológico gallego, Meteogalicia. El período de estudio comprendió una serie de cinco años, del 01 de enero de 2006 hasta el 31 de diciembre de 2010. El número de estaciones seleccionadas fue el resultado de buscar un equilibrio entre una densidad suficiente y un período significativo, ya que para un estudio temporalmente más amplio no se obtuvo un mínimo de estaciones para cubrir todo el territorio, debido a los pocos años que lleva funcionando Meteogalicia y a las elevadas exigencias de variables climáticas del índice PET.

Los datos climatológicos diarios utilizados incluyeron los siguientes parámetros:

- temperatura máxima
- humedad relativa mínima
- velocidad media del viento
- horas de sol
- nubosidad media
- radiación global máxima

Las series de datos fueron revisadas y completadas cuando existían lagunas de información, utilizando para ello los métodos de correlación y regresión con las estaciones completas más próximas. Con dichas series climatológicas ya completas se computaron a través del modelo RayMan (Matzarakis *et al.*, 2006, 2007) los valores del PET máximo. En el caso del PET máximo se parte de la condición de que el mismo modelo RayMan calcula la temperatura media radiante (T_{mr}).

RayMan, además del índice PET también puede calcular otros índices térmicos como *Standard Effective Temperature* SET y *Predicted Mean Vote* PMV. Es posible adaptar los valores personales como la edad, el sexo, la altura y el peso. En este estudio se usó el ideal estandarizado en el modelo MEMI según Höppe 1999 (35 años, 1,75 m y 75 kg). Asimismo, se pueden cambiar otras variables en RayMan como la actividad y la ropa, pero en el índice PET está fijada una actividad de 80 W y una ropa con una resistencia térmica de 0,9 clo (MEMI) (Höppe, 1999).

PET	Sensación térmica	Nivel de estrés térmico
< 4	Muy frío	Extremo
4-8	Frío	Fuerte, intenso
8-13	Fresco	Moderado
13-18	Ligeramente frío	Ligero
18-23	Confortable	Nulo
23-29	Ligeramente cálido	Ligero
29-35	Cálido	Moderado
35-41	Caluroso	Fuerte, intenso
>41	Muy cálido	Extremo

TABLA 1: *Umbral de la sensación térmica PET* (Fuente: Matzarakis y Mayer, 1996).

Para llevar a cabo la extrapolación espacial y la elaboración de la cartografía bioclimática fueron evaluadas, en un primer paso, las frecuencias a partir de los valores medios del período de observación del PET máximo en los semestres de verano y de invierno. El semestre de verano comprende los meses de mayo a octubre, y el semestre de invierno los meses entre noviembre y abril. Por la mayor frecuencia de situaciones atmosféricas de frío en invierno, sólo se ha tenido en cuenta el impacto por frío ($PET_{mx} < 13^{\circ}C$). Y en el caso del semestre de verano, debido al mayor riesgo de sufrir impactos por calor, se han tenido en cuenta sólo las sensaciones térmicas con $PET_{mx} > 29^{\circ}C$. Además, fueron evaluadas las frecuencias mensuales de las sensaciones térmicas en las ciudades de Ourense y Ferrol, lo que permite cuantificar el porcentaje de días con estrés térmico, tanto por calor como por frío. Se han seleccionado las estaciones de Ferrol y Ourense por sus contrastes climáticos y porque representan a dos de los grandes ámbitos geográficos de Galicia (clima oceánico puro y clima oceánico de interior con influencia mediterránea respectivamente).

Las correlaciones múltiples lineales se computaron con SPSS, incluyendo como variables predictoras, la altitud (a), la longitud (b), la latitud (c) y la distancia al mar (d) (Tab 2). Ninguna correlación dio una relación significativa con la variable b (longitud).

	R (PET max)
Semestre Verano	0,693 [a,c,d] p<0.05
Semestre Invierno	0,708 [a,c,d] p<0.05

TABLA 2: *Correlaciones múltiples lineales (R) entre el PET y las variables predictoras.*

Una vez obtenidos los mapas con las frecuencias de estrés por calor en el semestre de verano, y de estrés por frío en el semestre de invierno, se generó una matriz de doble entrada con siete rangos de frecuencias respectivamente (ver leyenda de Figura 1). Con la combinación de ambos grupos de frecuencias se generó un mapa donde se representa conjuntamente el grado de incidencia en Galicia del estrés térmico, tanto por calor como por frío.

3. RESULTADOS

El estrés térmico por calor afecta a la mitad meridional de Galicia (Figura 1), especialmente a la zona suroriental, donde los días con estrés por calor en el semestre de verano son frecuentes e, incluso, muy frecuentes en el caso del valle del río Támega a su paso por la depresión de Verín, y en el fondo del valle del Sil en toda la comarca de Valdeorras, entrada natural desde el Bierzo y vía de entrada de la influencia mediterránea en Galicia. También el valle del río Miño hasta su desembocadura (Baixo Miño), la comarca de Verín, al sureste, o el valle del río Bibei y las depresiones de Ourense y de Monforte, al sur de la provincia de Lugo, sufren con frecuencia estas situaciones de estrés por calor. La menor altitud, una menor nubosidad, un mayor efecto de continentalidad por su alejamiento del océano, y su emplazamiento rodeados de sierras y montañas, y a sotavento de los vientos frescos dominantes del N y NE en verano, explican su mayor exposición a sensaciones térmicas de calor moderado a fuerte un elevado número de días. La ciudad de Ourense, por ejemplo, registra más de un 50 % de días con estrés por calor entre mayo y octubre, llegando a alcanzar un 30% de días con estrés extremo entre junio y septiembre (Figura 4).

En el resto de la mitad meridional de Galicia, exceptuando las áreas de montaña donde son poco frecuentes o muy escasos, los días con estrés por calor son ocasionales. La proximidad al mar, en el caso de las Rías Baixas, o la mayor altitud en el caso de las comarcas del interior como las de Santiago, Lugo o Sarria, favorecen una suavización de las sensaciones térmicas máximas.

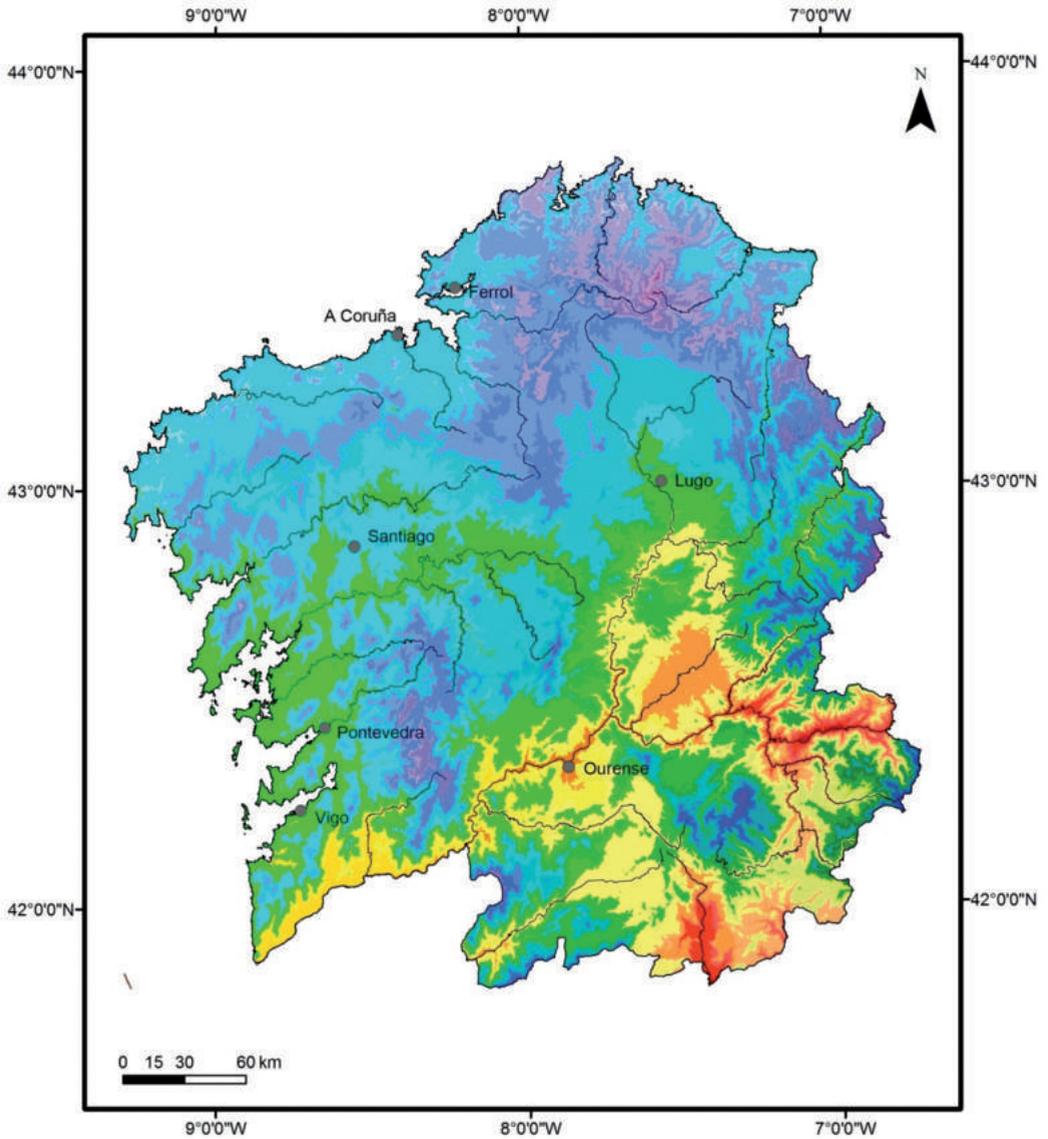
Por el contrario, en la mitad septentrional, al norte del paralelo 43°, las situaciones de estrés por calor son poco frecuentes o muy escasas. En Ferrol, por ejemplo (Figura 3), menos del 20% de los días entre junio y septiembre registran estrés por calor fuerte o extremo. Durante un importante número de días en los meses centrales del semestre de verano, toda esta zona permanece bajo la influencia de situaciones sinópticas del NO, N y NE que traen vientos frescos y húmedos del océano, lo que provoca un moderado descenso de las temperaturas y un incremento notable de la nubosidad. Hacia el sur, por el contrario, estos vientos se hacen cada vez más cálidos y secos, debido a un moderado efecto foehn, lo que provoca días con sensaciones térmicas cálidas o calurosas.

Durante el semestre invernal, toda la región se ve afectada por estrés por frío, moderado a fuerte, si bien en la mayor parte del territorio el riesgo es ocasional. En el litoral el estrés por frío es poco frecuente en las Rías Baixas y ocasional en el litoral norte y noroeste, y se debe, en la mayor parte de los días, a frío moderado. Así, vemos en la Figura 3 como en Ferrol entre diciembre y febrero este grado de estrés tiene lugar entre un 40 y un 60 % de los días, descendiendo por debajo del 30 % en marzo y abril, y sin apenas riesgo el resto del semestre. El mayor grado de humedad, la mayor frecuencia de nubosidad, de precipitaciones y de viento que generan las frecuentes perturbaciones atlánticas que llegan en este periodo hasta las costas de Galicia explican estos valores.

El estrés térmico por frío se reduce considerablemente en algunas áreas del interior más resguardadas y con mayor insolación; es el caso, por ejemplo, de Ourense (Figura 4), donde el estrés por frío en las horas centrales del día afecta al 40-50% de los días de diciembre y enero. Y en los meses de noviembre, febrero y marzo, el riesgo es ya muy escaso, con valores inferiores al 15 y 10 %.

Solamente en las áreas de montaña el riesgo de estrés por frío es frecuente, incluidas algunas sierras próximas al litoral como la Capelada, al norte de la provincia de A Coruña, o las sierras de Barbanza y A Grova en las Rías Baixas, que alcanzan entre 600 y 700 m de altitud (Figura 2). Finalmente, las situaciones de estrés por frío son muy frecuentes o predominantes exclusivamente en

las áreas más elevadas de los sistemas montañosos, sobre todo a partir de los 700/800 m en las sierras más septentrionales (Serra do Xistral) y por encima de los 900/1000 m en las sierras orientales y meridionales (Ancares, Courel, Eixe, Macizo Central, Xurés y Sierras de la Dorsal).



		Estrés Térmico por calor en el semestre de verano									
		Predominante	Muy Frecuente	Frecuente	Ocasional	Poco Frecuente	Muy escaso	Sin apenas riesgo			
Estrés Térmico por frío en el semestre invernal	Sin apenas riesgo	0-5									
	Muy escaso	5-15									
	Poco Frecuente	15-25									
	Ocasional	25-35									
	Frecuente	35-45									
	Muy Frecuente	45-55									
	Predominante	55-65									
		65-75									
		75-85									
		85-95									
	95-100										

FIG. 1: Frecuencias del estrés térmico por calor y por frío en Galicia (2006-2010).

Vemos pues como los espaciales que las sensaciones térmicas experimentan en Galicia se deben fundamentalmente a dos factores. En primer lugar a la compleja configuración orográfica, caracterizada por variaciones constantes de altitud comprendidas entre el nivel del mar en los espacios litorales al oeste y norte de la región, y los más de 1.800 m de las áreas de montaña situadas al este y sur (Figura 2); entre ambos extremos el relieve está compuesto por un mosaico de valles encajados y otros más abiertos, por sierras y macizos montañosos de diferente altitud, y por depresiones y penillanuras de distinta extensión. Esta orografía contrastada y cambiante genera continuos cambios en los elementos del clima que, a su vez, modifican las condiciones bioclimáticas en las que vive la población de los distintos municipios de Galicia. El segundo de los factores está en relación a las marcadas diferencias en cuanto a la distancia entre cada una de las áreas de Galicia y el Océano Atlántico. Conforme nos alejamos del litoral oeste y norte, y nos adentramos hacia el interior, el efecto suavizador de las temperaturas disminuye, la humedad desciende, al igual que la velocidad y persistencia del viento, parámetros que intervienen directamente en los valores de la sensación térmica resultante.

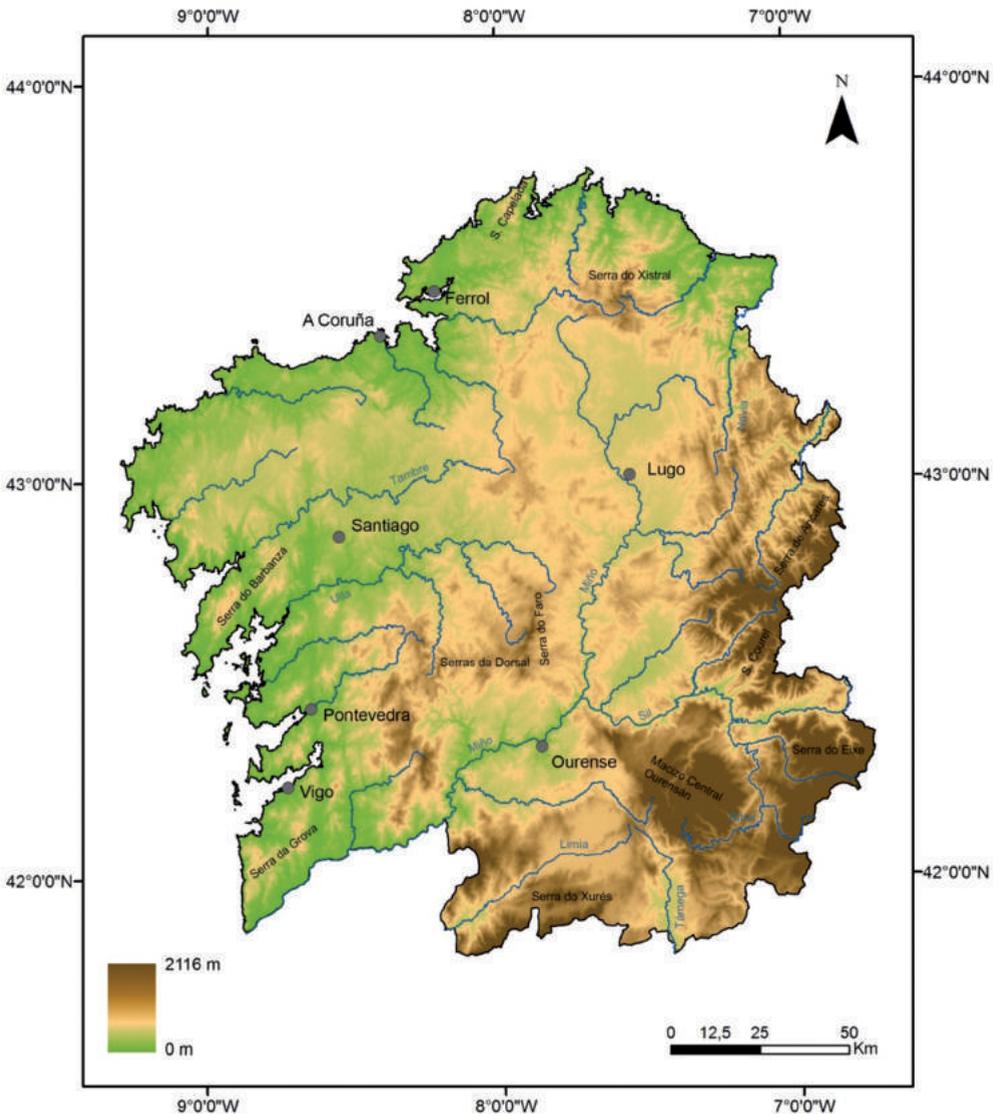


FIG. 2: Mapa hipsométrico de Galicia.

En verano, además, interviene otro factor, la latitud, debido a que las situaciones sinópticas más frecuentes en esta estación corresponden a advecciones de vientos del NE y N, lo que genera un importante contraste térmico entre los territorios del norte y del sur, con diferencias regionales de 18° en los valores del PET máximo (Royé *et al*, 2011).

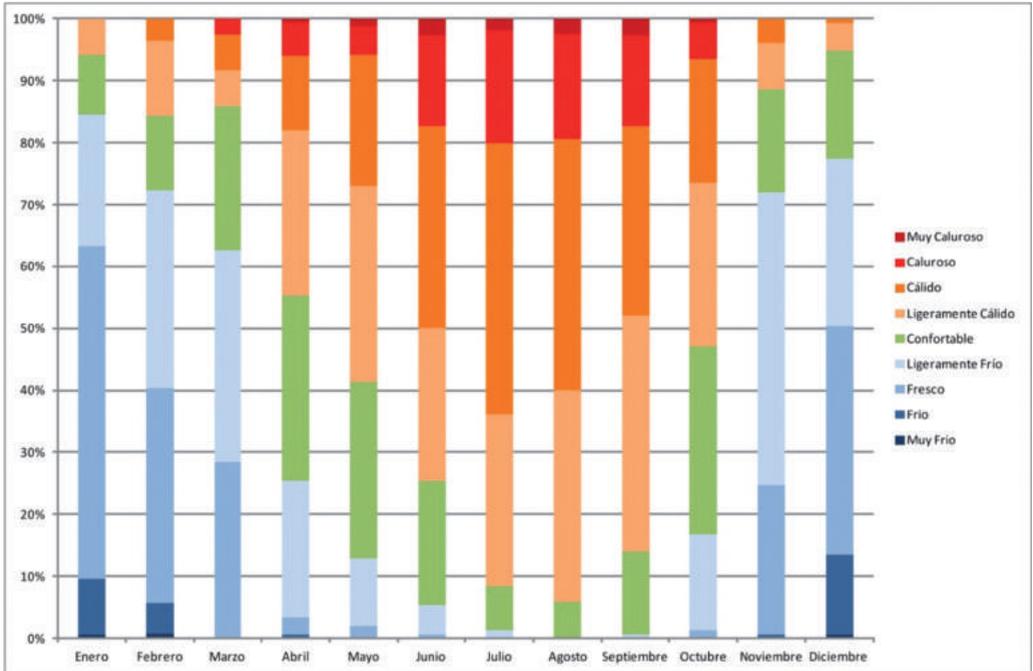


FIG. 3: Distribución de frecuencias de las sensaciones térmicas mensuales (PETmx) en Ferrol (2005-2010).

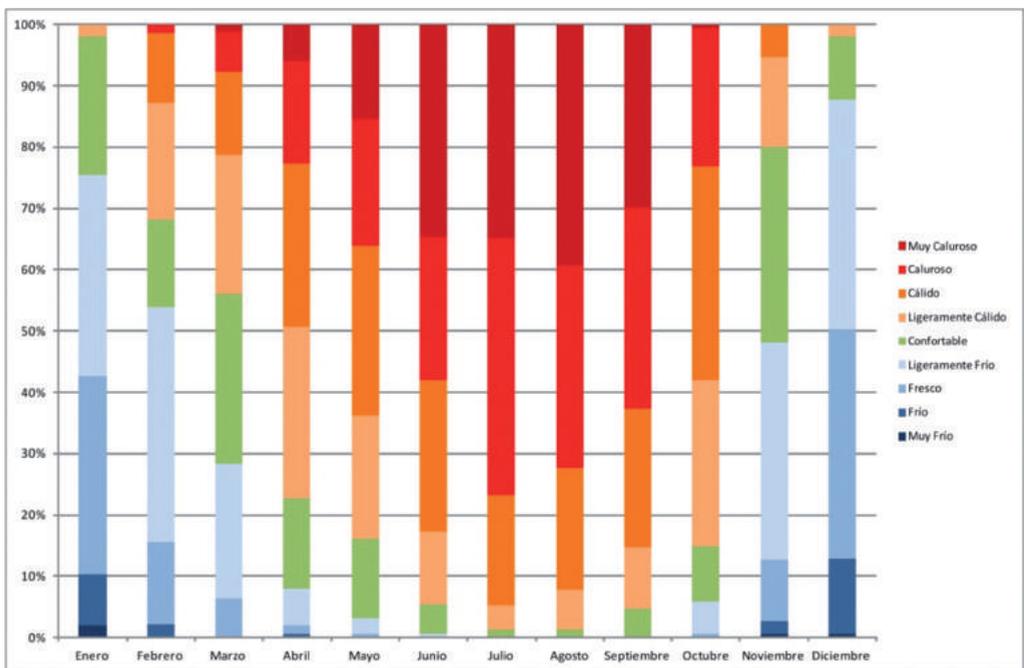


FIG. 4: Distribución de frecuencias de las sensaciones térmicas mensuales (PETmx) en Ourense (2005-2010).

4. CONCLUSIONES

Los resultados demuestran una elevada heterogeneidad espacial de las sensaciones térmicas obtenidas con el modelo RayMan, y de las frecuencias de estrés térmico por frío y por calor, con marcados contrastes espaciales entre los diferentes tramos del litoral y las áreas de montaña interiores, o entre la mitad septentrional y la mitad meridional. La orografía cambiante y diversa, las variaciones de altitud y de distancia al mar o la latitud constituyen los factores fundamentales que explican dicha heterogeneidad y los contrastes espaciales que experimentan las condiciones bioclimáticas en la región.

El período de estudio, en el sentido climatológico, es bastante corto, lo que nos limita en cuanto a las afirmaciones sobre el clima y su impacto en forma de estrés térmico en Galicia. Aún así, es posible ver tendencias que se podrán confirmar o corregir con la generación de nuevos datos.

Otro aspecto a destacar está relacionado con la escala de las sensaciones térmicas usada en este trabajo. Se puede diferenciar entre una escala absoluta y relativa. La absoluta es la que se ha aplicado en este estudio, pero esta escala no tiene en cuenta la aclimatación estacional. Teniendo en cuenta la capacidad de adaptación del organismo humano a las condiciones ambientales sería significativo tener en cuenta dicha aclimatación para la evaluación bioclimática (Havenith, 2005). Por ello sería interesante en posteriores trabajos implantar la escala relativa que está descrita en un estudio bioclimático de Fernández García (2010) aplicado a la ciudad de Madrid. Además de una modificación estacional, también puede ser un punto de reflexión hacer una adaptación de la escala en general en España, ya que la escala absoluta estándar en la mayoría de los estudios se basa en Matzarakis y Mayer 1996 y está construida para Europa central y occidental (Lin, 2008).

REFERENCIAS

- Analitis, A. et al. (2008): "Effects of Cold Weather on Mortality: Results From 15 European Cities Within the PHEWE Project", *American Journal of Epidemiology*, 168: 1397–1408.
- Deb, C. & A, R. (2010): "The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies", *International Journal of Engineering Science and Technology*, 7:2825-2828.
- Epstein, Y. & Moran, S. D. (2006): "Thermal Comfort and the Heat Stress Indices", *Industrial Health*, 44:388-398.
- Fernández García, F., Rasilla, D., Galán, E. y Cañada, R. (2010): "Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET)", En: Fernández García, F., Galán Gallego, E. & Cañada Torrecilla, R.: *Clima, Ciudad y Ecosistemas*, VII Congreso de la Asociación Española de Climatología, Madrid: AEC, 505-514.
- Grätz, A. (2002): Die Bioklimakarte von Deutschland – ein Update. Klimastatusbericht. DWD. 202-203.
- Havenith, G. (2005): "Temperature Regulation, Heat Balance and Climatic Stress", En: Kirch, W., Menne, B. & Bertollini, R. (Ed.): *Extreme Weather Events and Public Health Responses*, Berlin: Springer, 69-80.
- Höppe, P. (1999): "The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment", *International Journal of Biometeorology*, 43:71-75.
- Kirch, W., Menne B. y Bertollini, R. (Eds.) (2005): *Extreme Weather Events and Public Health Responses*. 57 ss Heidelberg: Springer
- Lin, T-P. y Matzarakis, A. (2008): "Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan", *International Journal of Biometeorology*, 52:281-290.
- Matzarakis, A. y Mayer, H. (1996): "Another kind of environmental stress: thermal stress", *WHO Newsletter*, 18:7-10.
- Matzarakis, M. (1999): "Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature", *International Journal of Biometeorology*, 43:76–84.
- Matzarakis, M., Rutz F. y Mayer H. (2006): "Modelling the thermal bioclimate in urban areas with the RayMan Model", En: *Conference Proceedings of the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Geneva.
- Matzarakis, M., Rutz F. y Mayer H. (2007): "Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model", *International Journal of Biometeorology*, 51:323–334.

- Matzarakis, A., Rudel, E., Zygmontowski, M., y Koch, E. (2010): "Bioclimatic maps for tourism purposes", *Physics and Chemistry of the Earth*, 35:57-62.
- Pantavou, K., Theoharatos, G., Nikolopoulos, G., Katavoutas, G. y Asimakopoulos, D. (2008): "Evaluation of thermal discomfort in Athens territory and its effect on the daily number of recorded patients at hospitals' emergency rooms", *International Journal of Biometeorology*, 52:773-778.
- Royé, D., Martí, A. y López, R. (2011): La aplicación del índice bioclimático PET al noroeste de España para la delimitación de espacios con estrés térmico. *Actas de la Conferencia Geográfica Regional*, UGI, Santiago de Chile.
- Tobías, A., García de Olalla, P., Linares, C., Bleda J. M., Caylà J. A. y Díaz, J. (2010): "Short-term effects of extreme hot summer temperatures on total daily mortality in Barcelona, Spain", *International Journal of Biometeorology*, 54:115-117.
- Tornero, J., Pérez Cueva, J. A. y Gómez Lopera, F. (2006): "Ciudad y confort ambiental: estado de la cuestión y aportaciones recientes", *Cuadernos de Geografía*, 80:147-182.

