Tethys
Revista de meteorologia
i climatologia mediterrània

Tethys 2011, **8**, 91–101
www.tethys.cat
ISSN-1697-1523
eISSN-1139-3394
DOI:10.3369/tethys.2011.8.09
Revista editada per **ACAM**

Estudi de l'onada de calor de l'estiu de 2003 a la façana mediterrània de la Península Ibèrica

M. Castellà[1] **i M. Brunet**[1,2]

[1]Center for Climate Change (C3), Campus Terres de l'Ebre, Universitat Rovira i Virgili; Avda. Remolins, 13-15, Tortosa
[2]Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, NR4 7TJ, UK

Rebut: 21-II-2011 – Acceptat: 18-VIII-2011 – **Versió Original**

Correspondència a: merce.castella@urv.cat

Resum

L'onada de calor que va afectar gran part d'Europa durant l'estiu de 2003 va tenir també un fort impacte sobre la costa mediterrània de la Península Ibèrica (PI). L'objectiu d'aquest estudi és posar en context instrumental i esbrinar el caràcter excepcional o no de l'episodi de calor ocorregut entre juny i agost de 2003 mitjançant l'anàlisi de sèries de temperatures màximes i mínimes ajustades a l'escala diària, corresponents a 5 estacions distribuïdes al llarg de la costa mediterrània de la PI, localitzades de nord a sud a: Barcelona, València, Alacant, Múrcia i Màlaga. L'onada de calor s'ha posat en el context instrumental (1900-2007) i s'han analitzat tant els valors extrems com mitjans de la temperatura de l'estiu de 2003 a escala regional i per estacions meteorològiques individuals. Els resultats indiquen que l'episodi de 2003 pot ser considerat com extrem i inusual, amb una temperatura mitjana areal per a juny-juliol-agost que excedeix de 3,3°C la mitjana 1900-2007, la qual supera en 1,6°C el rècord anterior registrat al 2001. Cal destacar, però, que l'episodi fou més acusat al nord que al sud de la façana mediterrània de la PI.

Paraules clau: onada de calor 2003, període instrumental, distribució tèrmica, costa mediterrània de la Península Ibèrica

1 Introducció

Degut al notable impacte sobre la salut i mortalitat humana així com en l'increment del risc d'incendis forestals, l'estudi dels episodis de calor sostinguda amb temperatures elevades durant diversos dies consecutius són de gran interès per a la societat. Existeixen evidències que l'escalfament global observat en els darrers 150 anys (Trenberth et al., 2007) està afectant la freqüència i intensitat de les onades de calor, fet que fa que el seu estudi a escales més petites que la global, hemisfèrica o continental, sigui altament recomanable.

L'ocurrència anual d'onades de calor s'ha incrementat significativament sobre el centre i part est dels Estats Units, Canadà i en algunes parts d'Europa i Rússia (Alexander et al., 2006). Segons Della-Marta et al. (2007a, 2007b) a l'oest d'Europa hi ha hagut un augment significatiu en la persistència d'onades de calor estivals des de 1880 al 2005 i la durada d'aquestes s'ha duplicat. Estudis elaborats sobre el canvi climàtic suggereixen que les onades de calor europees seran més freqüents i més llargues durant el segle XXI (Meehl i Tebaldi, 2004). I en termes d'impactes per a la salut (Fischer i Schär, 2010), les projeccions indiquen que els seus efectes negatius seran molt més severs a les conques dels rius de baixa altitud al sud d'Europa i a la costa mediterrània, on la freqüència d'onades de calor perilloses, que és ja força elevada, creixerà més ràpidament.

A Europa, Schär et al. (2004) van analitzar l'onada de calor de l'estiu de 2003 a Suïssa a partir de 4 sèries representatives del nord-oest de la falda dels Alps i van obtenir que la mitjana d'estiu (de juny a agost) i dels mesos de juny i agost per al valor mitjà dels 4 observatoris analitzats de la temperatura mitjana diària es trobava lluny de la distribució estadística. L'anomalia tèrmica de l'estiu va ser de 5,1°C respecte a la mitjana del període 1864-2000, que correspon a 5,4 desviacions estàndards.

Per altra banda, Beniston (2004) i Beniston i Díaz (2004) van analitzar la mitjana i els extrems de tempera-

2011 Autor(s). Aquest treball té llicència "Creative Commons".

tura de l'estiu de 2003 (mitjana de juny, juliol i agost) a la ciutat de Basel, situada a la part nord-oest de Suïssa, per tal d'avaluar en quina mesura l'onada de calor de 2003 representava un canvi significatiu des del començament del segle XX. Van obtenir que tot i que l'anomalia de la temperatura màxima d'estiu és la més alta de tot el període, l'esdeveniment de 2003 no trenca tots els registres (1901-2003) a la ciutat de Basel ja que les temperatures màximes excedeixen el llindar de 30°C menys dies que l'any 1947. Pel que fa al nombre de dies seguits amb la temperatura màxima per sobre el llindar el 2003 i el 1911 són iguals i tenen un nombre inferior de dies que el 1947 i el 1976.

Pel conjunt de la Península Ibèrica (PI) les ratxes càlides han augmentat al llarg del s. XX i s'ha detectat un escalfament anual i estacional significatiu de les variables temperatura màxima (T_x), temperatura mínima (T_n) i temperatura mitjana (T_m) i un increment significatiu en els dies i les nits moderadament extremes (T_x i $T_n >$ P90è) (Brunet et al., 2007a i 2007b).

Pejenaute (2004) van analitzar la dinàmica atmosfèrica de la primera quinzena del mes d'agost de 2003 a Navarra, quan la calor va ser un fet excepcional per la seva intensitat i sobretot per la seva duració. Aquest estudi es va portar a terme a partir de dades de temperatura proporcionades per la xarxa d'estacions manuals i automàtiques de Navarra que van enregistrar un període sense precedents per la presència de varies jornades seguides amb valors tèrmics elevats, amb molt poc refredament nocturn.

De l'estudi fet per Díaz et al. (2006) amb dades de temperatura màxima diària per al període 1991-2003 registrades a 50 observatoris d'Espanya i 4 de Portugal, en resulta que la freqüència anual de dies de calor extrem a l'estiu de 2003 és major en la costa mediterrània i al centre-nord de la PI. I pel que fa al grau de dies d'excedència de T_x sobre el llindar, els màxims es troben a la meitat nord peninsular.

Per altra banda, caldria destacar que l'onada de calor va causar a Espanya al voltant de 6500 morts, segons conclou l'estudi publicat a l'informe de la *Sociedad Española de Salud Pública y Administración Sanitaria*, Martínez et al. (2004).

L'onada de calor europea de l'estiu de 2003 ha estat tema d'estudi publicat en articles científics internacionals com s'ha referènciat anteriorment. La importància del present estudi rau en que és l'únic que analitza l'impacte que va tenir particularment sobre la costa mediterrània de la PI i el posa en context instrumental dels darrers 107 anys per poder avaluar si el seu caràcter fou inusual o no. Hem fet una aproximació a la "detecció" estadística de l'excepcionalitat d'aquest estiu mitjançant l'anàlisi estadística de sèries de temperatures ajustades a escala diària de 5 estacions distribuïdes al llarg de la costa mediterrània de la península.

L'article està organitzat com segueix: una descripció de les dades i la metodologia emprada es proporciona a la Secció 2. Els resultats i la discussió es presenten a la Secció 3, que consta de dues subseccions, la primera amb una introducció de l'onada de calor a la costa mediterrània de la PI i la segona amb la contextualització temporal d'aquesta. Finalment a la Secció 4 es resumeixen les conclusions.

Figura 1. Mapa de localització de les 5 estacions SDATS ubicades a la façana mediterrània de la Península Ibèrica.

2 Dades i metodologia

Com és àmpliament reconegut, la realització d'un estudi climàtic, especialment d'anàlisis sobre variabilitat i canvi climàtic, descansa en el requeriment previ de comptar amb sèries temporals fiables, d'alta qualitat i homogènies (Brunet et al., 2008). Per aquest motiu, en aquest estudi s'han utilitzat dades ajustades a l'escala diària que formen part de la base de dades anomenada *Spanish Daily Adjusted Temperature Series* (SDATS) desenvolupada per Brunet et al. (2006, 2007a, 2008). Les SDATS estan compostes per les 22 sèries més llargues, continuades i més fiables de temperatures diàries enregistrades a Espanya des de mitjans del segle XIX fins a principis del segle XXI. Aquesta base de dades va ser creada sota el projecte europeu anomenat *European and North Atlantic daily to MULtidecadal climATE variability* (EMULATE: http://www.cru.uea.ac.uk/projects/emulate/), amb l'objectiu de relacionar les variacions i tendències en els patrons de circulació atmosfèrica i en les anomalies de la temperatura de la superfície marina amb les temperatures i precipitació europees durant el període 1850-2003.

Aquestes sèries han estat acuradament tractades amb un estricte control de qualitat, correcció de les desviacions per efecte del tipus de pantalla protectora dels termòmetres en el passat i ajustades a l'escala diària per minimitzar les ruptures d'homogeneïtat causades per un variat conjunt de factors (Brunet et al., 2006 i 2008).

Les 5 estacions utilitzades per elaborar el present estudi estan localitzades al llarg de la costa mediterrània espanyola (Barcelona, València, Alacant, Múrcia i Màlaga) i queden representades a la Figura 1. A la Taula 1 es dóna informació sobre la seva localització geogràfica i el període d'anàlisi

Taula 1. Localització geogràfica, altura i període de les sèries de les 5 estacions utilitzades.

Localització	Longitud	Latitud	Altura (m)	Període
Barcelona	02°10'36"W	41°25'05"N	420,1	1900-2007
València	00°22'52"E	39°28'48"N	11,4	1900-2007
Alacant	00°29'40"W	38°22'00"N	81,5	1900-2007
Múrcia	01°07'14"W	37°58'59"N	57,0	1900-2007
Màlaga	04°28'57"W	36°39'57"N	6,5	1900-2007

(1900-2007). S'ha acotat el període a 1900-2007 perquè és en aquest interval quan les cinc estacions tenen les seves dades més complertes. Com les sèries SDATS s'estenen sobre el període 1850-2005, s'ha hagut d'actualitzar fins al 2007 amb dades obtingudes de la *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET).

De cada estació meteorològica s'han utilitzat les sèries temporals de les variables de la T_x, T_n i T_m diària i s'ha analitzat l'excepcionalitat de l'estiu del 2003 tant a nivell local com regional. La sèrie regional representativa del conjunt de la costa mediterrània de la PI s'ha calculat a partir de la mitjana simple dels registres de les 5 estacions.

Per tal d'identificar les successives ratxes de dies i nits càlides que van tenir lloc l'estiu de 2003 i fer una valoració intraestacional i també entre observatoris s'han calculat els percentils 90è, 95è i 98è de juny, juliol i agost de T_x i T_n per a cada estació i s'han comparat amb l'evolució diària de T_x i T_n de l'estiu de 2003. A més, s'han calculat els 92 valors mitjans diaris de l'estiu per aquestes variables utilitzant el conjunt de dades estivals del període analitzat (1900-2007), per identificar inicialment el caràcter extrem o no de l'estiu del 2003.

Tant per les sèries individuals com per les regionals, s'han calculat les sèries d'anomalies absolutes respecte del període de referència 1961-1990, mitjançant l'aproximació desenvolupada per Jones i Hulme (1996) de descompondre els valors climàtics en els seus dos components bàsics: la climatologia (valor mitjà) i l'anomalia (diferència sobre un període base o de referència).

Per posar en context l'episodi de calor s'han representat i analitzat les distribucions estadístiques de freqüència de la T_m, T_x i T_n com a eina per esbrinar quina és la posició de l'estiu de 2003 en el conjunt d'estius del període 1900-2007, tant a nivell d'estacions individuals com pel conjunt de la façana mediterrània espanyola. Tanmateix, s'ha estimat la distribució estadística mensual i estacional de T_m de la sèrie regional i estacional de la T_m, T_x i T_n de cada un dels punts considerats i s'han estimat les anomalies estandarditzades de les sèries regionals i individuals corresponents utilitzant com a període base 1900-2007.

Per tal de valorar la persistència dels dies càlids estivals del període 1900-2007, s'ha calculat el nombre de dies en què la T_x i la T_n van superar el percentil 90è en cadascun dels mesos d'estiu del període 1900-2007. També s'ha calculat l'índex de duració de ratxes càlides (*Warm Spell Duration Index* -WSDI- en la seva denominació i acrònim anglès) definit pel grup d'experts: *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI, http://www.clivar.org/organization/etccdi/etccdi.php). Si bé aquest índex ha estat adaptat per analitzar els mesos d'estiu i representa 6 o més dies consecutius amb la temperatura màxima per sobre del percentil 90è. Anàlogament hem analitzat les T_n diàries per estudiar la duració de ratxes de nits càlides, entenent-les com almenys 6 nits consecutives que registren T_n superiors al percentil 90è.

3 Resultats i discussió

Aquesta secció s'ha dividit en tres subseccions per tal d'entendre millor com va ser l'estiu del 2003. A la primera secció s'ha introduït l'episodi centrant-lo en l'estiu en estudi i s'ha analitzat l'evolució de les T_x i T_n diàries durant els tres mesos (juny, juliol i agost). A la segona secció s'ha contextualitzat l'estiu dins el període 1900-2007 i s'ha comparat amb els anteriors. I finalment a la tercera, s'ha analitzat la durada dels dies i les nits càlides a partir d'indicadors climàtics basats en percentils (TX90p, TN90p, WSDI).

3.1 Caracterització de l'onada de calor de 2003 a la costa mediterrània de la Península Ibèrica

Per tal de caracteritzar l'onada de calor de 2003 i esbrinar el seu caràcter excepcional o no, s'han representat per a cada observatori els valors diaris de T_x i T_n de l'estiu del 2003 amb les corresponents mitjanes diàries estivals calculades pel conjunt del període 1900-2007, juntament amb els llindars percentils (P) 90è, 95è i 98è. Aquests llindars identifiquen els esdeveniments càlids (T_x i T_n per sobre del P90è), molt càlids (per sobre del P95è) i extremadament càlids (per sobre del P98è). En la Figura 2 es mostren les representacions per a Barcelona, València i Màlaga.

Els dos episodis més forts d'onada de calor van tenir lloc al juny i a l'agost i van afectar especialment Barcelona, València i Alacant. S'aprecia una disminució de l'afectació envers les localitzacions de més al sud. El primer episodi s'inicia a principis de juny i es prolonga fins a finals de mes, mentre que el segon episodi més intens i persistent es dóna en la primera quinzena d'agost, si bé a Alacant aquestes ratxes de dies càlids són menys marcades.

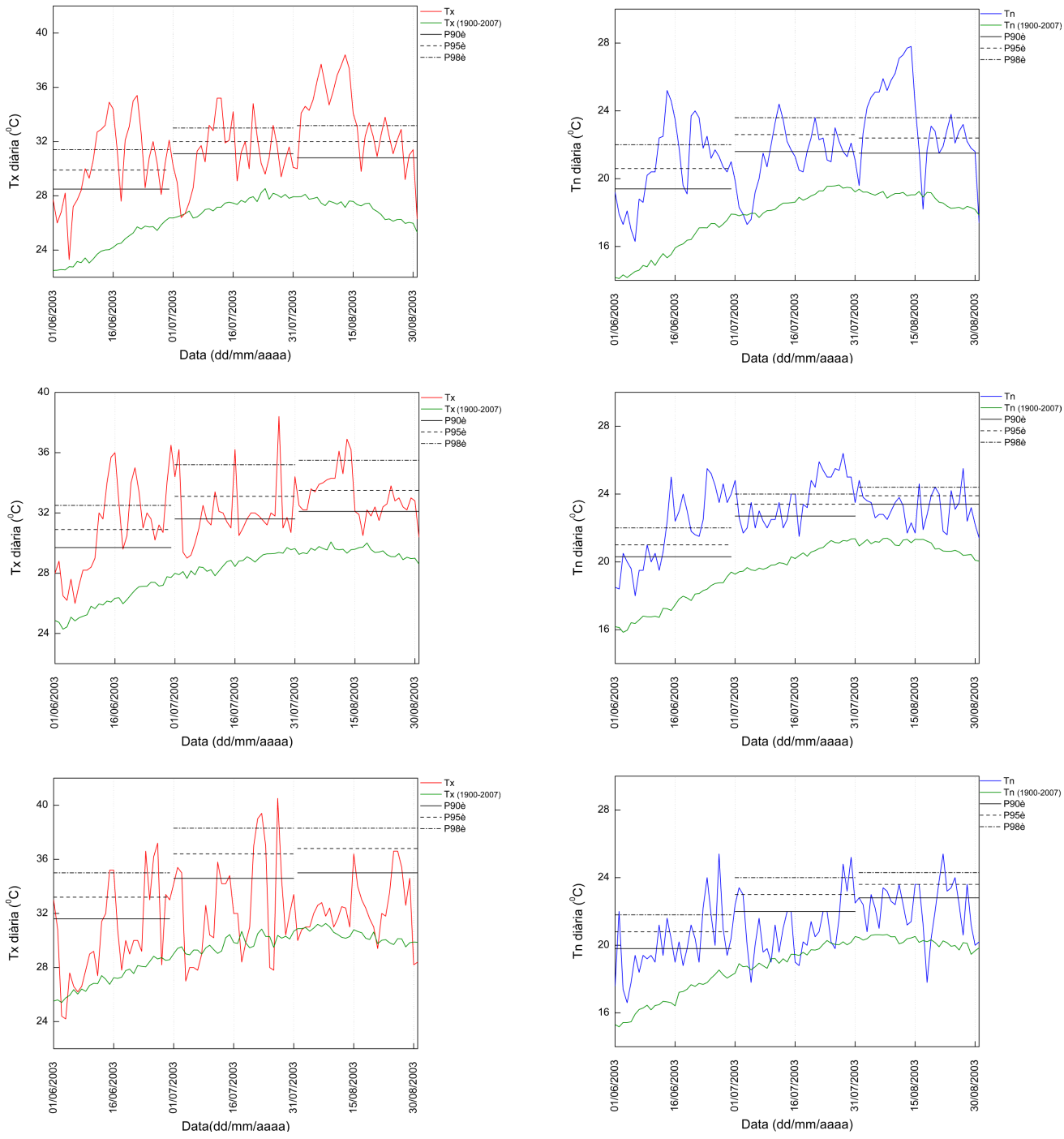

Figura 2. Evolució diària de l'estiu de 2003 amb els percentils 90è, 95è i 98è i evolució del valor mitjà de T_x (esquerra) i T_n (dreta) del període 1900-2007 a Barcelona (a dalt), València (enmig) i Màlaga (a baix).

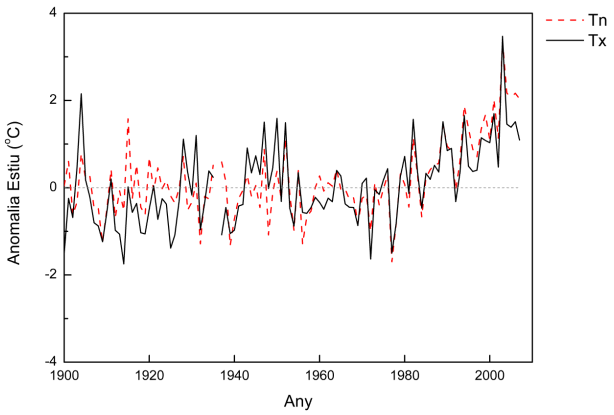

Figura 3. Evolució temporal de les anomalies mitjanes estivals de la T_x i T_n respecte del període de referència 1961-90 a la costa mediterrània de la Península Ibèrica durant el període 1900-2007.

En canvi a Màlaga i Múrcia s'observen T_x elevades sobretot en el mes de juny i finals de juliol amb dies molt càlids i extremadament càlids, però a diferència de la part nord al sud de la costa no hi ha persistència de la calor, ja que s'alternen dies molt càlids amb d'altres de no tant.

Per a les T_x cal destacar, tal com indiquen Serra et al. (2010), que el dia 13 d'agost de 2003 a l'Observatori Fabra, prop de Barcelona, es va assolir una temperatura rècord de 38,4°C, d'acord amb els nostres resultats.

Respecte a les T_n a Barcelona s'observa un episodi intens al juny amb ratxes de nits càlides i nits extremadament càlides amb T_n per sobre del P98è i a la primera quinzena d'agost un nou episodi amb una ratxa llarga i intensa. A la resta de localitats la primera ratxa de nits càlides s'inicia també en la segona quinzena del mes de juny amb nits molt càlides fins a finals de mes, però a diferència de Barcelona el segon episodi intens i persistent es dóna a finals del mes de juliol. Si bé a Màlaga les ratxes són més curtes i hi ha una gran variabilitat diària de les T_n.

L'evolució temporal de les T_x diàries d'aquest estiu comparades amb el valor diari mitjà del període ens indica que les T_x de l'estiu de 2003 tenen un caràcter excepcional dintre de la sèrie estudiada. A València les màximes estan molt per sobre de la mitjana diària del període, seguit de Barcelona i Alacant. No obstant això, a mesura que baixem cap al sud les temperatures s'acosten més a la mitjana, i a Múrcia i sobretot a Màlaga s'aproximen més que la resta, on fins i tot hi ha dies amb la T_x i T_n inferiors al valor mitjà del període.

La diferència entre l'evolució temporal de les T_n de l'estiu del 2003 i la mitjana 1900-2007 indica que aquestes són considerablement més altes a tota la costa que les T_n mitjanes, particularment elevades en comparació a les T_x del 2003 a Alacant i Múrcia, si bé a Màlaga la diferència és menor.

3.2 Context temporal de l'onada de calor de 2003

Pel conjunt de la costa mediterrània de la PI s'han calculat les sèries d'anomalies estivals de T_x i T_n indicatives del senyal climàtic global. I per tal d'analitzar les diferències locals s'han calculat les sèries d'anomalies de cada localitat.

La Figura 3 mostra l'evolució temporal (1900-2007) de les anomalies estivals regionals de les T_x i T_n calculades respecte del període de referència 1961-1990. Tant la T_x com la T_n de l'estiu de 2003 excedeixen al voltant de 3,5°C la normal climàtica, indicant que l'estiu de 2003 va ser excepcional en no tenir precedents en tot el període analitzat.

En les últimes dècades (des de 1980 en endavant) les anomalies de T_x i T_n han oscil·lat pràcticament sempre per sobre de la normal climàtica en tots els punts considerats. L'estiu de 2003 registra les anomalies més altes en les dues variables en totes les localitats, a excepció de Múrcia. Les anomalies estivals mitjanes de T_x i T_n per a cada observatori individual es proporcionen a la Figura 4 ordenades de nord a sud.

Les anomalies de T_x van ser de 5,5°C a Barcelona, 4,2°C a València, 2,6°C a Alacant i a Múrcia i de 2,8°C a Màlaga, sent en tots els casos les més altes de tot el període. Les mitjanes estivals de les T_n també van ser destacables, de 4,4°C per sobre de la normal a Barcelona, 3,2°C a València, 3,4°C a Alacant, 3,6°C a Múrcia i 2,3°C per sobre a Màlaga. Les mínimes a Múrcia també van ser notables, no obstant, no van ser les més altes, ja que els anys 2006 i 2007 van sobrepassar en 4,0°C i 4,5°C la normal climàtica, respectivament.

Per tal de valorar el caràcter excepcional de l'onada de calor sobre la façana mediterrània espanyola en el seu conjunt, s'ha portat a terme una anàlisi de la distribució estadística mensual i estacional de les T_m diàries de les corresponents sèries regionals.

La Figura 5 mostra la funció de densitat de probabilitat gaussiana ajustada a les dades de les T_m dels mesos de juny, juliol i agost i de l'estiu (JJA) pel conjunt mitjanat de la vessant mediterrània de la PI junt amb els valors de les mitjanes mensuals i estacionals de les T_m per al període 1900-2007, classificades de més grans a més petites, permetent així situar en el seu context instrumental l'estiu del 2003.

D'acord amb els resultats obtinguts per Schär et al. (2004) a Suïssa, on l'estiu de 2003 és el més càlid tant en els mesos de juny i agost com pel conjunt de l'estiu per a la mitjana de la regió suïssa, per a la costa mediterrània l'estiu 2003 també està molt lluny de la mitjana en la distribució de temperatures, situant-se a la cua superior de la distribució en els tres casos i a més també al juliol, igualant la temperatura del mes de juliol de 2006. La temperatura del mes de juny de 2003 presenta una desviació de 4,1°C respecte la mitjana de 1900-2007, el mes de juliol de 2,8°C, l'agost de 3,0°C i per l'estiu la desviació és de 3,3°C.

A la Taula 2 es recull la desviació estàndard (σ), l'anomalia respecte de la mitjana 1900-2007 i l'anomalia estandarditzada dels mesos d'estiu i del conjunt de l'estiu (JJA)

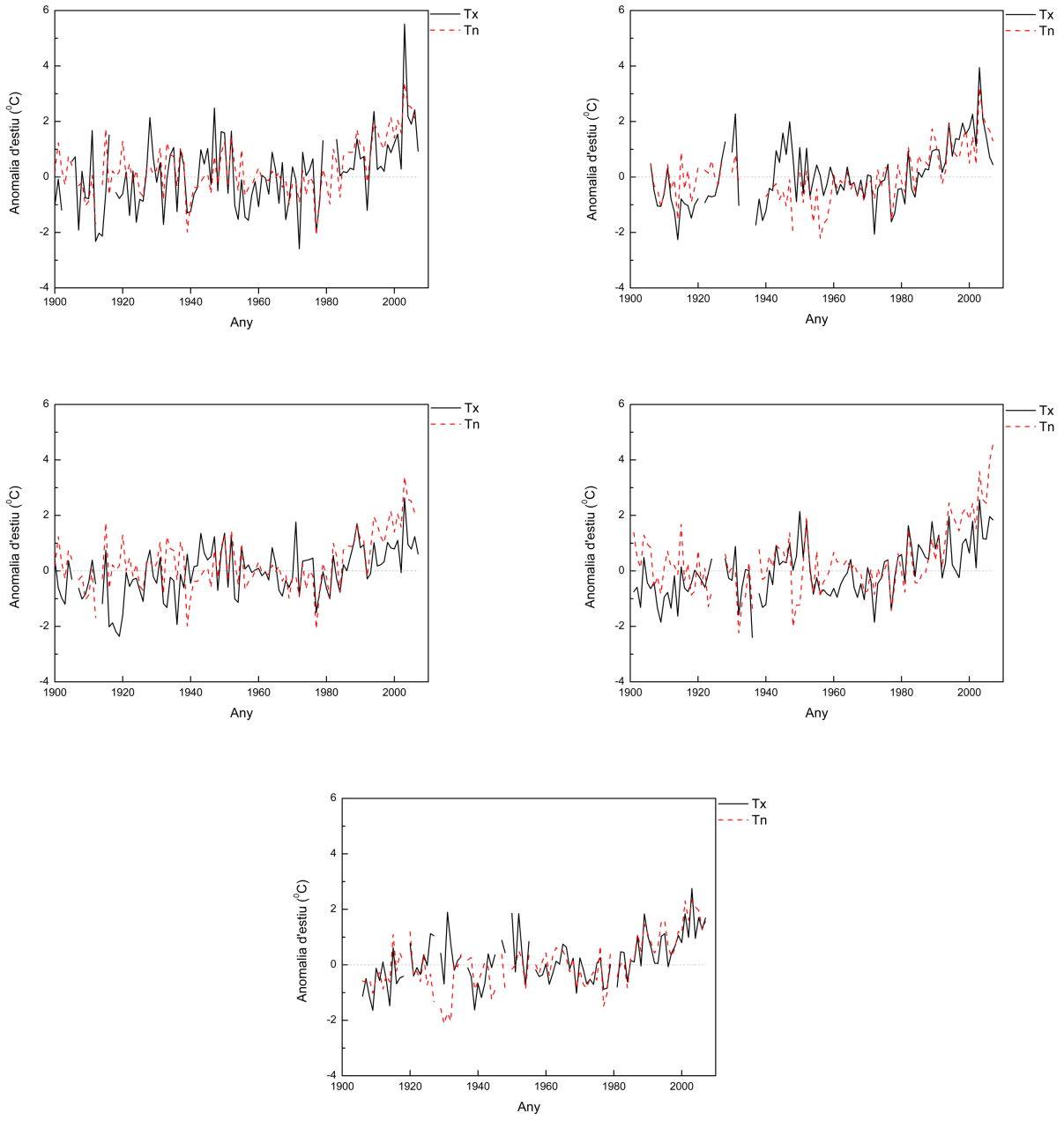

Figura 4. Anomalia de la T_x i T_n de l'estiu respecte de la mitjana 1961-90 a Barcelona (esquerra a dalt), València (dreta a dalt), Alacant (esquerra enmig), Múrcia (dreta enmig), Màlaga (a baix).

de 2003 de la sèrie regional. Dels tres mesos estudiats, el mes de juny de 2003 ha estat el més calorós situant-se a 3,7σ de la mitjana i el juliol ha estat el més modest si bé es situa també, juntament al 2006, a la cua superior de la distribució amb 2,9σ. I a la Taula 3 figura l'anomalia estandarditzada de la T_m, la T_x i la T_n de l'estiu de cada localitat.

Tret de les T_m i T_n a Múrcia, l'estiu de 2003 ha estat el més càlid del període 1900-2007, amb mitjanes estivals de les temperatures diàries rècord de la sèrie 1900-2007.

A les cinc localitats les temperatures de l'estiu de 2003 es situen a l'extrem superior de llurs respectives distribucions, particularment a Barcelona per a les tres variables, indicatiu d'un major impacte de l'onada de calor a la costa nord.

Per quantificar l'excepcionalitat o no de l'estiu del 2003 a la costa mediterrània espanyola s'han estimat les diferències, amb l'aplicació del t-test, entre els valors mitjans de les sèries regionals de T_m, T_x i T_n del conjunt de

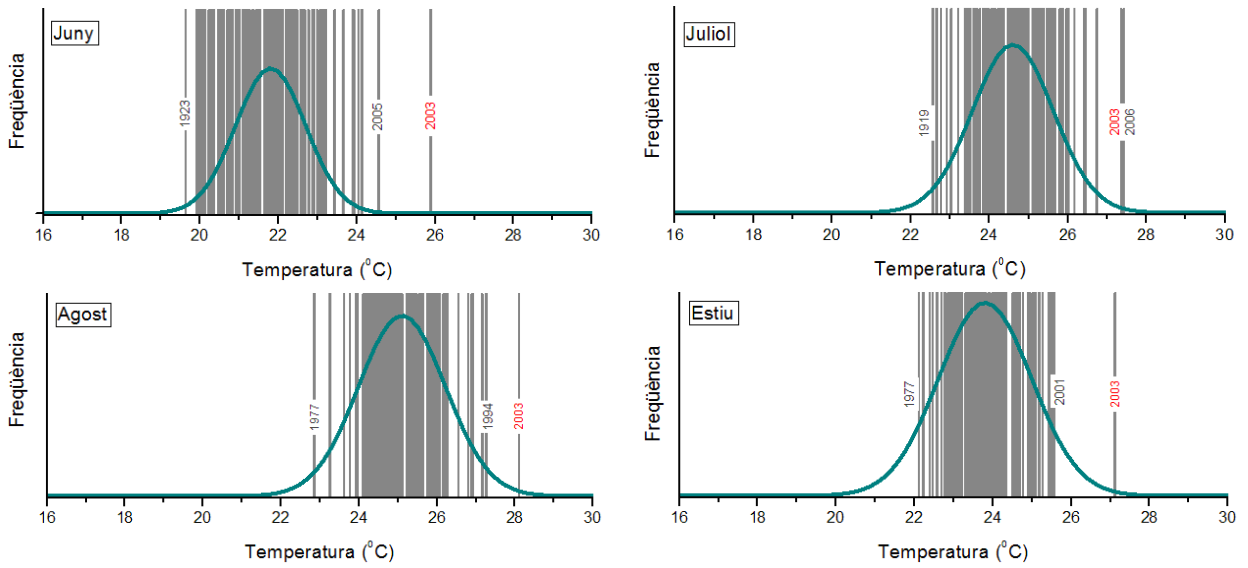

Figura 5. Distribució mensual i estacional de la T_m diària a la costa mediterrània de la Península Ibèrica en el període 1900-2007. En verd es mostra la funció gaussiana ajustada a les dades. Etiquetats amb l'any corresponent es destaquen els dos valors més alts (part dreta de la gaussiana) i el més baix (part esquerra), figurant en vermell l'any 2003.

Taula 2. Desviació estàndard, anomalia de la T_m de 2003 respecte a la mitjana 1900-2007 i anomalia estandarditzada pels mesos juny, juliol i agost i l'estiu de 2003 a la costa mediterrània de la T_m.

	σ (°C)	T'_m (°C)	$\frac{T'_m}{\sigma}$
Juny	1,12	4,1	3,7
Juliol	0,97	2,8	2,9
Agost	0,90	3,0	3,3
JJA	0,84	3,3	3,9

l'estiu i dels mesos de juny, juliol i agost de 2003 amb els estius i mesos amb valors mitjans més elevats que es situen al primer lloc de la classificació després de l'estiu objecte d'estudi. Els resultats indiquen que per a les tres variables, l'estiu, juny i agost del 2003 són significativament més elevades amb un nivell de significació de 0,05. No passa el mateix amb el juliol on la diferència entre els dos mesos comparats no assoleix el nivell de significació adoptat per cap de les variables.

3.3 Anàlisi de l'evolució dels extrems càlids a partir d'indicadors climàtics extrems

Amb l'objectiu de valorar si el calorós estiu del 2003 va ser també excepcional en l'ocurrència d'esdeveniments tèrmics extrems, s'han estimat per cada estiu del període 1900-2007 el nombre de dies amb T_x i T_n superior al percentil 90è (dies i nits càlides) i la duració de les ratxes de calor per a cadascun dels observatoris examinats. Per a identificar les ratxes càlides s'ha adoptat, com s'ha indicat a l'apart de mètodes, l'indicador WSDI del ETCCDI, definit com 6 o més dies consecutius amb la T_x i T_n per sobre del percentil 90è, adaptant-lo a les T_n (nits càlides) i calculant-lo exclusivament per a l'estiu. El fet de considerar llindars relatius, com el del percentil 90è, en comptes de llindars absoluts per a tots els observatoris, permet obviar les possibles diferències climàtiques locals existents entre les cinc estacions.

A les Figures 6a, 6c i 6e s'ha representat en la mateixa gràfica el nombre de dies d'estiu per any en què la T_x excedeix el percentil 90è (dies càlids) i l'índex WSDI per a 3 dels 5 punts estudiats (Barcelona, València i Màlaga). I a les Figures 6b, 6d i 6f, es proporciona la mateixa informació però per a les T_n.

L'anàlisi de l'ocurrència estival de dies càlids i ratxes càlides al llarg del període examinat ens confirma el fet que l'impacte de l'onada de calor del 2003 es degrada latitudinalment, essent més important a les localitzacions més septentrionals de la façana mediterrània peninsular.

A Barcelona, estius amb una alta freqüència de dies càlids i onades de calor diürnes són comuns al llarg del període, si bé en l'última dècada hi ha hagut més onades seguides (veure Figura 6a). L'onada de l'estiu de 2003 va ser rècord tant en el nombre de dies amb T_x que excedeixen el percentil 90è (duplicant el nombre de dies respecte del segon estiu, el 2006, en la classificació ascendent), així com en la persistència de les ratxes càlides (triplicant el següent estiu amb més ratxes observat al 1928). Aquest fet, també es confirma si es considera la freqüència de nits càlides i de ratxes de nits càlides tant en l'última dècada, on s'acumulen un abundant nombre d'aquests esdeveniments, com particularment durant l'estiu del 2003, quan s'enregistraren entorn a 60 nits càlides i 51 nits càlides amb ratxes d'almenys 6

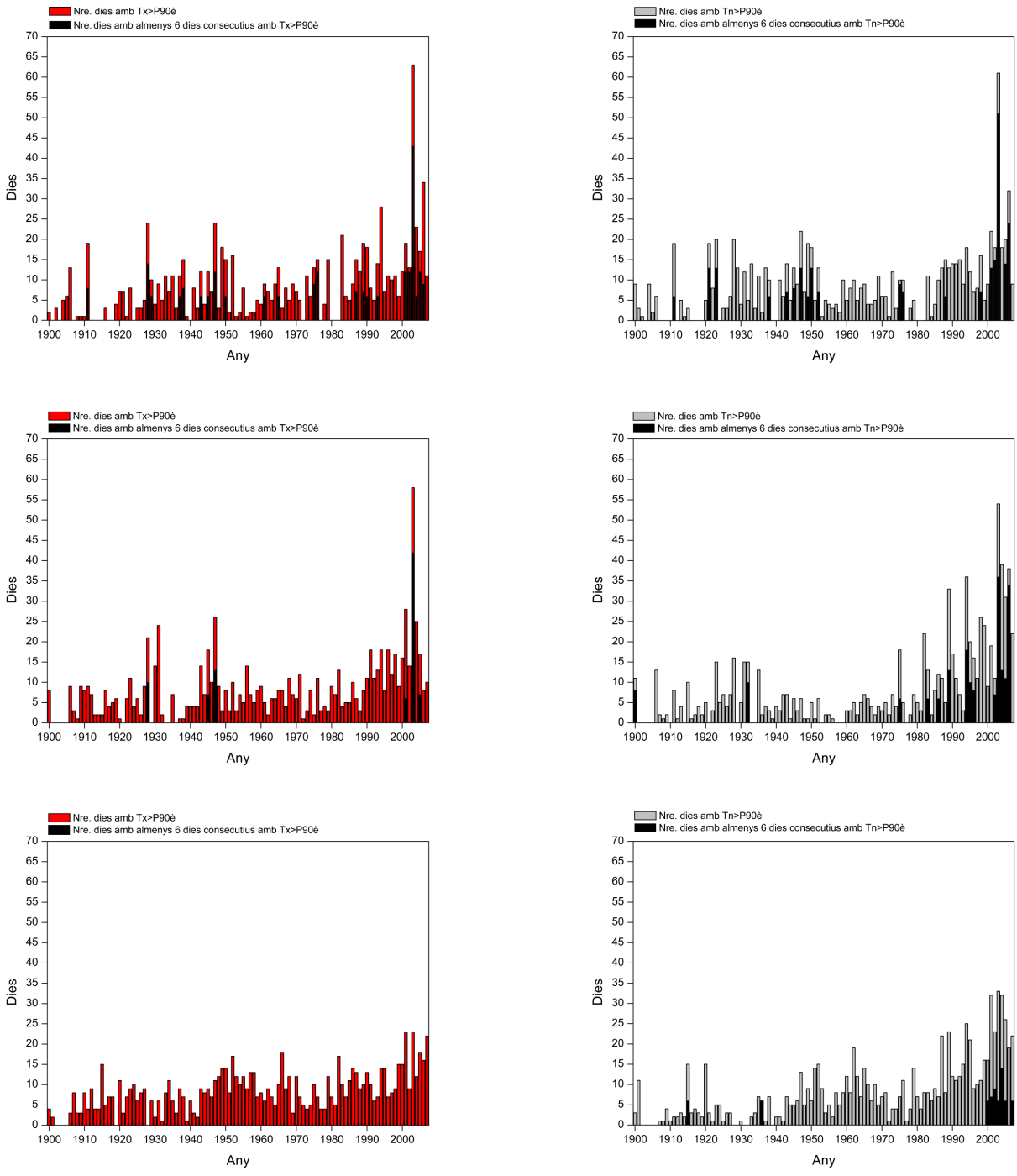

Figura 6. Nombre de dies (a, esquerra a dalt, c, esquerra enmig, e, esquerra a baix) i nits (b, dreta a dalt, d, dreta enmig, i f, dreta a baix) càlides i duració de ratxes de dies (a, c, e) i nits (b, d, f) càlides a Barcelona (a, b), València (c, d) i Màlaga (d, f).

Taula 3. Desviació estàndard d'estiu (JJA) i anomalia estandarditzada de l'estiu 2003 respecte del període 1900-2007 per a T_m, T_x i T_n a les 5 estacions analitzades i al conjunt de la costa.

	σ JJA T_m (°C)	$\frac{T'_m}{\sigma}$	σ JJA T_x (°C)	$\frac{T'_x}{\sigma}$	σ JJA T_n (°C)	$\frac{T'_n}{\sigma}$
Barcelona	1,06	4,4	1,26	4,3	0,98	4,1
València	0,92	3,2	1,15	3,4	0,94	3,4
Alacant	0,82	3,5	0,90	3,0	0,97	3,2
Múrcia	0,95	3,0	0,95	2,7	1,17	2,7
Màlaga	0,79	3,1	0,85	3,1	0,91	2,5
Regional	0,84	3,9	0,89	3,8	0,87	3,7

Taula 4. Normal climàtica (mitjana 1961-1990) del nombre de dies a l'estiu amb $T_x >$ P90è, nombre de dies càlids i duració parcial i total de ratxes de dies càlids a l'estiu del 2003 a les cinc localitzacions analitzades.

Estacions	Nre. de dies $T_x >$ P90è (mitjana 61-90)	Nre. de dies $T_x >$ P90è JJA 2003	Nre. de dies parcial i total de ratxes de dies càlids JJA 2003	
Barcelona	8	65	9, 9, 15, 10	43
València	6	58	6, 12, 15, 9	42
Alacant	8	34	7, 11	18
Múrcia	9	25	0	0
Màlaga	9	23	0	0

nits consecutives amb T_n que excedeixen el percentil 90è (Figura 6b).

Més al sud, a València s'observa una situació similar (Figures 6c i 6d), l'estiu del 2003 sobresurt de la resta d'estius del període 1900-2007. En aquest estiu tant els dies i les nits càlides com les ratxes de dies i nits càlids presenten una ocurrència sense precedents, sent destacable el nombre de ratxes de nits càlides en la darrera dècada.

A Alacant es redueixen tant el nombre de dies càlids com de ratxes càlides en comparació a les dues localitats anteriors i encara que el 2003 registra la més alta freqüència en els dos indicadors d'extrems, s'observen d'altres anys que assoleixen ocurrències similars, particularment a la dècada de 1940. En canvi, tant el nombre de nits càlides com de ratxes de nits càlides sobrepassa el de dies i ratxes càlides. És remarcable el nombre de nits càlides, i especialment de ratxes càlides des del 2000 en endavant, sent l'ocurrència de ratxes de nits càlides al 2003 de 31 dies de duració total. Aquest escalfament diari diferencial, amb major freqüència dels extrems nocturns que els diürns, es convertirà en el fet més destacable de l'evolució d'aquests extrems tèrmics a la resta de localitzacions meridionals.

En l'evolució dels dies càlids a Múrcia s'observa una freqüència menor en comparació amb els tres punts anteriors i tot i que el 2003 assoleix la més alta freqüència, la diferència amb els següents anys de la classificació ascendent és petita. A més a més, les onades de calor són fenòmens aïllats, tan sols s'observen en cinc anys del període, sent l'última a l'estiu de 2001. En canvi, la freqüència de nits càlides i ratxes de nits càlides s'incrementa des de l'inici de la dècada dels 90 i particularment de l'any 2000, sense cap precedent anterior. Malgrat que l'estiu del 2003 registra 55 (33) nits càlides (ratxes de nits càlides), no excedeix les freqüències enregistrades al 2006 i 2007, sent aquest últim el que presenta els rècords de tot el període.

Finalment, a Màlaga s'observa una situació similar a la de Múrcia. La Figura 6e mostra que encara que hi ha hagut dies molt càlids al llarg del període, especialment en els darrers deu anys, no s'ha enregistrat cap ratxa de dies càlids. No obstant això, l'estiu del 2003 juntament amb el de 2001 assoleixen les més altes ocurrències de dies càlids. Respecte a les nits càlides s'observen les més altes freqüències a la dècada del 2000, encara que també s'enregistren en anys aïllats de les dècades dels 80 i 90, sent el 2003 el que assoleix la més alta freqüència amb poca diferència amb els anys 2001 i 2004. Les ratxes de nits càlides, malgrat que n'hi ha hagut alguna d'esporàdica durant tot el període (1900-2007), han estat més habituals a partir de l'any 2000, amb ratxes de nits càlides quasi cada estiu (Figura 6f). Tot i així, l'estiu de 2003 no va excedir l'ocurrència del 2005, situant-se en segon lloc del registre instrumental d'aquesta estació.

A la Taula 4 es proporciona la normal climàtica (mitjana 1961-1990) del nombre de dies a l'estiu amb $T_x >$ P90è, el nombre de dies càlids i duració parcial i total de ratxes de dies càlids a l'estiu del 2003. I a la Taula 5 es proporciona la mateixa informació per a les nits i ratxes de nits càlides, per tal de quantificar les excedències de l'estiu del 2003 en el nombre de dies (nits) càlids i de ratxes de dies (nits) càlids respecte a la normal climàtica.

Taula 5. Normal climàtica (mitjana 1961-1990) del nombre de dies a l'estiu amb $T_n >$ P90è, nombre de nits càlides i duració parcial i total de ratxes de nits càlides a l'estiu del 2003 a les cinc localitzacions analitzades.

Estacions	Nre. de dies $T_x >$ P90è (mitjana 61-90)	Nre. de dies $T_x >$ P90è JJA 2003	Nre. de dies parcial i total de ratxes de dies càlids JJA 2003	
Barcelona	7	61	10, 11, 6, 15, 9	51
València	7	54	18,18	36
Alacant	6	47	7, 8, 16	31
Múrcia	4	54	18, 15	33
Màlaga	9	33	6	6

La normal climàtica dels dies càlids ($T_x >$ P90è) calculada per al període de referència estàndard (1961-1990) indica que aquests esdeveniments a l'estiu es donen quasi el mateix nombre de dies a tots els observatoris, amb una lleugera major freqüència a les localitzacions més meridionals. Comparant l'ocurrència de dies càlids observats a l'estiu de 2003 amb llur normal climàtica es fa patent l'alta ocurrència de dies càlids a tots els observatoris durant l'onada de calor del 2003, molt més intensa als observatoris septentrionals que als del sud, fet que evidencia la gradació latitudinal de l'impacte d'aquest esdeveniment extrem. Respecte a les nits càlides ($T_n >$ P90è) la normal climàtica és de l'ordre d'una setmana a tota la costa amb un nombre lleugerament inferior a Múrcia i superior a Màlaga. Si comparem amb l'estiu de 2003 igual que els dies càlids, les nits càlides van ser molt superiors a la mitjana climàtica amb un nombre més elevat d'ocurrència a l'extrem nord i menys a l'extrem sud.

Per tant, l'onada de calor ha estat especialment acusada a Barcelona i menys a Màlaga i Múrcia. Els resultats d'aquest estudi estan d'acord amb els obtinguts per Díaz et al. (2006) en el seu estudi sobre l'impacte de l'onada de calor del 2003 a Espanya, encara que en aquest estudi tan sols es van analitzar sèries amb una longitud de 13 anys.

L'anàlisi de les ratxes de dies càlids indica també aquesta gradació cap al sud dels efectes de l'onada de calor del 2003 (Taula 4), al cop que assenyala la primera quinzena del mes d'agost com un període excepcional per la intensitat i duració de les mateixes especialment al nord de la costa. L'originalitat de l'onada es troba en la persistència de dies consecutius amb temperatures elevades, troballa que està en concordança amb els resultats obtinguts per Pejenaute (2004) per a Navarra. S'obté que al nord de la costa la persistència és rècord de la sèrie, resultat que contrasta amb l'obtingut per Beniston i Díaz (2004), ja que obtenen que l'onada de calor de 2003 a Suïssa és idèntica a la del 1911 i és menys persistent que les onades del 1947 i 1976.

4 Conclusions

L'episodi de calor viscut l'estiu de 2003 va afectar la façana mediterrània de la PI i va ser inusual a tota la costa tot i que al nord va tenir un impacte major. Hi va haver onades de calor llargues i intenses a Barcelona, València i Alacant principalment en el mes de juny i agost. Al sud les temperatures van ser elevades, si bé la seva persistència va ser menor, alternant dies molt calorosos amb d'altres de no tant i no hi va haver ratxes de dies càlids ni a Múrcia ni a Màlaga.

S'ha de dir que aquest episodi no tan sols es va caracteritzar per T_x elevades sinó que les T_n van ser també molt altes i persistents a tots els observatoris, inclosos els del sud amb ratxes de nits càlides llargues, fet que va provocar que l'episodi fos extremadament calorós i un clar impacte sobre la mortalitat a Espanya.

En totes les sèries l'anomalia de la mitjana estival de T_x i T_n va batre rècords, a més la mitjana estival 2003 i mensual, juny, juliol i agost de totes les variables diàries de la temperatura (T_x, T_n i T_m) es troben a la cua superior de la distribució estadística de freqüències respectiva, tret que caracteritza l'esdeveniment extrem i sense precedents respecte de les mitjanes mensuals i estacionals de tots els estius del període 1900-2007.

L'estiu analitzat va ser el més càlid de tota la sèrie a tots els observatoris i les onades de calor a Barcelona, València i Alacant van ser les més persistents des de 1900, sobretot a Barcelona, on van ser a més de persistents molt intenses.

Tot i que les mitjanes d'estiu de T_x i T_n van ser rècord a quasi tots els observatoris, pel que fa als valors diaris només van ser molt destacats a Barcelona el dia 13 d'agost de 2003 amb una T_x de 38,4°C igualant l'anterior rècord del 15 d'agost de 1987; valor en concordança amb l'estudiat per Serra et al. (2010), i els dies 12, 13 i 14 d'agost de 2003 amb T_n de 27,3°C, 27,7°C i 27,8°C respectivament, superant el rècord els tres dies seguits.

L'episodi es va caracteritzar per la persistència del calor, sobretot a la meitat nord, ja que encara que no va trencar rècords diaris sí que va superar i trencar els rècords de les mitjanes mensuals i estacionals. Aquest fet fa que l'estiu del 2003 fos excepcional i sense precedents anteriors al registre instrumental. Les dues temperatures diàries extremes (T_x i T_n) van reflectir àmpliament l'onada de calor, però som conscients que l'anàlisi aïllada i separativa de les sèries temporals d'aquestes temperatures diàries extremes trenca la realitat física solidària de les onades de calor en fer perdre la seqüència temporal contínua amb què es produeixen . A la

definició i anàlisi conjunt d'aquests esdeveniments extrems i a la detecció i atribució de causes dels mateixos dedicarem els nostres futurs estudis.

Agraïments. Els autors agraeixen a l'AEMET la provisió de les dades originals i la seva actualització, alhora que agraeixen al *Centre for Climate Change* (C3) l'ús de les dades ajustades a l'escala diària. Mercè Castellà agraeix el suport financer per la realització de la seva tesi de doctorat, en què aquest article s'inscriu, mitjançant la concessió d'una beca BRDI. Aquest treball ha rebut el suport del projecte espanyol finançat pel *Ministerio de Educación y Ciencia* CAFIDEXPI (CGL2007-65546-C03-02-CLI) i del projecte europeu EURO4M (EC/FP7 número de referència: 24209).

Referències

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Ambenje, P., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., i Griffiths, G., 2006: *Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*, J Geophys Res, **111**, D05 109, doi: 10.1029/2005JD006 290.

Beniston, M., 2004: *The 2003 heat wave in Europe: a shape of things to come? An analysis based on Swiss climatological data and model simulations*, Geophys Res Lett, **31**, 2202–2202.

Beniston, M. i Díaz, H., 2004: *The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland*, Global Planet Change, **44**, 73–81.

Brunet, M., Saladié, O., Jones, P., Sigró, J., Aguilar, E., Moberg, A., Lister, D., Walther, A., i Almarza, C., 2006: *The development of new dataset of Spanish Daily Adjusted Temperature series (SDATS) (1850-2003)*, Int J Climatol, **26**, 1777–1802.

Brunet, M., Jones, P. D., Sigró, J., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Della-Marta, P., Lister, D., Walther, A., i López, D., 2007a: *Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during 1850-2005*, J Geophys Res, **112**, D12 117, doi: 10.1029/2006JD008 249.

Brunet, M., Sigró, J., Jones, P., Saladié, O., Aguilar, E., Moberg, A., Lister, D., i Walther, A., 2007b: *Long-term changes in extreme temperatures and precipitation in Spain*, Contributions to Science, **3**, 333–344.

Brunet, M., Saladié, O., Jones, P., Sigró, J., Aguilar, E., Moberg, A., Lister, D., Walther, A., i Almarza, C., 2008: A case-study/guidance on the development of long-term daily adjusted temperature datasets, World Meteorological Organization, WMO-TD- 1425/ WCDMP-66, Geneva, 43 pp.

Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., i Wanner, H., 2007a: *Doubled length of Western European summer heat waves since 1880*, J Geophys Res-Atmospheres, **112**, doi: 10.1029/2007JD008 510.

Della-Marta, P. M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M., i Wanner, H., 2007b: *Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large scale forcings and predictability*, Clim Dyn, **29**, 251–275, doi: 10.1007/s00 382–007–0233–1.

Díaz, J., García-Herrera, R., Trigo, R., Linares, C., Valente, M. A., De Miguel, J. M., i Hernández, E., 2006: *The impact of summer 2003 heat wave in Iberia: how should we measure it?*, Int J Biometeorol, **50**, 159–66.

Fischer, E. M. i Schär, C., 2010: *Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves*, Nature Geoscience, **3**, 398–403.

Jones, P. D. i Hulme, M., 1996: *Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations*, Int J Climatol, **16**, 361–377.

Martínez, F., Simón-Soria, F., i López-Abente, G., 2004: *Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad*, Gac Sanit, **18**, 250–258.

Meehl, G. A. i Tebaldi, C., 2004: *More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century*, Science, **305**, 994–997.

Pejenaute, J. M., 2004: La ola de calor de agosto de 2003 en Navarra, El clima, entre el mar y la montaña, IV Congreso de la Asociación Española de Climatología, coord. por C. Diego, J. C. García, D. F. Rasilla, P. Fernández de Arróyabe, C. Garmendia, Santander, 2-5/XI/2004, ISBN 84-8102-384-1, 105-114.

Schär, C., Vidale, P., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M., i Appenzeller, C., 2004: *The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves*, Nature, **427**, 332–336.

Serra, C., Burgueño, A., i Lana, X., 2010: *Extreme normalised residuals of daily temperatures in Catalonia (NE Spain): sampling strategies, return periods and clustering process*, Theor Appl Climatol, **101**, 1–17.

Trenberth, K., Jones, P., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J., Rusticucci, M., Soden, B., i Zhai, P., 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel 5 on Climate Change, edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L.