

Relació entre calor i mortalitat a la ciutat de Barcelona mitjançant l'anàlisi de condicions tèrmiques i termohigromètriques¹

Francesc Vilar-Bonet

*Servei de Gestió i Evolució del Paisatge
Facultat de Geografia i Ha., Universitat de Barcelona
fvilar@ub.edu*

Resum

La relació causa-efecte entre calor intensa i mortalitat ha estat àmpliament analitzada i contrastada. Tanmateix, no hi ha acord científic en quina de les variables meteorològiques és la que explica millor aquesta relació. El present estudi analitza i quantifica la relació de les variables meteorològiques de temperatura mínima ($T_{mín}$) i màxima ($T_{màx}$) diàries i índexs Humidex (IH) –combinació de temperatura i humitat– mínim (IH $_{mín}$) i màxim (IH $_{màx}$) diaris amb la variable mortalitat a la ciutat de Barcelona. Els resultats mostren que les variables que expliquen millor la relació entre calor o sensació de calor intenses i mortalitat són la $T_{mín}$ i l'IH $_{mín}$, en què a partir dels 25°C de $T_{mín}$ i dels 33 d'IH es dispara la mortalitat per calor.

Paraules clau: Humidex, temperatura, mortalitat, Barcelona, correlació, regressió polinòmica.

Resumen: *Relación entre calor y mortalidad en la ciudad de Barcelona mediante el análisis de condiciones térmicas y termohigrométricas*

La relación causa-efecto entre calor intenso y mortalidad ha sido ampliamente analizada y contrastada. Sin embargo, no hay acuerdo científico en cuál de las variables meteorológicas es la que explica mejor esta relación. El presente estudio analiza y cuantifica la relación de las variables meteorológicas de temperatura mínima ($T_{mín}$) y máxima ($T_{màx}$) diarias e índices Humidex (IH) –combinación de temperatura y humedad– mínimo (IH $_{mín}$) y máximo (IH $_{màx}$) diarios con la variable mortalidad en la ciudad de Barcelona. Los resultados muestran que las variables que explican mejor la relación entre calor o sensación de calor intensas y mortalidad son la $T_{mín}$ y el IH $_{mín}$, en la que a partir de los 25°C de $T_{mín}$ y los 33° de IH $_{mín}$ se dispara la mortalidad por calor.

1. L'autor vol agrair: al Servei Meteorològic de Catalunya, la cessió de les dades meteorològiques; als membres del Servei de Gestió i Evolució del Paisatge, el seu suport; i al Dr. Javier Martín Vide la revisió del treball.

Palabras clave: Humidex, temperatura, mortalidad, Barcelona, correlación, regresión polinómica.

Abstract: *Relationship between heat and mortality in the city of Barcelona through the analysis of thermal and thermo-hygrometric conditions*

The cause-effect relationship between intense heat and mortality has been widely analyzed and contrasted. However, there is no scientific agreement on which of the meteorological variables is the one that best explains this relationship. The present study analyzes and quantifies the relationship between the meteorological variables of daily minimum ($T_{mín}$) and maximum ($T_{màx}$) temperature and daily minimum ($H_{mín}$) and maximum ($H_{màx}$) Humidex indices (IH) –combination of temperature and humidity– with the mortality variable in the city of Barcelona. The results show that the variables that best explain the relationship between intense heat or heat feel and mortality are the $T_{mín}$ and the $IH_{mín}$, and it can be stated that from 25°C of $T_{mín}$ or 33° of $IH_{mín}$ the mortality by heat shoots up.

Keywords: Humidex, temperature, mortality, Barcelona, correlation, polynomial regression.

* * *

1. Introducció

Són nombrosos els estudis realitzats per analitzar l'impacte que provoca la temperatura ambient o sensació tèrmica (combinació de la temperatura amb d'altres paràmetres meteorològics) en l'ésser humà (Díaz *et al.*, 2005). Si bé els treballs han abordat tant els efectes de les temperatures anormalment baixes com les anormalment altes (Raso, 2002; Díaz *et al.*, 2015) són aquestes últimes les que han copsat el major interès i dedicació per part dels investigadors, avaluant diversos graus d'afectació en la salut humana com són la intensitat de malestar per calor (Giannopoulou *et al.*, 2014), l'augment d'ingressos hospitalaris (Choudhary i Vaidyanathan, 2014) i, en darrera instància, la conseqüència més extrema, que fa referència a la mortalitat (Bandala *et al.*, 2019).

L'estacionalitat de la mortalitat a latituds mitjanes és un fet ben palès. Un bon nombre d'estudis científics constaten l'augment de la mortalitat durant l'hivern i, en general, els mesos més freds de l'any. Aquesta dinàmica ve explicada per l'increment de les malalties respiratòries i cardiovasculars a causa de les baixes temperatures.

En aquest sentit, contràriament, l'estiu és l'estació que presenta una mortalitat més baixa amb una clara disminució de les patologies esmentades fruit d'unes temperatures més suaus. Tanmateix, durant aquesta estació també es produeixen episodis puntuals d'increment de la mortalitat que van associats a dies de temperatures anormalment altes.

Quan la temperatura ambiental augmenta i es percep la sensació de calor el sistema termoregulador genera una sèrie de canvis com són, entre d'altres, l'increment de la freqüència cardíaca i de la pressió arterial, fet que, en casos de notable calor, i depenent de la intensitat i la durada, pot arribar a provocar la mort, especialment en persones vulnerables.

Pel que fa concretament a la relació calor-mortalitat, els estudis desenvolupats s'han basat en una gran diversitat de variables meteorològiques, que han estat convenientment correlacionades amb l'increment de la mortalitat mitjançant la premissa causa-efecte. Les principals variables o elements utilitzats per a tals estudis han estat: episodis o onades de calor (Martínez i Bandala, 2018; Royé *et al.*, 2020), temperatura mitjana, Tmín o Tmàx diàries (Díaz *et al.*, 2015; Fenner *et al.*, 2019), graus-hora o graus-dia (Qiaoxuan *et al.*, 2019) i, especialment, un gran conjunt d'índexs tèrmics com ara la temperatura aparent (Almeida *et al.*, 2010), Excess Heat Factor –EHF– (Loridan *et al.*, 2016; Tolika, 2019), Heat Index (Bandala *et al.*, 2019), IH (Katavoutas i Founda, 2019; Lukić, 2019), etc.

Durant molts anys s'han testat les variables tèrmiques i el gran ventall d'índexs tèrmics creats per tal de poder determinar quin explicaria i quantificaria millor la relació de causalitat calor-mortalitat (Morabito *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014). En l'actualitat no existeix consens sobre quin pot establir millors correlacions i prediccions de la mortalitat ja que això depèn, entre d'altres variables, del context geogràfic particular de cada zona. Així doncs, per a cada població, ciutat o territori cal analitzar quines són les variables o índexs que modelitzen millor aquesta relació causal per tal de poder generar un millor sistema d'alertes i prediccions.

L'objectiu del present treball és avaluar quina variable correlaciona i explica millor la mortalitat causada per la calor extrema a la ciutat de Barcelona, analitzant per a tal finalitat la Tmín i Tmàx diàries, i l'IHmàx i IHmín diaris (índex conegut popularment com a temperatura de xafogor), que permetrà també determinar la importància i afectació de la combinació de temperatura i humitat elevades.

2. Dades i àrea d'estudi

2.1. Dades meteorològiques

Les dades meteorològiques corresponen a l'estació de Barcelona-Raval de la xarxa EMA (Estacions Meteorològiques Automàtiques) del Servei Català de Meteorologia, situada al centre de Barcelona, a una altitud de 33 m. El període d'anàlisi ha estat 2007-2018, 12 anys corresponents a la sèrie completa, la qual va començar l'11 d'octubre de 2006 (2007 primer estiu disponible). La sèrie s'ha tancat el 2018 per tal de fer-la coincidir amb les dades validades de mortalitat diària disponibles.

L'estació de Barcelona-Raval consta d'una sèrie molt completa des del seu inici en què només s'hi ha trobat dues llacunes horàries tant pel que fa a temperatura com a humitat mitjanes: 10:00 i 11:00 del 15 d'abril de 2008, i que s'han completat amb una senzilla interpolació.

Les dades base han estat la temperatura i humitat mitjanes horàries, i a partir d'aquestes s'han calculat les T_{\min} i T_{\max} diàries i els IH_{\min} i IH_{\max} diaris –de 0:00 a 24:00–.

Els valors mínims i màxims diaris obtinguts mitjançant les dades mitjanes horàries en realitat no coincideixen exactament amb la T_{\min} i T_{\max} absolutes del dia ja que aquells són valors mitjans horaris i no puntuals com aquestes, però considerem més adient, per a la finalitat d'aquest treball, l'ús d'aquests valors mitjans horaris ja que són més representatius dels valors extrems que no pas uns valors absoluts que probablement només s'han assolit puntualment durant un molt breu espai de temps i que, per tant, no reflecteixen tan bé l'impacte que poden tenir sobre la salut de les persones. A més a més, com es veurà tot seguit, s'ha fet el mateix per al càlcul dels IH diaris, ja que també s'ajusten més a la realitat.

Pel que fa a l'IH –que combina temperatura i humitat– s'han calculat, mitjançant la corresponent fórmula (apartat 3, metodologia), tots els valors d'IH horaris i, com en els cas de les temperatures, a partir d'aquests els diaris. El fet d'obtenir els valors d'IH d'aquesta forma en comptes de combinar tan sols els valors mitjans diaris o puntualment per a determinades hores (Lukić *et al.*, 2019) comporta un grau d'ajust molt elevat respecte al valor real d'IH ja que les variacions intrahoràries de temperatura i humitat acostumen a ser molt baixes i difereixen poc del seu valor mitjà horari.

2.2. Dades demogràfiques

Les dades demogràfiques, tant de la població total de la ciutat com de la mortalitat diària, han estat facilitades per l'IDESCAT (Institut d'Estadística de Catalunya), de les quals les de mortalitat han vingut de l'Institut Català de la Salut.

Les dades de població total fan referència al municipi íntegre de Barcelona i corresponen a la població total a data 1 de gener de cada any. Durant el període d'anàlisi la població ha variat entre un mínim d'1.595.110 i un màxim d'1.621.537 habitants, procedint a unificar-les posteriorment per a poder realitzar els càlculs adients.

Per a la normalització de la mortalitat eliminant les variacions derivades dels diferents totals poblacionals anuals s'ha establert la mortalitat diària per milió d'habitants. Prèviament, per al càlcul de la població mitjana anual, com les dades corresponen a 1 de gener de cada any, s'ha fet la mitjana de l'any en curs i de l'any següent, d'aquesta manera la dada s'ajusta millor al que seria la teòrica població mitjana de l'any en qüestió, essent aquestes mitjanes anuals la base per a calcular la mortalitat diària en base al milió d'habitants.

2.3. Àrea d'estudi i característiques generals

L'àrea d'estudi se centra concretament en el municipi de Barcelona, així doncs, és un treball d'abast exclusivament local. Si bé la ciutat de Barcelona presenta una certa variabilitat en els valors climatològics mitjans a causa de diversos factors com l'orografia, proximitat al mar, etc., en aquest treball s'ha pres l'observatori del Raval, al centre de la ciutat, com a representatiu de la ciutat en l'anàlisi i relació de valors atmosfèrics i mortalitat.

Els mesos de juny a setembre són els més càlids de l'any, tant pel que fa a temperatures com a valors d'IH (taula 1) –ben diferenciats de la resta de mesos–, i és per això que configuren el període d'anàlisi d'aquest estudi. Així mateix, cal destacar que aquests mesos coincideixen amb el període de menor mortalitat mitjana mensual.

Taula 1. Valors mensuals mitjans de temperatura, IH i defuncions a Barcelona

	G	F	Mç	Ab	Mg	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D	Any
Tmín	8.9	8.7	10.5	13.2	16.0	20.3	23.0	23.4	20.5	17.0	12.2	9.5	15.3
Tmàx	14.6	14.6	16.7	18.9	22.0	26.0	28.2	28.5	25.6	22.3	17.9	15.0	20.9
IHmín	9.0	8.8	10.7	13.9	17.7	23.7	28.1	28.6	24.3	19.5	12.8	9.6	17.3
IHmàx	14.6	14.6	16.7	18.9	22.0	27.0	31.5	32.1	27.7	22.7	17.9	15.0	20.4
Defuncions	52.2	50.2	46.2	42.2	39.8	39.1	39.7	38.9	37.2	39.8	43.1	48.0	43.0

3. Metodologia

3.1. L'índex Humidex (IH)

L'IH és un índex que combina temperatura i pressió de vapor, els valors del qual fan referència a una teòrica temperatura de sensació equivalent a la temperatura ambient amb baixos nivells d'humitat atmosfèrica, i que defineix el grau de malestar per calor en les persones.

3.1.1. Precedents

Durant el segle xx es van realitzar molts estudis que van generar nombroses taules i fórmules empíriques per definir i quantificar el 'confort' i 'malestar' tèrmic.

Un dels primers índexs emprats amb cert èxit fou l'anomenat *Effective Temperature Scale (ET)* de Houghton, Yaglou, Miller i Lincoln (1923), de l'ASHVE (Research Laboratory of the American Society of Heating and Ventilating Engineers), en què es buscava la mateixa sensació tèrmica amb diferents combinacions de temperatura, humitat i vent, és a dir, una escala de condicions termoequivalents. L'establiment d'aquestes sensacions tèrmiques era

totalment subjectiva ja que es basava en tests experimentals de persones voluntàries sotmeses, en una habitació, a un rang de diferents condicions ambientals dictaminades per les variacions controlades de temperatura dels termòmetres sec i humit i de la velocitat del vent.

L'ET en realitat no és una temperatura sinó un índex relatiu al que sent el cos humà en unes determinades condicions atmosfèriques en resposta als factors físics de l'aire, per tant, fa referència a una escala sensorial de calor que serveix per mesurar l'estrès per calor.

Un altre índex que, anys més tard, també va adquirir força difusió va ser l'anomenat *Humiture*, d'Osborn Fort Hevener (1937), la fórmula del qual era:

$$\begin{aligned} \text{Humiture} &= \frac{1}{2} T_s + \frac{1}{2} \text{HR} \\ T_s &= \text{temperatura del termòmetre sec } (^{\circ}\text{F}) \\ \text{HR} &= \text{humitat relativa (0-100\%)} \end{aligned}$$

Amb els anys, l'ET va esdevenir l'índex més ben considerat per a la mesura del confort tèrmic en la seva època. L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), antiga ASHVE, va realitzar diverses modificacions incorporant nous factors i augmentant la seva complexitat. Com a conseqüència d'això, aquesta temperatura efectiva (ET) era extremadament difícil d'obtenir mitjançant dades meteorològiques i, per aquest motiu, E. C. Thom i la U.S. Weather Bureau van desenvolupar una fórmula que obtindria molt bones aproximacions als valors de l'escala de l'ET utilitzant només les temperatures del termòmetre sec i humit, i evitant així, doncs, l'ús del complicat nomograma. L'índex que, mitjançant la nova fórmula, emulava el càlcul de l'ET va rebre el nom de *Discomfort Index* (DI) i responia a la següent expressió:

$$\begin{aligned} \text{D.I.} &= 0,4 \times (T_s + T_h) + 15 \\ T_s &= \text{temperatura del termòmetre sec } (^{\circ}\text{F}) \\ T_h &= \text{temperatura del termòmetre humit } (^{\circ}\text{F}) \end{aligned}$$

El DI definia diverses categories de confort humà, però malauradament no hi havia una base teòrica en què es fonamentés aquesta equació ni res que validés aquestes categories de confort.

Posteriorment, la U.S. Weather Bureau va rebatejar aquest índex amb el nom de *Temperature-Humidity Index* (THI).

Paral·lelament, M. K. Thomas va aplicar el DI a les dades meteorològiques de Toronto (Canadà) i el 1965 va argumentar que el *Discomfort Index* (com ja s'ha dit, més tard reanomenat THI) no era suficientment sensible als canvis d'humitat i criticava que l'índex donava valors sempre inferiors a la temperatura ambient, cosa que podia generar confusió. Com a conseqüència va utilitzar una tècnica pròpia per crear un índex anomenat *Humidex*, un índex els valors del qual sempre eren iguals o superiors als de la temperatura ambient. Per a aquest índex va establir i relacionar diversos rangs de valors amb graus de confort.

3.1.2. Breu història i formulació de l'índex Humidex

La fórmula de l'IH, publicada el 1965 per S. R. Anderson, fou:

$$\text{Humidex} = T + h$$

T = temperatura del termòmetre sec ($^{\circ}\text{F}$)

h = constant que depèn de la quantitat d'humitat a l'aire: $e-10$

(e = pressió de vapor (mb o hPa))

El 1976 la fórmula, les classes o graus de confort i la taula per obtenir els valors de l'IH van ser modificats per passar-ho al sistema internacional (SI) d'unitats, ja que quan es va publicar la fórmula original, l'any 1965, Canadà utilitzava el sistema anglosaxó d'unitats i l'any 1975 el país va fer el canvi a l'SI.

$$\text{Humidex} = T + h$$

T = temperatura del termòmetre sec ($^{\circ}\text{C}$)

$h = 5/9 \times (e-10)$ (e = pressió de vapor (mb o hPa))

L'IH, doncs, s'obté mitjançant la temperatura i la pressió de vapor. Per tal de calcular la pressió de vapor es va aplicar a la fórmula una forma modificada de l'equació de Clausius-Clapeyron que relaciona la pressió (pressió de vapor de saturació) amb la temperatura, resultant el càlcul de la e (pressió de vapor) de la següent manera:

$$e = 6,11 \times e^{5.417,7530 \times \left(\frac{1}{273,16} - \frac{1}{273,15 + T_r} \right)}$$

$$e = 2,718281828459\dots$$

T_r = temperatura punt de rosada ($^{\circ}\text{C}$)

5417,7530 = constant fruit del pes molecular de l'aigua (18,016 g/mol) per la calor latent d'evaporació (597,3 cal/g) i dividit per la constant universal dels gasos ($8,3144 \times 10^7$ erg/(K·mol))

D'aquesta manera, l'actual fórmula reelaborada i desenvolupada per J. M. Masterton i F. A. Richardson (1979), de l'Atmospheric Environment Service (actual Meteorological Service of Canada) és:

$$\text{Humidex} = T + h$$

$$\text{Humidex} = T + \frac{5}{9} \times \left(6,11 \times e^{5.417,7530 \times \left(\frac{1}{273,16} - \frac{1}{273,15 + T_r} \right)} - 10 \right)$$

Així doncs, l'IH es calcula mitjançant la combinació de la temperatura i el punt de rosada. L' h representa el nombre de graus Celsius que s'han d'afegir a la temperatura ambient per explicar el malestar addicional associat a la humitat excessiva. Per tant, l'IH és un equivalent a la temperatura ambient tenint en compte la combinació de la temperatura i humitat de l'aire, les dues variables que reflecteixen millor el grau de malestar per calor.

Cal tenir en compte que, en tractar-se d'un índex, en sentit estrictament matemàtic els valors no tenen associada cap unitat, però per facilitar la seva comprensió i per la popularització que se n'ha fet, molt sovint s'hi afegeix la unitat de graus.

Les classes establertes dels valors d'IH s'han obtingut intuïtivament i l'experiència ha demostrat que proporcionen una bona descripció del grau de malestar percebut per la majoria de les persones.

Finalment, en el cas de la fórmula inicial, com que la pressió parcial de vapor d'aigua és, en molts casos, una variable no disponible es pot calcular mitjançant la humitat relativa i la pressió de vapor de saturació de l'aire segons aquesta fórmula:

$$e = \left(\frac{HR}{100} \right) \times e_{sat}$$

e_{sat} = pressió de vapor saturat (hPa)
 HR = Humitat relativa

I per calcular la pressió de vapor de saturació pot utilitzar-se l'aproximació polinòmica (sugerida per Lowe, 1977), sota la condició que la temperatura estigui compresa entre els -50°C i +50°C:

$$e_{sat} = a0 + T \times (a1 + T \times (a2 + T \times (a3 + T \times (a4 + T \times (a5 + T \times a6))))$$

$a0 = 6,107799961$
 $a1 = 4,436518521 \times 10^{-1}$
 $a2 = 1,428945805 \times 10^{-2}$
 $a3 = 2,650648471 \times 10^{-4}$
 $a4 = 3,031240396 \times 10^{-6}$
 $a5 = 2,034080948 \times 10^{-8}$
 $a6 = 6,136820929 \times 10^{-11}$

Com a consideració final, cal dir que l'IH s'ha elaborat per utilitzar-se amb temperatures a partir de 20°C ja que amb temperatures iguals o inferiors a aquest valor l'índex no supera en cap cas el valor de 29°, llinar a partir del qual comença la categoria de malestar tèrmic.

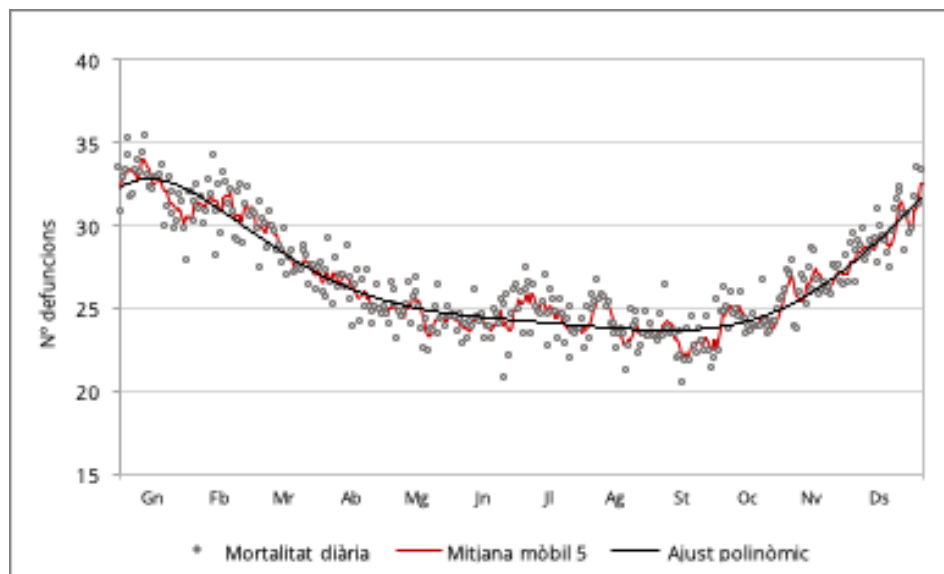
3.2. Modelització de la mortalitat mitjana diària i de la temperatura i IH mitjans diaris

Per a l'obtenció de la mortalitat mitjana diària teòrica s'ha procedit a la modelització de la mateixa mitjançant un ajust polinòmic. En aquest cas, l'equació polinòmica ha estat de 6è grau ja que si bé en les de grau inferior la corba polinòmica s'ajustava en general de manera satisfactòria no ha estat fins al 6è grau que els extrems –inici i final d'any– han presentat un bon ajust (fig. 1).

Tot i que generalment pot aparèixer el problema d'hiperajust en aplicar equacions polinòmiques de grau elevat, en aquest cas no s'ha produït i la corba mostra un recorregut lliure d'inflexions locals al llarg de tot l'any.

Aquesta modelització permetrà obtenir els residus de mortalitat de tots els dies de la sèrie (2007-2018). El fet de treballar amb residus provinents de la modelització permet eliminar les periodicitats i la tendència que estan presents

Figura 1. Modelització de la mortalitat mitjana diària per milió d'habitants durant el període 2007-2018



si es treballa amb les dades de mortalitat diària mitjana, i en aquest sentit permet detectar millor la relació causal entre temperatura/sensació tèrmica i mortalitat (Díaz *et al.*, 2015).

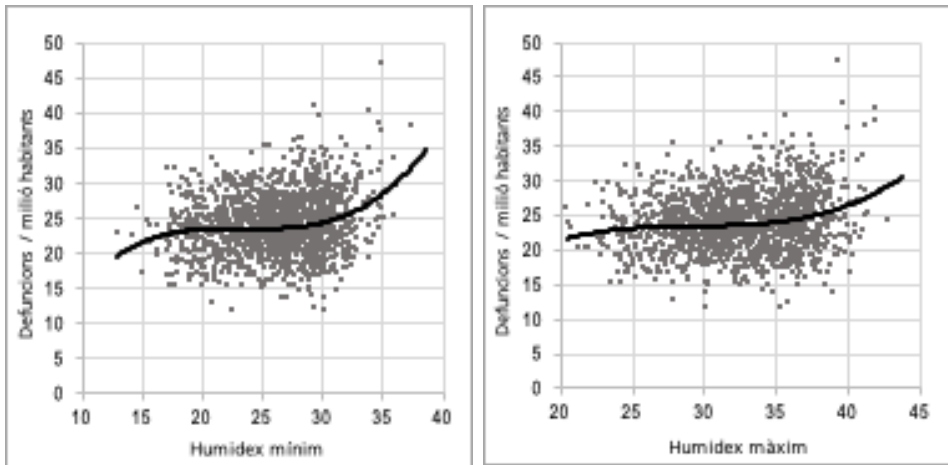
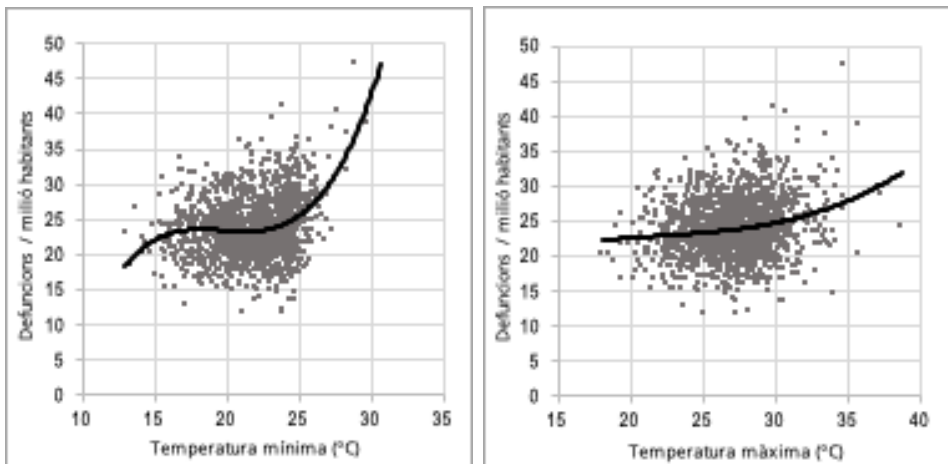
D'altra banda, per tal d'obtenir també les teòriques mitjanes diàries de temperatures i d'IH s'ha procedit també a la seva modelització mitjançant, igualment, l'ajust polinòmic, en aquest cas de tercer grau, amb encaix molt satisfactori.

El fet de modelitzar i suavitzar les variables meteorològiques diàries mitjanes permetrà una millor detecció de les anomalies tèrmiques i reforçarà la relació causal de les correlacions que se'n derivin.

3.3. Correlació i regressió de valors meteorològics i mortalitat. Llíders d'increment de mortalitat

Una primera aproximació a la relació entre les quatre variables meteorològiques – T_{\min} , T_{\max} , IH_{\min} i IH_{\max} – analitzades i la mortalitat ve determinada pel grau de correlació existent entre elles. Amb aquest propòsit s'han correlacionat totes les dades diàries de les variables esmentades (fig. 2 i 3) i s'han obtingut els coeficients de correlació i determinació alhora que s'ha realitzat l'anàlisi de la variància per tal de determinar la significació de la correlació.

Posteriorment, i aplicant la metodologia emprada en la determinació de les temperatures líders d'increment de la mortalitat per onades de calor (Díaz *et al.*, 2015), s'ha analitzat les T_{\min} i T_{\max} i els IH_{\min} i IH_{\max} amb què es dispara la mortalitat a la ciutat de Barcelona. Per a això s'han calculat els residus

Figura 2. Ajust per corba polinomial de la relació entre mortalitat i IH diaris (2007-2018)**Figura 3.** Ajust per corba polinomial de la relació entre mortalitat i temperatura diàries (2007-2018)

mitjans de mortalitat diària per a cada valor de les quatre variables meteorològiques amb els seus respectius intervals de confiança del 95%.

Paral·lelament, també s'ha calculat l'interval de confiança del 95% de la mitjana de tots els residus de mortalitat de la sèrie –mitjana que òbviament té valor zero–, d'aquesta manera quan l'interval de confiança de les mitjanes dels residus de mortalitat per a cada valor de les variables meteorològiques quedi per sobre, de forma contínua, de l'interval de confiança de mitjana zero de tots els residus de mortalitat de la sèrie podrà afirmar-se que l'inici de l'increment de la mortalitat a partir d'aquells valors es produeix de forma estadísticament significativa.

Finalment, un cop determinades les temperatures i IH associats a l'inici de l'increment de la mortalitat –tant pel que fa als estadísticament significatius com als que no– s'efectuen noves correlacions a partir d'aquests llindars per tal de poder quantificar la relació causal de forma més representativa.

4. Resultats

4.1. Millors variables explicatives de la mortalitat

Els coeficients de correlació així com els de determinació derivats de la relació entre les variables atmosfèriques i la mortalitat del total de dades diàries de la sèrie presenten en general valors relativament baixos (taula 2), si bé cal assenyalar que els respectius p-valor, pròxims a zero, de les quatre variables (Tmín i Tmàx, IHmín i IHmàx) confirmen estadísticament la significació de la relació.

Taula 2. Coeficients de correlació (r), determinació (r^2) i p-valor de la relació de les variables atmosfèriques diàries amb la mortalitat diària

Variable	r	r^2	p-valor
IHmín	0.21	0.04	0.01195x10 ⁻¹¹
IHmàx	0.19	0.03	0.04537x10 ⁻⁹
Tmín	0.28	0.08	0.03176x10 ⁻²⁴
Tmàx	0.20	0.04	0.01080x10 ⁻⁹

En correlacionar d'entrada tots els valors tèrmics de la sèrie amb la mortalitat és lògic que els coeficients r i r^2 siguin relativament baixos ja que un bon rang de valors de temperatura i IH no presenten cap tipus de relació amb la mortalitat, és a dir, molts valors (en general, la majoria excepte els extrems) no provoquen cap efecte en les persones.

En l'anàlisi per a la determinació dels llindars dels valors de temperatura i IH que disparen la mortalitat diària a Barcelona mitjançant els residus de mortalitat cal distingir aquells llindars que són estadísticament significatius i els que no. De forma general es pot establir que un primer llindar tèrmic relacionat amb l'increment de la mortalitat és aquell a partir del qual les mitjanes dels residus de mortalitat se situen per sobre del nivell de confiança (95%) de la mitjana del total de residus de mortalitat de la sèrie. En aquest sentit, han quedat establerts els següents valors: 24°C per a la Tmín, 29 per a l'IHmín, 29°C per a la Tmàx i 35 per a l'IHmàx.

Tanmateix, cap d'aquests llindars no provoca un augment de la mortalitat estadísticament significativa ja que el límit inferior dels seus intervals de confiança està per sota del límit superior de l'interval de confiança de la mitjana del total de residus de la sèrie. En aquest sentit, els llindars estadísticament

significatius d'increment de la mortalitat han quedat establerts en 25°C per a la Tmín –coincidint amb el que s'anomena popularment com a *nits tòrrides*– i 33 per a l'IHmín, alhora que cal destacar que tant per a la Tmàx com per a l'IHmàx diaris aquests llindars no existeixen ja que en cap cas compleixen el fet de ser estadísticament significatius (fig. 4 a 7) i, tot i que es compleixi en algun valor, no hi ha continuïtat. Així doncs, els llindars mínims diaris explicarien millor els efectes de la mortalitat quan es registren temperatures o temperatures de sensació (IH) extremes.

Figura 4. Residus mitjans de mortalitat diària per als valors d'IHmín diari

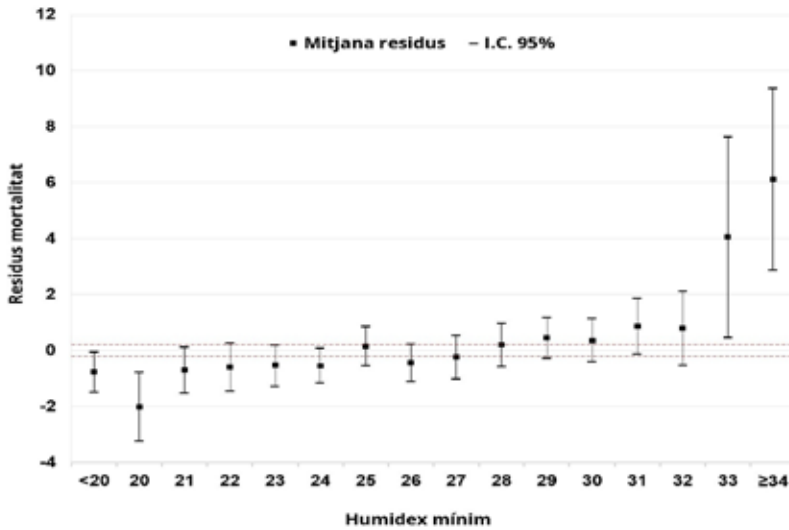


Figura 5. Residus mitjans de mortalitat diària per als valors d'IHmàx diari

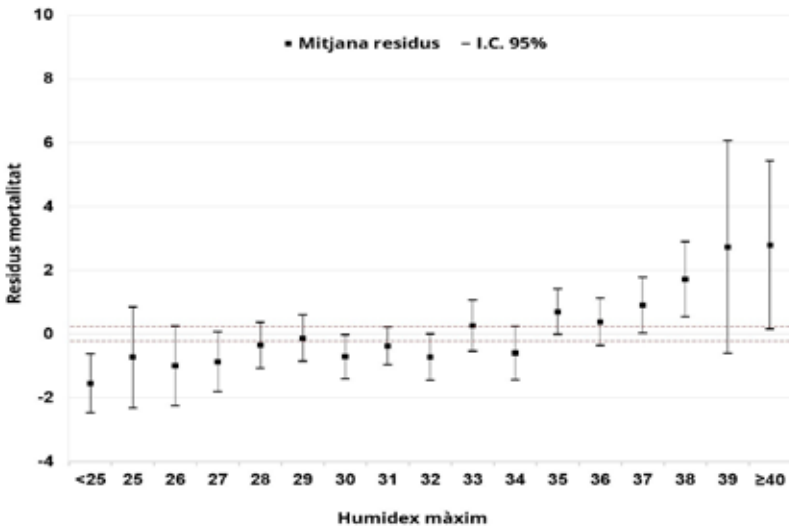


Figura 6. Residus mitjans de mortalitat diària per als valors de Tmín (°C) diària

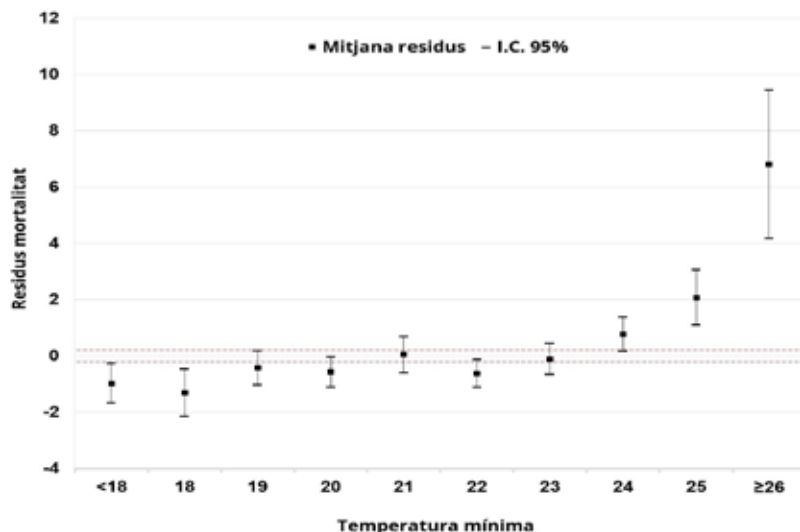
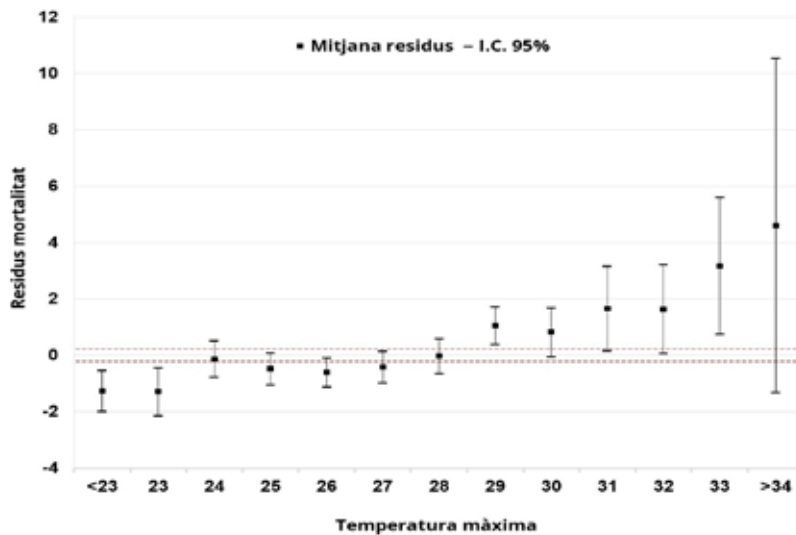


Figura 7. Residus mitjans de mortalitat diària per als valors de Tmàx (°C) diària



Un cop determinats els diferents llinars a partir dels quals es dispara la mortalitat s'han efectuat noves correlacions, en aquest cas tenint en compte només els valors de temperatura i IH a partir dels quals s'incrementa la mortalitat, és a dir, aquelles temperatures o IH que presenten un efecte real en la mortalitat.

Com pot observar-se a la taula 3, els valors de correlació i determinació, pel que fa a l'IHmín i Tmín, han augmentat de forma moderada en relació a

les correlacions anteriors en què es relacionaven el total dels valors de la sèrie. Tanmateix, pel que fa a la $T_{m\grave{a}x}$ i $IH_{m\grave{a}x}$ aquests valors han disminuït i, per tant, d'això es desprèn que els valors extrems d'aquestes dues variables, tot i presentar uns p-valor que confirmen la relació, no explicarien bé la relació causa-efecte amb la mortalitat.

Taula 3. Coeficients de correlació (r), determinació (r^2) i p-valor de la relació de les variables atmosfèriques amb la mortalitat segons tots els valor i segons llindars.

Variable	Tots els valors			Llindars (x) d'increment de mortalitat				Llindars (x) significatius d'increment de mortalitat			
	r	r ²	p-valor	r	r ²	p-valor	x	r	r ²	p-valor	x
IH _{mín}	0.21	0.04	0.01e ⁻¹¹	0.29	0.08	0.06e ⁻⁵	≥29	--	--	--	--
IH _{màx}	0.19	0.03	0.05e ⁻⁹	0.16	0.03	0.01	≥35	--	--	--	--
T _{mín}	0.28	0.08	0.03e ⁻²⁴	0.42	0.18	0.03e ⁻¹⁰	≥24°	0.56	0.31	0.04e ⁻⁶	≥25°
T _{màx}	0.20	0.04	0.01e ⁻⁹	0.14	0.02	0.04	≥29°	--	--	--	--

Així doncs, l'IH_{mín} passa d'un coeficient de correlació de 0,21 per a tots els valors a 0,29 per a un llindar de valor 29, i la T_{mín}, de 0,28 a 0,42 per a temperatures iguals o superiors a 24°C, essent la variable amb una millor correlació. Per altra banda, l'IH_{màx} redueix el seu coeficient de correlació de 0,19 a 0,16 en passar d'una mostra configurada per tots els valors a una mostra a partir del llindar 35, i la T_{màx} el disminueix de 0,20 a 0,14 per a un llindar de 29°C.

Finalment, cal assenyalar que de les dues variables—temperatura i IH mínims—en què els llindars complien a priori el fet de ser estadísticament significatius, només la T_{mín} presenta un coeficient de correlació estadísticament significatiu (p-valor < 0,05), mentre que l'IH_{mín} (p-valor = 0,258) no compleix aquest requisit i, per tant, de les quatre variables analitzades seria la T_{mín} la que explicaria millor la relació causal que tenen els valors extrems sobre la mortalitat en què a partir dels 25°C començaria aquesta a disparar-se i de forma acusada en valors superiors. El coeficient de correlació en el cas del llindar de 25°C augmentaria fins al 0,56.

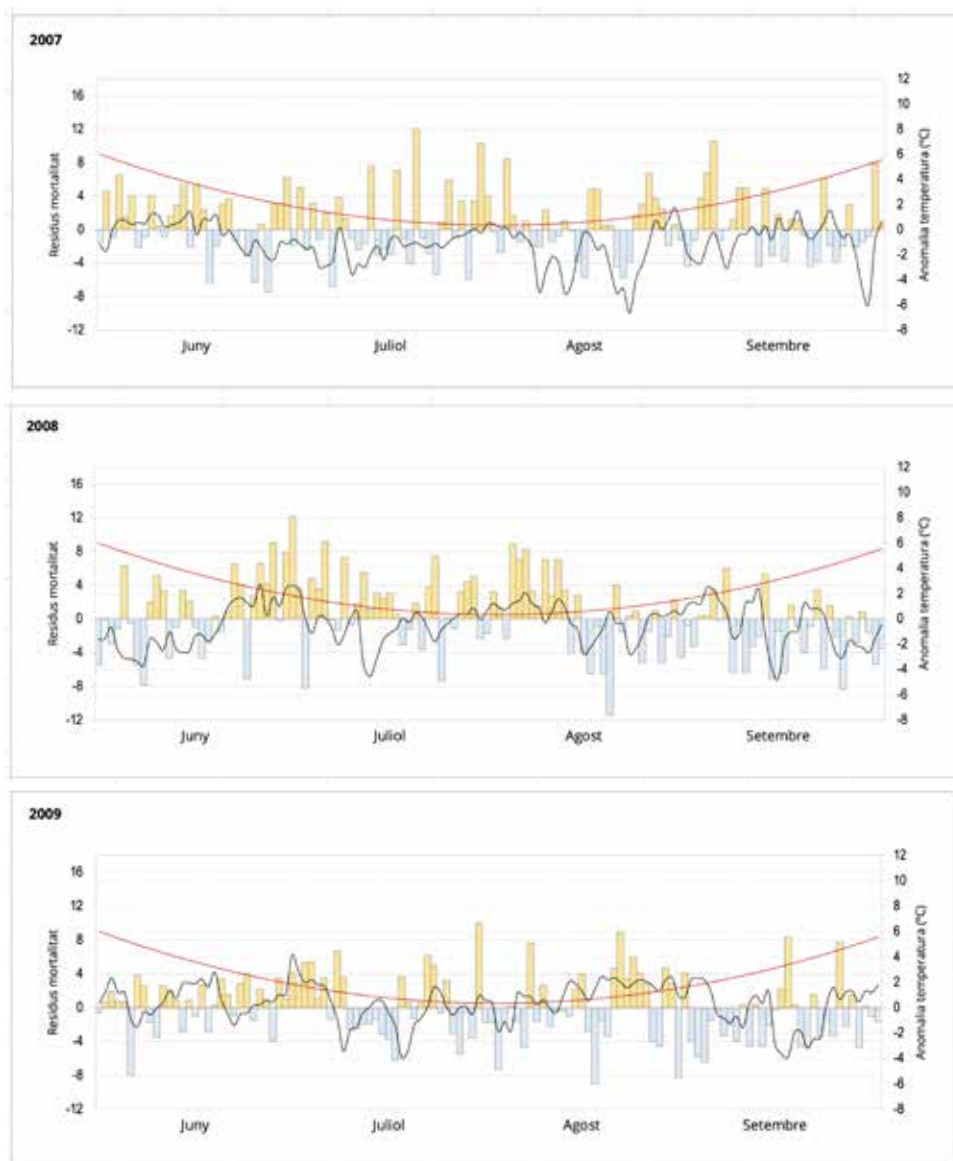
Cal matisar el fet que l'IH_{mín} que també presentava una mitjana dels residus de mortalitat estadísticament significativa per al llindar de valor 33 i que no mostra ara una correlació estadísticament significativa podria estar relacionat amb la mostra relativament petita dels valors que se situen per sobre d'aquest llindar.

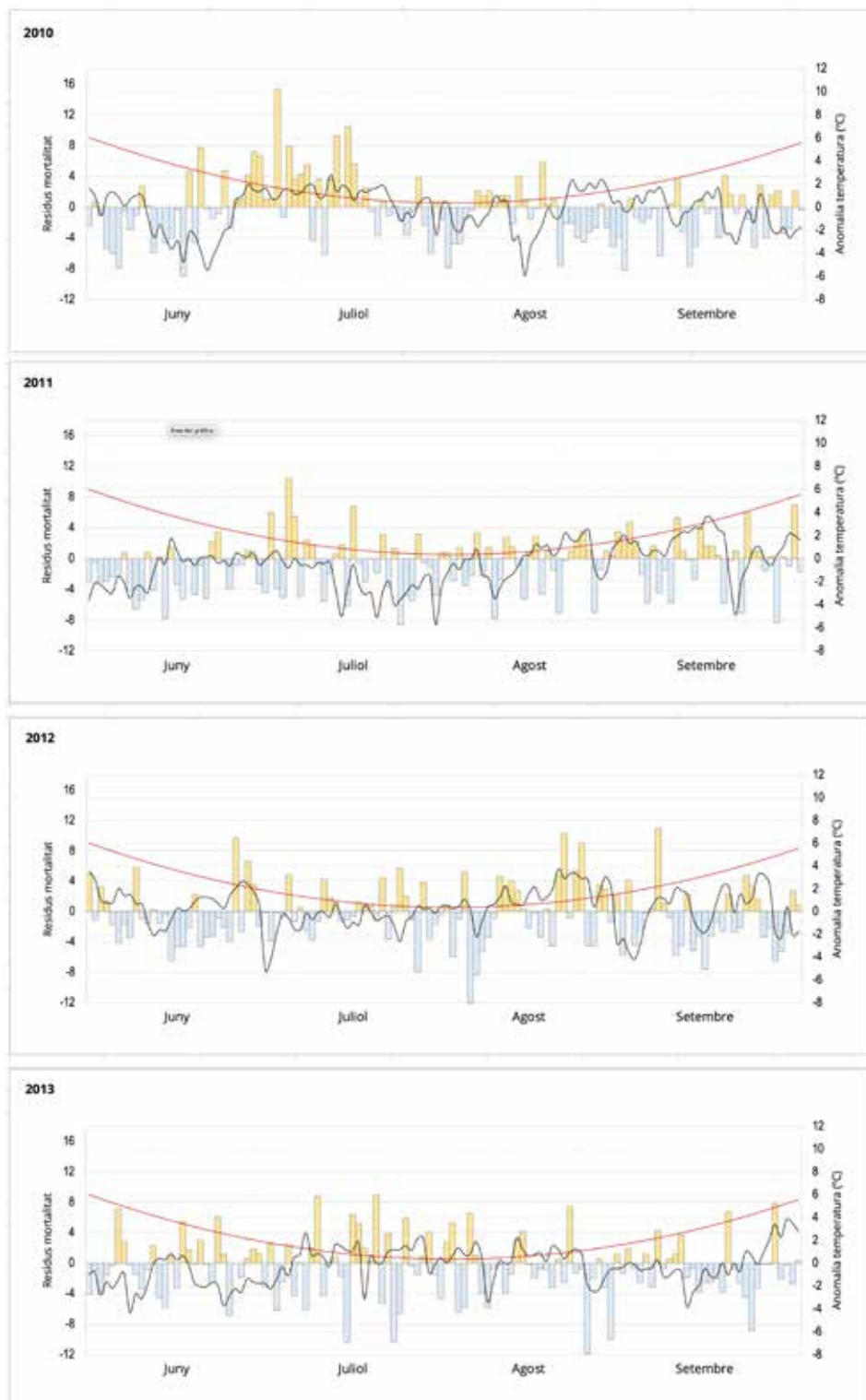
4.2. Episodis d'anomalies tèrmiques positives: T_{mín} i mortalitat

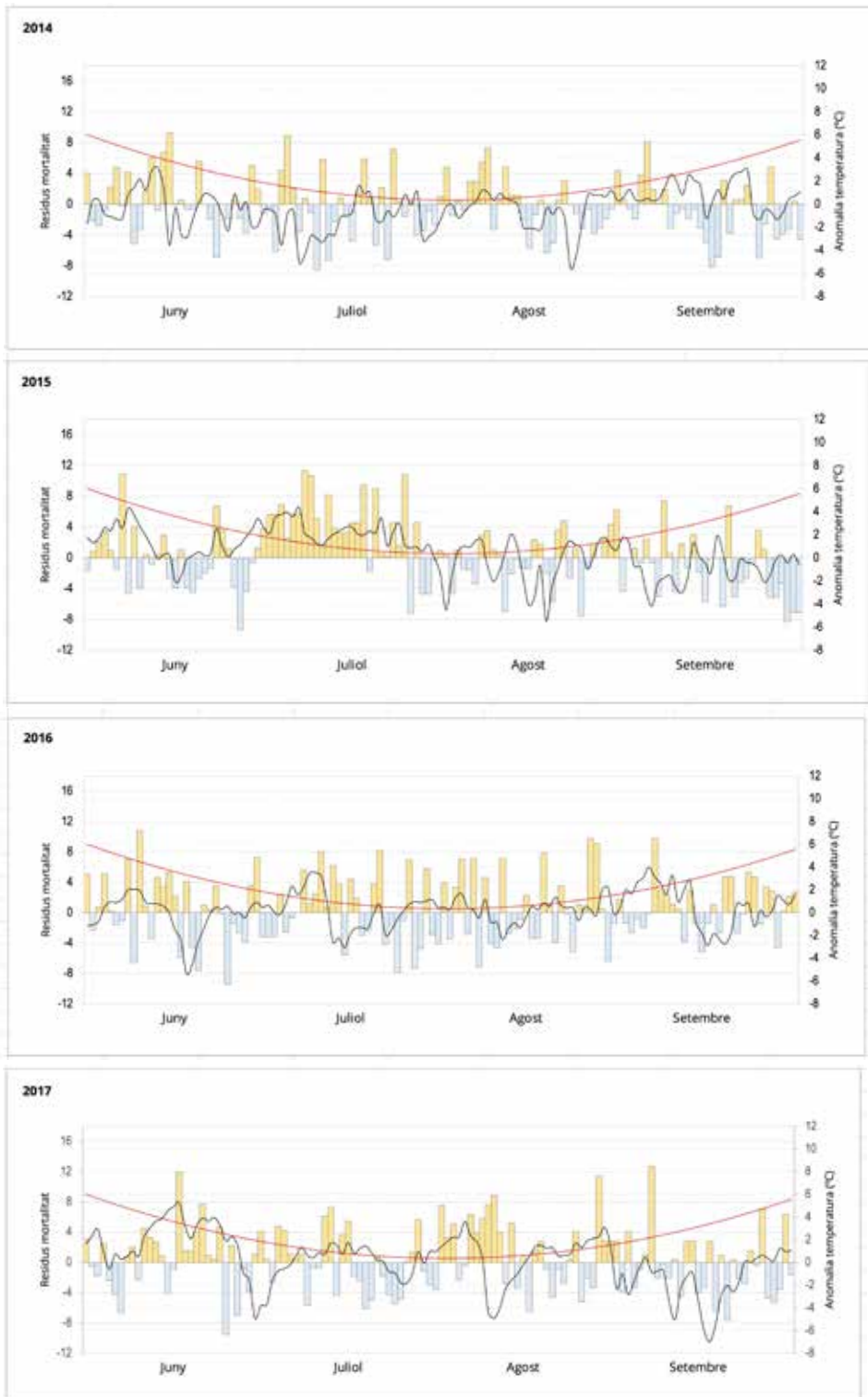
Els resultats gràfics (fig. 8 a 19) de la representació de les anomalies tèrmiques positives de la T_{mín} i els residus de mortalitat diaris permet visualitzar la relació directa o positiva entre les dues variables així com també les variacions d'intensitat.

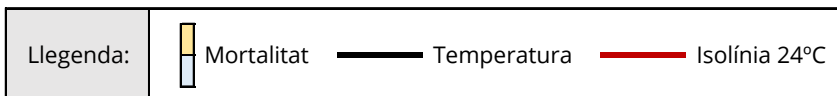
Les figures 8 a 19 incorporen les variables dels residus de mortalitat diària, les anomalies tèrmiques diàries de la $T_{mín}$ i, a més a més, la isolínia de 24°C , valor que suposa el primer llindar –analitzat anteriorment– a partir del qual es produeix l'increment de la mortalitat. En aquest sentit, pot observar-se com en la majoria de dies en què la línia de les anomalies tèrmiques (línia negra) sobrepassa la isolínia de 24°C (línia vermella) els residus de mortalitat diària són positius, fet que permet confirmar la relació prèviament analitzada de causalitat entre la $T_{mín}$ i mortalitat.

Figures 8 a 19. Sèries d'anomalies diàries de $T_{mín}$ i residus de mortalitat,









En general, pot desprendre's de les figures 8 a 19 que les anomalies positives de la $T_{mín}$ diària en relació a la seva mitjana teòrica coincideixen amb desviacions positives dels residus de mortalitat diària, especialment quan les anomalies tèrmiques se situen per sobre del llindar dels 24°C.

De l'anàlisi dels residus mitjans de mortalitat per a cada valor de $T_{mín}$ s'han obtingut els següents resultats: per a 24°C® +0,8 residu mitjà de mortalitat (95% interval de confiança (IC): +0,2/+1,4); per a 25°C® +2,1 de residu mitjà de mortalitat (IC: +1,1/+3,1), i per a 26°C® +6,8 de residu mitjà de mortalitat (IC: +4,2/+9,5), per tant, és lògica la relació d'ambdues variables per sobre del llindar dels 24°C. En aquest sentit, s'observen dos fets característics: primer, que la intensitat de l'anomalia tèrmica positiva concorda amb la intensitat de l'augment de la mortalitat i, segon, que la successió de diversos dies d'anomalia tèrmica positiva, tot i no superar el llindar dels 24°C, sembla constatar un cert predomini de residus de mortalitat diària positiva.

5. Discussió i conclusions

L'estudi dels efectes de les temperatures i temperatures de sensació extremes en la població comporta una elevada complexitat, especialment quan s'analiza la mortalitat ja que aquesta presenta el factor d'aleatorietat i és fruit de moltes i diverses causes que poden interferir en la valoració dels efectes i l'impacte de les temperatures extremes, generant un cert grau d'incertesa. Així mateix, la variació d'altres factors com els socioeconòmics també poden influir o alterar la variable de la mortalitat. Malgrat totes les incerteses, cal dir que ha quedat ben demostrat en nombrosos estudis científics, com s'ha assenyalat anteriorment,

l'impacte que les temperatures anormalment altes provoquen en la salut de la població i la seva relació amb l'increment de la mortalitat.

Cal matisar, però, que només una petita part de les defuncions derivades de la relació calor-mortalitat ve causada directament per hipertèrmia –cop de calor en la variant més lligada als decessos– (Kenney *et al.*, 2014). Les principals causes, segons Basagaña (Basagaña *et al.*, 2011), estan relacionades amb malalties cardiovasculars, respiratòries, del sistema nerviós i mental, malalties del ronyó i diabetis.

La majoria d'estudis europeus confirmen que els majors de 65 anys i les dones són els grups més vulnerables i sensibles (Hutter *et al.*, 2007; Kovats i Hajat, 2008; Basu, 2009; Oudin Åström *et al.*, 2011; Kenney *et al.*, 2014; etc.).

El present treball constata, a la ciutat de Barcelona, l'existència estadísticament significativa de la relació causal calor-mortalitat mitjançant l'anàlisi de quatre variables meteorològiques: $T_{mín}$, $T_{màx}$, $I_{Hmín}$ i $I_{Hmàx}$, del qual també es desprèn que la $T_{mín}$ i l' $I_{Hmín}$ presenten una millor correlació amb la mortalitat que la $T_{màx}$ i l' $I_{Hmàx}$.

Els llindars resultants que determinen un increment de la mortalitat per a les variables analitzades són: 25°C per a la $T_{mín}$ i 33 per a l' $I_{Hmín}$, mentre que no es poden definir aquests llindars per a la $T_{màx}$ ni l' $I_{Hmàx}$ ja que no són estadísticament significatius. En aquest mateix sentit, la $T_{mín}$ és la que presenta el coeficient de correlació més alt (0,56) i l'únic que és estadísticament significatiu. Així doncs, pot concloure's que la $T_{mín}$ és la variable que explica millor l'impacte de la calor intensa sobre la salut de les persones en termes de mortalitat i, donat que, generalment, aquesta s'assoleix a la nit o just a trenc d'alba, pot afirmar-se que són les nits extremadament càlides la principal causa de l'increment de mortalitat per calor, desapareixent-se els valors, i de forma exponencial, a partir dels 25°C de $T_{mín}$ nocturna.

Si bé molts treballs han optat per establir uns llindars basats en els percentils dels valors tèrmics, els qui han utilitzat la temperatura absoluta –com en aquest estudi– per a diverses ciutats han demostrat que els llindars varien segons el període o ciutat en funció de les pròpies característiques climatològiques. Així, per exemple, per al període 2000-2009, el llindar de $T_{mín}$ és de 24°C a València o 26°C a Almeria (Díaz *et al.*, 2015).

En les darreres dècades, i en el marc climàtic actual, s'ha constatat un increment de la $T_{mín}$ en tot l'àmbit mediterrani (Royé i Martí, 2016; Abbasnia i Toros, 2018; Scorzini *et al.*, 2018), qualificant aquesta regió com a un *hot-spot* del canvi climàtic. Alguns estudis (Tobías *et al.*, 2014) assenyalen Barcelona com una de les ciutats mediterrànies on l'efecte de les temperatures extremes provoca un major increment de la mortalitat.

En aquest context, i segons contempen tots els futurs escenaris al *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya* (IEC, 2016), es preveu un augment de la mortalitat per calor a Barcelona fruit d'aquesta tendència d'increment tèrmic. Aquest fet, a més a més, es veu agreujat en aquest cas per diversos factors:

1) el fenomen de l'illa de calor, present a les grans ciutats com Barcelona, que intensifica les condicions d'estrès tèrmic durant les hores nocturnes en episodis d'onada de calor o calor intensa en comparació a les zones rurals (Katavoutas i Founda, 2019); 2) l'increment de la temperatura del mar Mediterrani (Pastor *et al.*, 2020) que influeix en l'increment de la temperatura ambient (Olcina *et al.*, 2019), i 3) l'envelliment de la població que comporta un major nombre potencial de persones de risc davant l'impacte de les temperatures anormalment altes.

En aquesta línia, i com a futura recerca, caldrà incorporar els models i projeccions de canvi climàtic per tal d'avaluar com i en quin grau l'augment de la temperatura en el nostre àmbit podrà incrementar les taxes de mortalitat per calor en un futur immediat, i reflexionar i adoptar les mesures necessàries per minimitzar aquest impacte.

Bibliografia

- ABBASNIA Mohsen; H. TOROS (2018). "Analysis of long-term changes in extreme climatic indices: a case study of the Mediterranean climate, Marmara Region, Turkey". *Pure and Applied Geophysics*, vol. 175, núm. 11, p. 3861-3873.
- ALMEIDA, Sofia; E. CASIMIRO; J. CALHEIROS (2010). "Effects of apparent temperature on daily mortality in Lisbon and Oporto, Portugal". *Environmental Health*, núm. 9, art. 12, p. 1-7.
- BASAGAÑA, Xavier; C. SARTINI; J. BARRERA-GOMEZA; P. DADVAND; J. CUNILLERA; B. OSTRO; J. SUNYER; M. MEDINA-RAMÓN (2011). Heat waves and cause-specific mortality at all ages. *Epidemiology*, vol. 22, núm. 6, p. 765-772.
- BASU, Rupa (2009). "High ambient temperature and mortality: a review of epidemiologic studies from 2001 to 2008". *Environmental Health*, núm. 8, art. 1, p. 40-52.
- BANDALA, Erick R.; K. KEBEDE; N. JONSSON; R. MURRAY; D. GREEN; J. F. MEJIA; P. F. MARTINEZ-AUSTRIA (2019). "Extreme heat and mortality rates in Las Vegas, Nevada: inter-annual variations and thresholds". *International Journal of Environmental Science and Technology*, núm. 16, p. 7175-7186.
- CHODHARY, Ekta; A. VAIDYANATHAN (2014). "Heat stress illness hospitalizations. Environmental public health tracking program, 20 States, 2001-2010". *Morbidity and Mortality Weekly Report*, vol. 63, núm. 13, p. 1-12.
- DÍAZ JIMÉNEZ, Julio; C. LINARES GIL; R. GARCÍA HERRERA (2005). "Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones". *Revista española de salud pública*, vol. 79, núm. 2, p. 145-157.
- DÍAZ JIMÉNEZ, Julio; R. CARMONA ALFÉREZ; C. LINARES GIL (2015). *Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al calor en España en el periodo 2000-2009*. Madrid: Instituto de Salud Carlos III. Escuela Nacional de Sanidad.
- IEC-INSTITUT D'ESTUDIS CATALANS (2016). *Tercer informe sobre el canvi climàtic a Catalunya*. Generalitat de Catalunya.
- FENNER, Daniel; A. HOLTSMANN; A. KRUG; D. SCHERER (2019). "Heat waves in Berlin and Potsdam, Germany - Longterm trends and comparison of heat wave definitions from 1893 to 2017". *International Journal of Climatology*, núm. 39, p. 2422-2437.
- GIANOPOULOU, Konstantina-Stavroula; I. LIVADA; M. SANTAMOURIS; M. SALIARI; M. ASSIMAKOPOULOS; Y. CAOURIS (2014). "The influence of air temperature and humidity on human thermal comfort over the greater Athens area". *Sustainable Cities and Society*, núm. 10, p. 184-194.

- HUTTER, Hans-Peter; H. MOSHAMMER; P. WALLNER; B. LEITNER; M. KUNDI (2007). "Heat-waves in Vienna: effects on mortality". *Wiener Klinische Wochenschrift*, vol. 119, núm. 7-8, p. 223-227.
- KATAVOUTAS, George; D. FOUNDA (2019). "Response of urban heat stress to heat waves in Athens (1960–2017)". *Atmosphere*, vol. 10, núm. 9, art. 483.
- KENNEY, W. Larry; D. H. CRAIGHEAD; L. M. ALEXANDER (2014). "Heat waves, aging, and human cardiovascular health". *Medicine and Science in Sports and Exercise*, vol. 46, núm. 10, p. 1891-1899.
- KOVATS, R. Sari; S. HAJAT (2008). "Health stress and public health: a critical review". *Annual Review of Public Health*, núm. 29, p. 41-55.
- LORIDAN, Thomas; L. COATES; D. ARGÜESO; S. PERKINS-KIRKPATRICK; J. MCANENEY (2016). "The Excess Heat Factor as a metric for heat-related fatalities: defining heatwave risk categories". *Australian Journal of Emergency Management*, vol. 31, núm. 4, p. 31-37.
- LUKIĆ, Milica; M. PECELJ; B. PROTIĆ; D. FILIPOVIĆ (2019). "An evaluation of summer discomfort in Niš (Serbia) using Humidex". *Journal of the Geographical Institute 'Jovan Cvijić'*, vol. 69, núm. 2, p. 109-122.
- MARTÍNEZ-AUSTRIA POLIPIOTI; E. R. BANDALA (2018). "Heat Waves: Health Effects, Observed Trends and Climate Change", dins: Philip JOHN SALLIS [ed.]. *Extreme Weather*. IntechOpen. <https://www.intechopen.com/books/extreme-weather/heat-waves-health-effects-observed-trends-and-climate-change>
- MASTERTON, J. M.; F. A. RICHARDSON (1979). Humidex. A method of quantifying human discomfort due to excessive heat & humidity. Downsview, Ontario. *Environment Canada*.
- MORABITO, Marco; A. CRISCI; A. MESSERI; V. CAPECCHI; P. A. MODESTI; G. F. GENSINI; S. ORLANDINI (2014). "Environmental Temperature and Thermal Indices: What Is the Most Effective Predictor of Heat-Related Mortality in Different Geographical Contexts?". *The Scientific World Journal*, vol. 2014, art. 961750.
- OLCINA CANTOS, Jorge; R. SERRANO-NOTIVOLI; J. MIRÓ; O. MESEGUER-RUIZ (2019). "Tropical nights on the Spanish Mediterranean coast, 1950–2014". *Climate Research*, vol. 79, p. 225-236.
- LOUDIN ÅSTRÖM, Daniel; B. FORSBERG; J. ROCKLÖV (2011). "Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies". *Maturitas*, vol. 69, núm. 2, p. 99-105.
- PASTOR, FRANCISCO; J. A. VALIENTE; S. KHODAYAR (2020). "A Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature". *Remote sensing*, vol. 12, núm. 17, art. 2687, p.1-16.
- QIAOXUAN, Lin; L. HUALIANG; L. TAO; L. ZIQIANG; R. L. WAYNE; Z. WEILIN; X. JIANPENG; L. XING; Z. BING; L. SHAO; M. WENJUN (2019). "The effects of excess degree-hours on mortality in Guangzhou, China". *Environmental Research*, vol. 176, art. 108510.
- RASO, José Miguel (2002). "Relación entre las temperaturas diarias y la mortalidad en Barcelona y su ajuste mediante funciones polinómicas", dins: José A. GUIJARRO PASTOR; Miquel GRIMALT GELABERT; Mercedes LAITA RUIZ DE ASÚA; Sergio ALONSO OROZA [ed.]. *El clima y el agua*. Palma de Mallorca: Asociación Española de Climatología, sèrie A, núm. 3, p. 521-532.
- ROYÉ, Dominic, A. MARTÍ (2016). "Análisis espacio-temporal de las noches cálidas en el litoral mediterráneo de España", dins: J. OLCINA CANTOS, R. AMORÓS; E. MOLTÓ [ed.]. *Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio*. Alacant: Instituto Interuniversitario de Geografía, Universidad de Alicante; Asociación Española de Climatología, p. 689-700.
- ROYÉ, Dominic; R. CODESIDO; A. TOBIÁS; M. TARACIDO (2020). "Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain". *Environmental Research*, vol.182, art. 109027.
- SCORZINI, Anna R; M. DI BACCO; M. LEOPARDI (2018). "Recent trends in daily temperature extremes over the central Adriatic region of Italy in a Mediterranean climatic context". *International Journal of Climatology*, vol. 38, núm.S1, p. e741–e757.

- STEADMAN, Robert G. (1979). "The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science". *American Meteorological Society*, vol. 18, núm. 7, p. 861-873.
- TOBIÁS Aurelio; B. ARMSTRONG; A. GASPARRINI; J. DIAZ (2014). "Effects of high summer temperatures on mortality in 50 Spanish cities". *Environmental Health*, vol. 13, núm. 48, p. 1-6.
- TOLIKA, Konstantia (2019). "Assessing Heat Waves over Greece Using the Excess Heat Factor (EHF)". *Climate*, vol. 7, núm. 9, p. 2-15.
- ZHANG, Kai; Y. LI; J. D. SCHWARTZ; M. S. O'NEILL (2014). "What weather variables are important in predicting heat-related mortality? A new application of statistical learning methods". *Environmental Research*, vol. 132, p. 350-359.