

# TRABAJO FIN DE GRADO

## Proyecciones futuras de la temperatura máxima en las principales ciudades de la Península Ibérica



Joel Cid Fernández  
Grado en Ciencias Ambientales  
*Febrero 2020*

*Departamento de Física Aplicada*

FacultadeCiencias

UniversidadeVigo



Imagen de portada obtenida de: <https://www.lasexta.com/tecnologia-tecnoplora/ciencia/>



Facultad de Ciencias

Universidad de Vigo

# **Proyecciones futuras de la temperatura máxima en las principales ciudades de la Península Ibérica.**

**Trabajo de fin de grado**

**Grado en Ciencias Ambientales**



Environmental | Physics | Laboratory

**EPhysLab**

**Joel Cid Fernández**

**Grado en Ciencias Ambientales**

**Febrero 2020**



**Dra. María Teresa de Castro Rodríguez**, profesora titular del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo y **Dr. Jorge Costoya Noguero** investigador del área de Física de la Tierra, del departamento de Física Aplicada, de la Universidad de Vigo.

INFORMAN:

Que el trabajo titulado “**Proyecciones futuras de la temperatura máxima en las principales ciudades de la Península Ibérica**” presentado por **D. Joel Cid Fernández**, con **D.N.I.: 45142846-X**, fue realizado bajo nuestra dirección y autorizamos su presentación como **Trabajo de Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para su defensa.

Ourense, 30 de enero de 2020.

Dra. María Teresa de Castro Rodríguez

Dr. Jorge Costoya Noguero





# RESUMEN

En un contexto de cambio climático, las variaciones en los extremos climáticos pueden traer consigo importantes daños para la población de las zonas afectadas. Así, por ejemplo, eventos extremos de temperatura como las olas de calor tienen una incidencia en el incremento de la mortalidad. El objetivo de este estudio es analizar cómo evolucionarán a lo largo del S.XXI las temperaturas máximas en todas las ciudades de la Península Ibérica, Baleares, Ceuta y Melilla. Con este propósito, se emplearon datos de 9 modelos regionales del proyecto CORDEX, que cuenta con proyecciones futuras a escala diaria con una resolución espacial de  $0.11^\circ \times 0.11^\circ$ . Se seleccionaron dos escenarios futuros, el RCP4.5 y el RCP8.5, para analizar cómo evolucionarán las temperaturas máximas medias, los eventos extremos de temperatura y las olas de calor durante la estación cálida (junio-septiembre) para dos periodos futuros: cercano (2020-2049) y lejano (2070-2099).

En primer lugar, se hizo un análisis de la fiabilidad de estas simulaciones comparando los datos de temperatura máxima media de los modelos con los de 10 estaciones meteorológicas dependientes de AEMET (comparación de medias y test de solapamiento). Se observó que las simulaciones de los 9 RCMs alcanzaron un grado de fiabilidad aceptable. Posteriormente se analizó la variación de la temperatura máxima, el porcentaje de días de eventos extremos y de olas de calor. Con respecto a la variación de la temperatura máxima media, tomando como referencia el periodo histórico, se proyecta un incremento, del orden de  $5^\circ\text{C}$  a  $6^\circ\text{C}$ , en el sur e interior peninsular para finales del siglo XXI bajo el escenario RCP8.5, y del orden de  $3^\circ\text{C}$  bajo el RCP4.5. En relación al porcentaje de días con eventos extremos bajo el escenario RCP8.5 se espera que haya un incremento entre el 10 y el 15% en zonas del sur e interior peninsular para el futuro cercano. Para finales de siglo habrá lugares situados en zonas del Mediterráneo, sur e interior peninsular donde se espera un incremento mayor del 45% de días con eventos extremos. Las zonas del norte y oeste peninsular no superarán el 25% de incremento de días bajo condiciones extremas para finales de siglo. Por último, en cuanto al porcentaje de días bajo ola de calor bajo el RCP8.5 se espera un aumento considerable sobre todo en el futuro lejano en el que muchas ciudades del sur e interior peninsular superarán el 40% de días bajo ola de calor e incluso zonas bañadas por el Mediterráneo superarán el 55%. Sin embargo, en zonas bañadas por el Atlántico y en ciudades del norte peninsular el incremento será mucho menor sin llegar a superar el 25% de días bajo ola de calor.

En definitiva, podemos afirmar que a lo largo del S.XXI se vivirá en la Península Ibérica un aumento de las temperaturas máximas y de la frecuencia de eventos extremos y olas de calor. Este aumento no será igual en todas las ciudades, ya que habrá diferencias entre las del norte o las del sur peninsular, por lo que cada ciudad tendrá que tomar sus propias medidas para la adaptación y mitigación ante estos eventos.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1    Cambio climático.....	1
1.2    Eventos extremos y olas de calor.....	5
1.3    Área de estudio.....	8
1.4    Objetivos.....	9
<b>2. DATOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
2.1    Base de datos.....	11
2.1.1    Datos de CORDEX.....	11
2.1.2    Datos de AEMET.....	14
2.2    Métodos.....	14
2.2.1    Multimodelo.....	14
2.2.2    Eventos extremos y olas de calor.....	15
2.2.3    Análisis de fiabilidad de los RCMs.....	15
2.2.3.1    Comparación de valores medios.....	16
2.2.3.2    Test de Perkins.....	16
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>19</b>
3.1    Validación de datos.....	19
3.1.1    Temperatura máxima media.....	19
3.1.2    Test de Perkins.....	20
3.2    Análisis de variaciones futuras de la temperatura máxima, eventos extremos y olas de calor.....	21
3.2.1    Variaciones futuras de las temperaturas máximas.....	21
3.2.2    Porcentaje de días bajo condiciones extremas en el futuro.....	24
3.2.3    Porcentaje de días bajo ola de calor para el futuro.....	27
<b>4. DISCUSIÓN.....</b>	<b>31</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>35</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>37</b>



# 1.INTRODUCCIÓN

## 1.1 Cambio Climático

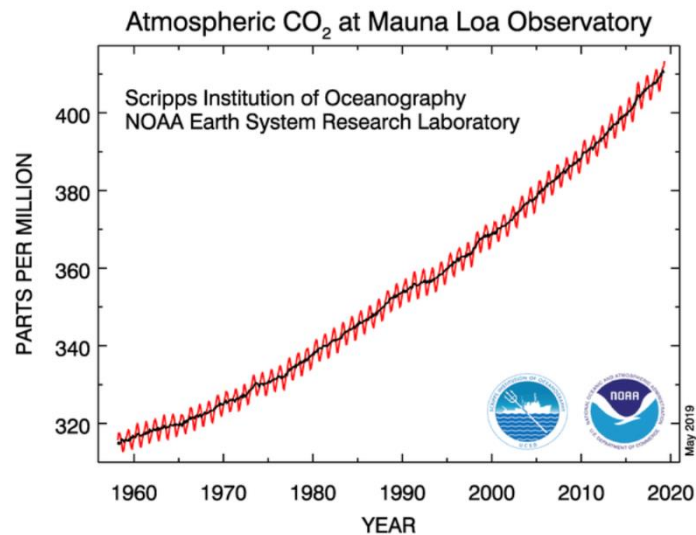
El clima es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en un periodo suficientemente largo y en un dominio espacial determinado. Una de sus principales características es su variabilidad natural, que ha provocado sucesivas variaciones de muy diverso calado a lo largo de los milenios desde la creación del Planeta. En estas variaciones el ser humano no ha tenido ninguna influencia, sin embargo, el desarrollo y crecimiento a partir de la Revolución Industrial, basado principalmente en la quema de combustibles fósiles, está modificando la composición de la atmósfera incrementando la concentración de gases de efecto invernadero, lo que conlleva una serie de consecuencias sobre el clima.

Podemos definir como cambio climático a la variación global del clima que puede ser debido a causas naturales o antropogénicas. En estas circunstancias todos los parámetros climáticos pueden cambiar o agravarse en diversas escalas de tiempo. El cambio climático está teniendo lugar y continuará en las próximas décadas y siglos. Los humanos somos la causa principal (con una probabilidad del 95%) de más de la mitad del aumento observado en la temperatura superficial media global en el periodo (1951-2010) (*IPCC, 2013*). Si no hay una acción urgente y significativa para reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, los impactos del cambio climático serán más graves.

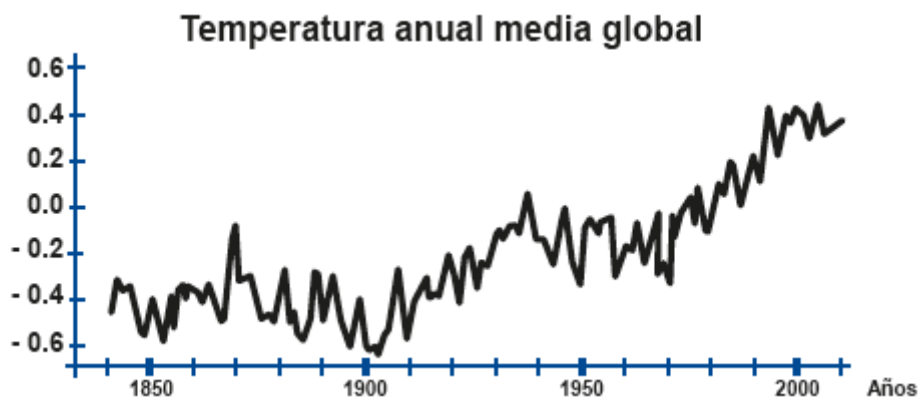
Un aspecto importante es lo que se conoce como “efecto invernadero”, que hace referencia a la retención en la atmósfera por parte de un conjunto de gases, conocidos como gases de efecto invernadero, de la radiación infrarroja emitida por la Tierra. Dichos gases son los responsables de que la Tierra sea un planeta habitable garantizando una temperatura media global aproximada de 15°C. Los principales gases de efecto invernadero son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el óxido nitroso, el metano y los gases fluorados. Según un estudio realizado por la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA), en Estados Unidos las concentraciones de estos gases aumentaron un 30% desde la época pre-industrial. A nivel global, la concentración de CO<sub>2</sub> ha aumentado en la atmósfera, debido a la quema de combustibles fósiles, superando recientemente las 415 ppm (Figura 1.1). Además, también se ha producido un incremento en las últimas décadas tanto del metano como del óxido nitroso y los gases fluorados.

Una atmósfera con mayor concentración de gases de efecto invernadero, hace que aumente la temperatura de la superficie terrestre, como podemos observar en la figura 1.2, que recoge las anomalías anuales de temperatura superficial media global desde mediados del siglo XIX. Se observa un aumento significativo de la temperatura anual

media de la Tierra desde el inicio del siglo XX. Este incremento no ha sido homogéneo en el tiempo, ya que después de un periodo de incremento desde inicios del siglo XX hasta la década de los 40, se vivió un periodo hasta la década de los 70 donde las temperaturas no se incrementaron y en algunas áreas incluso disminuyeron para, posteriormente, ya desde mediados de los años 70, sufrir un incremento mucho más intenso. Es necesario comentar también que, cada una de las últimas tres décadas ha sido más cálida que las anteriores desde 1950 siendo la más cálida de todas, la primera del siglo XXI (IPCC, 2013).



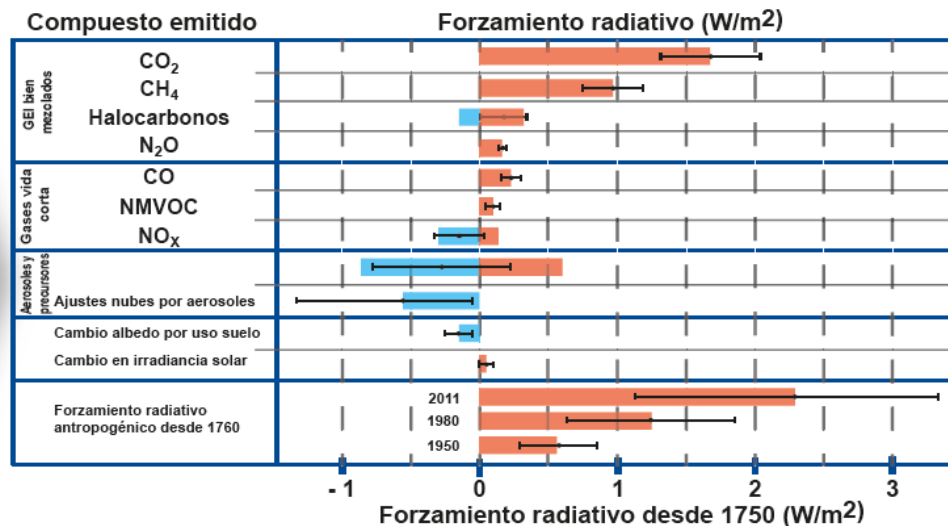
**Figura 1.1.** Concentración de CO<sub>2</sub> en la estación de Mauna Loa (Hawaii, EEUU) desde 1960 hasta 2019 (Fuente: NOAA).



**Figura 1.2.** Evolución de la temperatura anual media global (anomalía) desde mediados del siglo XIX. Fuente (IPCC, 2013).

Para interpretar mejor el cambio climático, se debe analizar la variación de lo que se conoce como forzamiento radiativo (FR), que es el resultado de los desequilibrios en el balance energético de la Tierra como consecuencia de procesos naturales y antropogénicos. El FR cuantifica cambios en los flujos de energía originados por

variaciones en diferentes componentes, conocidos como forzamientos climáticos. Los múltiples agentes que pueden producir variaciones en este FR se recogen en la figura 1.3. En esta figura los valores negativos, correspondientes principalmente a aerosoles y nubes, denotan un enfriamiento y los valores positivos denotan un incremento en el forzamiento radiativo. Como se puede ver en la figura 1.3, el FR antropogénico total es positivo ( $2,29 \text{ W/m}^2$ ) en el año 2011 respecto al valor de 1750, siendo el  $\text{CO}_2$  el que más contribuye a dicho incremento.



**Figura 1.3.** Estimaciones del forzamiento radiativo en 2011 e incertezas con respecto a 1750 ( $\text{W/m}^2$ ). Fuente (IPCC, 2013).

Además de conocer las variaciones que tuvieron lugar en el clima pasado, es de gran importancia conocer como variará el clima en el futuro ya que esto nos permite anticiparnos y poder implementar medidas de atenuación y adaptación a las posibles consecuencias de este. La mejor herramienta con la que contamos para llevar a cabo esta proyección futura del clima son los modelos climáticos. Un modelo climático global (GCM) nos proporciona información de predicción en escalas de más de 100 años con mallas que recorren todo el planeta. Estos modelos climáticos ofrecen la posibilidad de anticipar la forma en la que el sistema climático podrá ser modificado por los humanos durante los siglos que vienen. La proyección climática es la respuesta simulada del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o concentraciones de los aerosoles o gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). Si bien los GCMs pueden simular bien el clima global, tienen limitaciones a la hora de captar detalles del clima a escala regional. Los modelos climáticos regionales (RCMs) se aplican sobre áreas limitadas. Los RCMs pueden proporcionar información sobre regiones con una mayor resolución orográfica permitiendo un mayor detalle del impacto.

En la actualidad, el proyecto *Coordinated Regional Climate Downscaling* (CORDEX) proporciona proyecciones climáticas regionales de alta resolución hasta el año 2100. Este proyecto cuenta con un total de 14 dominios (regiones a lo largo del globo en las

que se aplica la regionalización) con una resolución de 50 km. Con respecto al dominio que abarca Europa (EURO-CORDEX), dependiendo de la variable climática, existen disponibles dos resoluciones espaciales: una estándar (0,44°) (EUR-44, ~50km), y otra de mayor resolución 0,11° (EUR-11, ~12,5km). Para realizar estas simulaciones CORDEX emplea modelos climáticos globales (GCMs) como condiciones de frontera que provienen del proyecto de intercomparación de modelos acoplados en su 5 fase (CMIP5).

Para determinar cuál será el futuro del clima de la Tierra, es necesario conocer la evolución futura de estos forzamientos antropogénicos, lo cual nos obliga a acudir a los denominados escenarios de emisiones definidos por el *Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático* (IPCC) (IPCC, 2013) como una representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias relativamente activas (gases efecto invernadero y aerosoles) basada en un conjunto coherente de supuestos sobre los factores que las impulsan (el desarrollo demográfico y socio-económico, el cambio tecnológico, la energía y el uso del suelo) y las principales relaciones entre ellos.

Los primeros escenarios de emisiones fueron presentados en 1992 y sirvieron para obtener las primeras proyecciones climáticas. En el *Quinto Informe de Evaluación* (AR5) han utilizado cuatros escenarios que consideran las políticas climáticas, denominadas Sendas Representativas de Concentración o Trayectorias de Concentración Representativa (RCP) (IPCC, 2013). Estos RCPs se definen como escenarios que abarcan series temporales de emisiones de los gases efecto invernadero y aerosoles (Moss et al., 2010). Estos RCPs se identifican por el incremento del forzamiento radiativo total aproximado para el año 2100 respecto a la época preindustrial y que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup> como podemos observar en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1** Escenarios RCP. Fuente (IPCC, 2013).

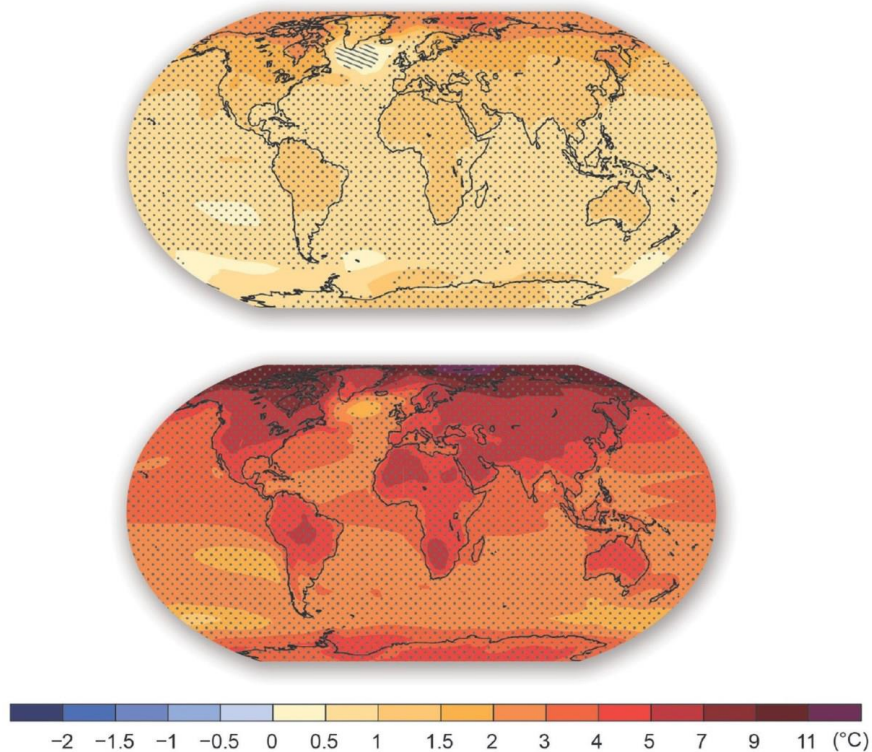
	FR (Wm <sup>-2</sup> )	Tendencia del FR en 2100	[CO <sub>2</sub> ] en 2100 en ppm
<b>RCP 2.6</b>	2,6	Decrece	421
<b>RCP 4.5</b>	4,5	Estable	538
<b>RCP 6.0</b>	6,0	Crece	670
<b>RCP 8.5</b>	8,5	Crece	936

En la tabla 1.1 vemos cuatro escenarios caracterizados por un valor distinto del FR y su tendencia y la concentración de dióxido de carbono que representan en 2100. Los más desfavorables son el RCP6.0 y el RCP8.5, que proyectan una tendencia al crecimiento más allá de 2100, mientras que, en el más favorable, RCP2.6, la emisión de CO<sub>2</sub> tiende a decrecer, y en el RCP4.5 se mantiene estable.

En la figura 1.4 se observa el cambio de la temperatura media global entre los periodos 1986-2005 y 2081-2100 para dos RCPs, el más favorable RCP 2.6 (superior) y el más desfavorable RCP 8.5 (inferior). Para el RCP 2.6 el aumento estaría en el rango de 0,5°C



y 2°C, mientras que bajo el RCP8.5 se superarían los 5°C de incremento de temperatura media. Se observa también que en el Ártico el aumento es mucho mayor que en las demás zonas, y en el continente mayor que en el océano.



**Figura 1.4** Cambio de la temperatura media anual de la Tierra para el escenario RCP2.6 (superior) y el RCP8.5 (inferior) para el período 2081-2100 respecto del período 1986-2005. Fuente (IPCC, 2013).

Según las proyecciones del AR5 del IPCC a lo largo del siglo XXI se producirán cambios en el clima que incluyen:

- Más episodios relacionados con altas temperaturas extremas.
- Olas de calor más frecuentes y de mayor duración.
- En la región mediterránea tendrá lugar un incremento mayor a la media global, sobre todo en el período estival.

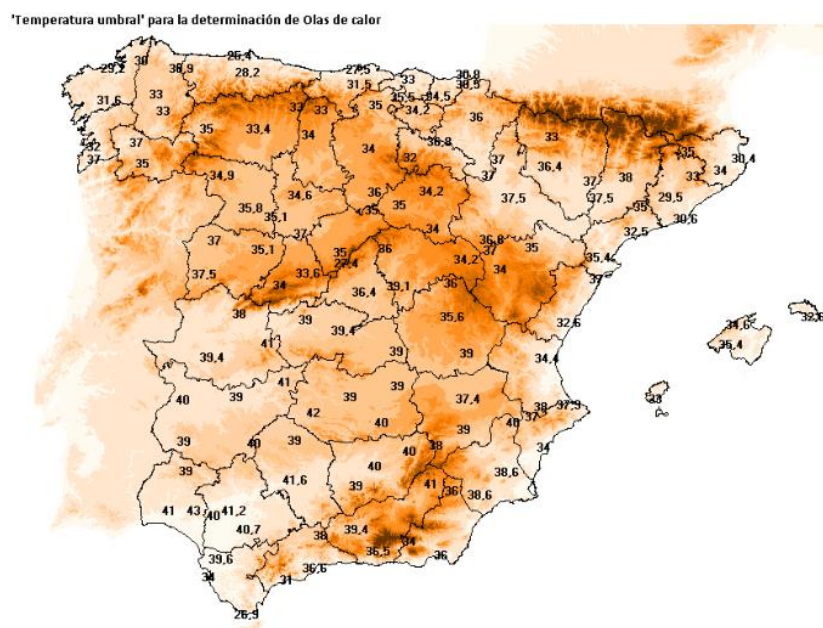
## 1.2 Eventos extremos y olas de calor

En este apartado vamos a conocer lo que se entiende por un “evento climático extremo”, que se define como un suceso meteorológico anómalo, según su distribución estadística

para un lugar determinado. Estos eventos tienen gran importancia ya que pueden afectar a toda la población y causar numerosos daños en la zona donde se producen. Algunos ejemplos de eventos extremos son: olas de calor, de frío, sequías, inundaciones, etc. Un estudio reciente culpa al incremento en el forzamiento radiativo, como consecuencia del aumento de gases de efecto invernadero, como la principal causa del incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos (*Schoof e Robeson, 2016*).

En nuestro estudio, nos centraremos en analizar los eventos extremos relacionados con las temperaturas máximas en la Península Ibérica, es decir, eventos extremos de temperatura máxima y olas de calor. Cabe mencionar que al analizar un evento extremo es de gran importancia establecer el valor umbral a partir del cual consideramos que un determinado fenómeno es extremo. Existe la posibilidad de establecer un valor arbitrario común a toda la zona seleccionada o adecuar el valor umbral a cada una de las localizaciones estableciendo un criterio estadístico. Esta segunda opción es la que sigue la Agencia Española de Meteorología (AEMET), que toma como valor umbral para establecer un evento extremo de temperatura el percentil 95. Es importante tener en cuenta que los valores “normales” difieren mucho de unas zonas a otras, y por tanto cuando se analiza una región amplia no es recomendable establecer el mismo límite para toda ella.

La figura 1.5 muestra los valores umbrales calculados por AEMET. Cada estación tiene una temperatura umbral que, de acuerdo al criterio establecido, es el percentil 95 de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000.



**Figura 1.5.** Temperatura umbral por la que se considera temperatura extrema para todas ciudades y estaciones cercanas. Fuente (AEMET).

El análisis de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos de temperatura máxima y en especial de las olas de calor ha recibido gran atención por parte de la comunidad científica debido a sus importantes repercusiones en diferentes ámbitos como pueden ser el incremento de la mortalidad durante estos eventos o su relación con los incendios forestales. La exposición humana a temperaturas ambientales elevadas puede provocar una respuesta fisiológica insuficiente del sistema termorregulador como, por ejemplo, golpes de calor, insolación y deshidratación. Las personas que viven en ambientes urbanos pueden estar sometidas a mayor riesgo de mortandad que las que viven en zonas rurales, esto es debido a que hay mayores índices de calor como la combinación de humedad y temperatura (Patz, 2005). A este fenómeno se le denomina “isla de calor”, que ocurre en zonas urbanas debido principalmente a la retención de calor durante el día como consecuencia de los materiales de todas las infraestructuras urbanas (hormigón y materiales absorbentes) y que expulsan el calor acumulado durante la noche. Esto hace que la temperatura no descienda tanto como en las zonas rurales.

Las personas mayores y niños/as son muy sensibles a estos cambios excesivos de temperatura. Según estimaciones de la OMS, cerca de 13.500 personas de más de 65 años podrían morir en 2030 en Europa y 27.000 en 2050 debido al incremento en la frecuencia de olas de calor, ya que la UE estima que la mortandad aumente entre 1-4% por cada incremento de temperatura de un grado.

Las olas de calor que suceden en la primavera o principios de verano pueden originar más muertes que las que se producen más tarde, debido a que las personas son más vulnerables a las olas de calor tempranas (Basu, 2002). Durante el verano de 2003, cuando la media de las temperaturas máximas superó los 35°C, se produjo la muerte de entre 22.000 y 45.000 personas en toda Europa durante el mes de agosto. En España, según datos del Instituto Nacional de Estadística (*INE*), durante la ola de calor del verano de 2003 se observó un incremento de 15,31% en el número de muertes con respecto a las mismas fechas en 2002. El aumento en el número de muertes por ola de calor llegó a ser del 27,40% en agosto de 2003 (tabla 1.2).

**Tabla 1.2** Muertes en España en verano de 2002 y 2003. Fuente (Cámara-Díez, 2006).

<b>Meses</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Variación %</b>
<b>Junio</b>	28771	31766	2995	+10,41
<b>Julio</b>	28690	31211	2521	+8,79
<b>Agosto</b>	27185	34632	7447	+27,39
<b>Total</b>	84646	97609	12963	+15,31

## 1.3 Área de estudio

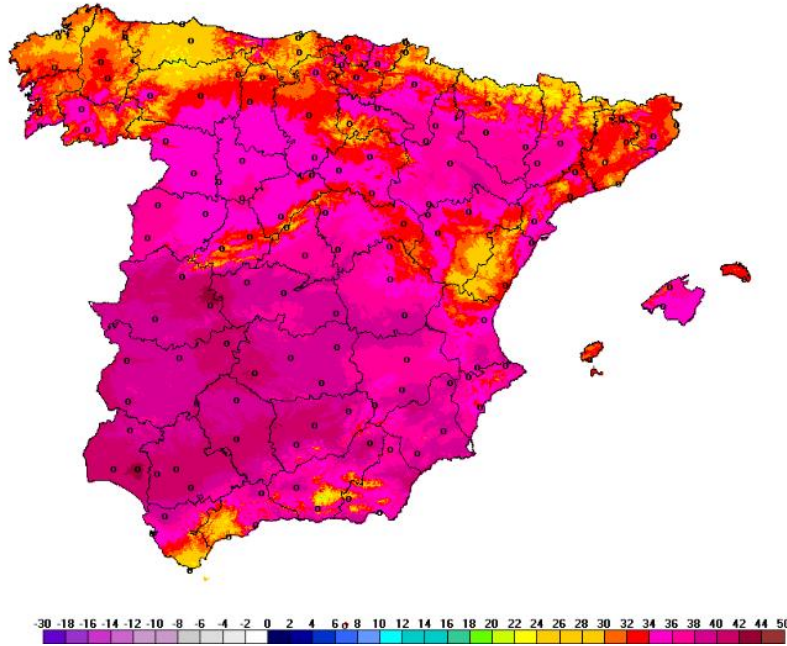
Este trabajo se va a concentrar en 53 ciudades de la Península Ibérica, abarcando todas las capitales de provincia españolas y 3 ciudades de Portugal (Porto, Lisboa y Faro). No se incluyen las ciudades de Canarias porque el dominio de los datos utilizados no es lo suficientemente grande como para incluir este territorio insular.

Según datos del *INE* para la población española y datos de *Eurostat* para Portugal, la población total de la Península Ibérica es de 56.781.000 habitantes para el año 2018. Las ciudades estudiadas representan una buena muestra poblacional de la Península Ibérica ya que, según el *INE*, la población total de las 50 ciudades españolas analizadas suma una población total de 14.491.762 habitantes en 2018 y, según los registros oficiales del *Eurostat* (Oficina Europea de Estadística) en el año 2017, las tres ciudades analizadas de Portugal, suman un número total de habitantes de 828.947. En total la muestra poblacional es de 15.320.709 habitantes para todas las ciudades analizadas de la Península Ibérica. Las ciudades seleccionadas representan por lo tanto el 26,9% de la población total de España y Portugal.

La Península Ibérica presenta una gran variedad de climas debido a su situación geográfica y a su orografía. El norte de la Península Ibérica está influenciado por un sistema ciclónico de borrascas y el sur por un clima más tropical. Según la dinámica de la atmósfera, en invierno es frecuente que los frentes atlánticos barran la Península Ibérica provocando lluvias, pero en verano la intensificación del anticiclón de las Azores hace que haya un tiempo seco y caluroso en la mayor parte de la Península Ibérica salvo en la Cornisa Cantábrica, que sigue algo influenciada por los frentes atlánticos. Por lo tanto, el norte peninsular y buena parte de la franja costera de Portugal está influenciada por continuos frentes atlánticos con precipitación durante todo el año y temperaturas suaves. La zona continental abarca la mayor parte del interior peninsular, su clima es más extremo, con veranos cálidos e inviernos fríos y precipitaciones escasas. La zona este de la Península Ibérica se caracteriza por un clima mediterráneo, templado y seco con inviernos suaves y veranos calurosos y precipitaciones más escasas y concentradas en el tiempo.

En la figura 1.6 podemos ver el percentil 95 de las temperaturas máximas de julio y agosto en el periodo 1971-2000 para toda España y Baleares. Podemos fijarnos en que el percentil de las temperaturas máximas es mayor en todo el interior y sur peninsular. Alcanzando los valores más altos en Extremadura y la zona este de Andalucía, con valores alrededor de los 40°C. En el norte y en zonas altas es dónde este percentil es menor, con un rango de temperatura máxima que abarca desde los 22° hasta los 34°C dependiendo de si estamos próximos a la costa o en el interior. Para la zona del centro peninsular no hay tanta oscilación y la temperatura máxima va desde los 34° a los 36°C.

Percentil del 95% de las temperaturas máximas de los meses de julio y agosto (período 1971-2000) y ubicación de las estaciones empleadas



**Figura 1.6.** Percentil 95 de las temperaturas máximas de julio y agosto durante el período (1971-2000) en todas las ciudades y estaciones cerca de estas. Fuente (AEMET).

## 1.4 Objetivos

El principal objetivo de este estudio es conocer cómo evolucionarán las temperaturas máximas en las capitales de provincia españolas y en las tres principales ciudades de Portugal a lo largo del siglo XXI. Se utilizan datos de temperatura máxima del proyecto CORDEX bajo las condiciones de dos escenarios futuros (RCP4.5 y RCP8.5). Como paso previo se llevará a cabo una validación de los datos de CORDEX a través de una comparación entre los datos de las simulaciones para el periodo histórico y las diferentes series medidas *in-situ* en algunas estaciones dependientes de AEMET.

A partir de las simulaciones para el periodo histórico (1980-2005) y para los dos periodos futuros: uno próximo (2020-2049) y otro lejano (2070-2099), se calcula la variación de las temperaturas máximas teniendo en cuenta la estación cálida (junio-septiembre) y posteriormente se analiza el número de días bajo condiciones extremas y bajo condiciones de ola de calor y sus implicaciones en la salud humana. El trabajo está estructurado de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 analizaremos los datos de CORDEX y AEMET así como los métodos y procedimientos aplicados en este trabajo.
- En el capítulo 3 nos centraremos en los resultados obtenidos, analizando la evolución de las temperaturas máximas, del número de días bajo temperaturas máximas extremas y

del número de días bajo condiciones de ola de calor para todas las ciudades de la Península Ibérica tanto durante el período histórico como sus proyecciones en el futuro. Para aportar una mayor credibilidad a las proyecciones futuras se realizará una validación previa de los datos de temperatura máxima históricos de CORDEX comparándolos estadísticamente con los datos medidos *in situ* en las estaciones de AEMET.

- En el punto capítulo 4 se realizará una discusión sobre todos los resultados obtenidos comparándolos con los históricos.
- En el capítulo 5 se mostrarán las principales conclusiones del estudio.

## 2. DATOS Y METODOLOGÍA

### 2.1 Bases de datos

#### 2.1.1 Datos de CORDEX

Se utilizaron los datos de temperatura máxima del aire en superficie del proyecto CORDEX para analizar sus proyecciones futuras. CORDEX realiza proyecciones futuras de las variables climáticas a escala regional, bajo los distintos escenarios de emisión utilizados en el CMIP5 (*Giorgi et al. 2009*). Estas proyecciones futuras se extienden a lo largo del siglo XXI, llegando incluso en algunos modelos hasta el 2300. Una parte esencial de CORDEX es que evalúa múltiples modelos regionales en un periodo de referencia de 20 años (1989-2007) en el que lo compara con el reanálisis del ERA-Interim como condiciones contorno. Estas evaluaciones analizan las fortalezas y debilidades de estos modelos regionales.

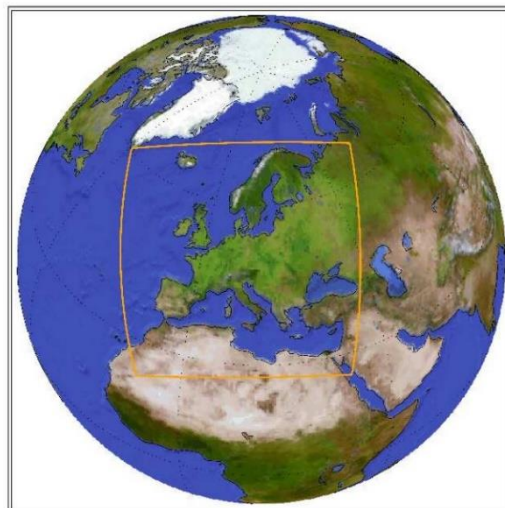
En este trabajo todos los RCMs seleccionados (pertenecientes al dominio EURO-CORDEX, figura 2.1, <http://www.euro-cordex.net/>) tienen una resolución espacial de 0.11° x 0.11°. Para la obtención de las series temporales de la temperatura máxima correspondientes a cada ciudad se realizó un promedio a sus cuatro vecinos más cercanos, dándole un peso diferente a cada uno de ellos en función de su distancia a las coordenadas de las ciudades. Se consideraron un total de 9 RCMs derivados del proyecto CORDEX. La tabla 2.1 muestra cada uno de ellos indicando también las fuentes de datos con la que fueron alimentados (GCMs) y el instituto que se ocupó de realizar las diferentes simulaciones.

**Tabla 2.1.** Simulaciones climáticas regionales del proyecto CORDEX utilizadas en este trabajo. Se detalla el modelo climático global (GCM) que impone las condiciones de frontera sobre el modelo regional (RCM) y el instituto en el que se desarrolla la simulación.

GCM	RCM	INSTITUTO
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CCLM4-8-17	CLMcom
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA4	SMHI
IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCA4	SMHI
IPSL-IPSL-CM5A-MR	INERIS-WRF331F	IPSL
MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	CLMcom
MPI-M-MPI-ESM-LR	RCA4	SMHI
ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E	KNI
MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	CLMcom
MOHC-HadGEM2-ES	RCA4	SMHI

Además de los datos para el periodo histórico (1976-2005), vamos a utilizar las proyecciones futuras simuladas bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El escenario

RCP8.5 es el más pesimista, ya que sus proyecciones consideran un incremento de CO<sub>2</sub> que duplicaría el actual llegando a las 936 ppm en el año 2100, lo que supone un forzamiento radiativo de 8.5 W/m<sup>2</sup>. El incremento en el forzamiento radiativo es menor bajo el escenario RCP4.5 ya que el incremento de CO<sub>2</sub> que se espera bajo este escenario para finales de siglo llegaría a las 538 ppm, sensiblemente menor que bajo el escenario RCP8.5. Se han escogido estos dos escenarios porque a corto plazo no se prevé una disminución de las emisiones de efecto invernadero a nivel global, todo ello a pesar del aumento en la concienciación de la población sobre la problemática del cambio climático y de la firma de Protocolos como el de Kioto, que con una vigencia de casi 20 años no logró una reducción efectiva de dichas emisiones. Además, analizar el escenario más pesimista nos permite conocer cuáles serían las consecuencias más duras a las que tendríamos que enfrentarnos de cumplirse dicha proyección, lo cual permite una mejor adaptación y medidas de mitigación más efectivas.



**Figura 2.1.** Dominio EURO-CORDEX

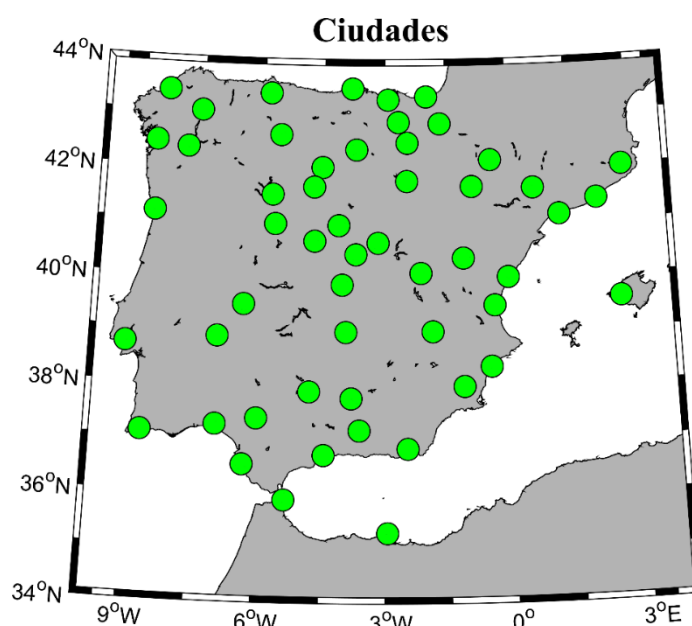
La tabla 2.2 recoge todas las ciudades seleccionadas para llevar a cabo este estudio, que son tres ciudades de Portugal (Porto, Lisboa y Faro) y todas las capitales de provincia españolas, sin incluir las Islas Canarias ya que como se puede ver en la figura 2.1 éstas quedan fuera del dominio de EURO-CORDEX. Esto hace un total de 53 ciudades analizadas tal y como se detallan en la tabla 2.2. Los datos fueron descargados a través del servidor alemán de CORDEX: <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/>. Como se puede ver en la figura 2.2 la selección de estas ciudades abarca las diferentes zonas climáticas de la Península Ibérica, de Baleares y de Ceuta y Melilla.

Todo el tratamiento de datos de las diferentes series de temperatura máxima para cada RCM se hizo utilizando el programa MATLAB, que es un potente instrumento de software numérico creado para la computación técnica. Éste lenguaje de programación facilita la obtención y tratamiento de operaciones matemáticas, simulación, análisis y procesamiento de datos, así como la observación y representación de gráficas que contribuyen a la aclaración de problemas de índole científicos.



**Tabla 2.2.** Coordenadas de las 53 ciudades que se analizaron en el presente trabajo.

<b>Ciudades</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Ciudades</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
<i>Albacete</i>	-1,8600	38,9976	<i>Madrid</i>	-3,7003	40,4166
<i>Alicante</i>	-0,4810	38,3452	<i>Málaga</i>	-4,4200	36,7196
<i>Almería</i>	-2,4679	36,8401	<i>Melilla</i>	-2,9387	35,2923
<i>Ávila</i>	-4,7003	40,6564	<i>Murcia</i>	-1,1298	37,9834
<i>Badajoz</i>	-6,9702	38,8786	<i>Ourense</i>	-7,8646	42,3400
<i>Barcelona</i>	2,1699	41,3879	<i>Oviedo</i>	-5,8447	43,3602
<i>Bilbao</i>	-2,9234	43,2569	<i>Palencia</i>	-4,5311	42,0124
<i>Burgos</i>	-3,6997	42,3408	<i>Palma</i>	2,6499	39,5695
<i>Cáceres</i>	-6,3707	39,4761	<i>Pamplona</i>	-1,6467	42,8172
<i>Cádiz</i>	-6,2926	36,5296	<i>Pontevedra</i>	-8,6480	42,4336
<i>Castellón</i>	-0,0376	39,9859	<i>Salamanca</i>	-5,6630	40,9649
<i>Ceuta</i>	-5,3161	35,8882	<i>San Sebastián</i>	-1,9750	43,3128
<i>Ciudad real</i>	-3,9272	38,9861	<i>Santander</i>	-3,8079	43,4609
<i>Córdoba</i>	-4,7791	37,8847	<i>Segovia</i>	-4,1192	40,9494
<i>Coruña</i>	-8,3958	43,3708	<i>Sevilla</i>	-5,9962	37,3826
<i>Cuenca</i>	-2,1340	40,0718	<i>Soria</i>	-2,4649	41,7636
<i>Gasteiz</i>	-2,6678	42,8464	<i>Tarragona</i>	1,2453	41,1186
<i>Gerona</i>	2,8237	41,9818	<i>Teruel</i>	-1,1069	40,3441
<i>Granada</i>	-3,5979	37,1764	<i>Toledo</i>	-4,0244	39,8567
<i>Guadalajara</i>	-3,1664	40,6298	<i>Valencia</i>	-0,3768	39,4702
<i>Huelva</i>	-6,9495	37,2571	<i>Valladolid</i>	-4,7283	41,6529
<i>Huesca</i>	-0,4088	42,1401	<i>Zamora</i>	-5,7437	41,5036
<i>Jaén</i>	-3,7895	37,7657	<i>Zaragoza</i>	-0,8765	41,6562
<i>León</i>	-5,5717	42,5998	<i>Porto</i>	-8,6109	41,1496
<i>Lleida</i>	0,6257	41,6141	<i>Lisboa</i>	-9,1333	38,7166
<i>Logroño</i>	-2,4499	42,4657	<i>Faro</i>	-8,6742	37,1030
<i>Lugo</i>	-7,5558	43,0120			



**Figura 2.2.** Localización de las 53 ciudades analizadas.

## 2.1.2 Datos de AEMET

Se seleccionaron diez estaciones de AEMET (Tabla 2.3) con el objetivo de cuantificar el grado de fiabilidad de las simulaciones de CORDEX (Tabla 2.1). Para ello se realizó una comparativa entre la temperatura máxima de cada uno de los RCMs durante el periodo histórico y los datos medidos *in-situ* por AEMET en diferentes ciudades. Esta comparativa nos permite conocer si todos los modelos muestran un nivel similar de fiabilidad, o si llegado el caso es necesario no contar con algún RCM por su escasa similitud con los datos medidos *in-situ*.

La selección de las ciudades se hizo tratando de abarcar las diferentes zonas de la Península Ibérica (costa e interior, Atlántico y Mediterráneo y zonas del norte, centro y sur Peninsular). Además, también se priorizó que las series con datos de temperatura de cada una de las ciudades abarcase por completo el periodo histórico seleccionado para analizar los datos de las simulaciones de CORDEX, es decir, el periodo 1976-2005.

Los datos diarios se tomaron de la página web de AEMET, concretamente de su sección de datos en abierto (<https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>).

**Tabla 2.3.** Ubicación, periodo con datos disponibles y altitud de cada estación de AEMET seleccionada para realizar la validación de los RCMs de CORDEX.

Ciudades	Identificador	Latitud	Longitud	Inicio datos	Fin datos	Altitud
<i>A Coruña</i>	1387	432157N	082517W	01/10/1930	Actual	58
<i>Bilbao</i>	1082	431753N	025423W	01/03/1947	Actual	42
<i>León</i>	2661	423518N	053904W	01/01/1938	Actual	912
<i>Valladolid</i>	2422	413827N	044516W	01/10/1973	Actual	735
<i>Barcelona</i>	0076	411734N	020412E	01/03/1924	Actual	4
<i>Valencia</i>	8414A	392906N	002829W	01/01/1965	Actual	56
<i>Madrid</i>	3195	402443N	034041W	01/01/1920	Actual	667
<i>Ciudad Real</i>	4121	385921N	035513W	01/11/1970	Actual	628
<i>Cádiz</i>	5973	362959N	061528W	01/11/1935	Actual	2
<i>Melilla</i>	6000A	351635N	025723W	01/01/1965	Actual	52

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Multimodelo

Para la realización de este estudio se utilizó un enfoque de multimodelo, que consiste en hacer una media de todos los valores de temperatura máxima de los 9 RCMs con que contamos (Tabla 2.1). Diferentes estudios que trabajaron con varios modelos de

proyecciones futuras mostraron que este enfoque permite reducir los errores individuales de cada uno de los modelos (Jacob et al., 2014).

Al disponer de 9 RCMS, cada cálculo (porcentaje de días bajo condiciones extremas y porcentaje de días bajo condiciones de ola de calor) va acompañado de una desviación estándar que se calcula mediante la fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

donde:

$\sigma$  es la desviación estándar;  $x_i$  es el valor correspondiente a cada RCM, mientras que  $\bar{x}$  es una media de todos los modelos;  $N$  es el número de RCMs, 9 en este caso.

## 2.2.2 Eventos extremos y olas de calor

Vamos hacer referencia a qué entendemos por eventos extremos y olas de calor. Entendemos como evento extremo de temperatura aquel día en el que la temperatura máxima supera el percentil 95 de la serie de temperatura máxima diaria tomando como referencia el período histórico. Esta metodología es la que adopta *AEMET* en sus estudios de eventos extremos. Como ola de calor definimos aquel episodio de al menos tres días consecutivos en el que se registran máximas por encima del percentil 95 de su serie de temperaturas máximas diarias, es decir, la consecución de al menos 3 días con temperaturas máximas extremas.

En esta sección, es necesario destacar que para todas las ciudades elegimos la estación cálida como el periodo que va desde junio a septiembre. Se han tomado estos cuatro meses porque en algunas de las ciudades analizadas se observó que los 3 meses más cálidos eran los que iban de junio a agosto, mientras que en otras eran los meses de julio a septiembre. Por lo tanto, teniendo en cuenta que en la mayoría de ellas las diferencias de temperatura entre junio y septiembre era poca, se decidió tomar estos 4 meses como estación cálida.

## 2.2.3. Análisis de la fiabilidad de los RCMs

La validación de los datos de temperatura máxima para cada RCM de CORDEX se llevó a cabo mediante la comparación con datos *in-situ* de las 10 estaciones de *AEMET* mencionadas anteriormente (Tabla 2.3). Los datos de las dos bases se promediaron mensualmente para el período 1976-2005 y posteriormente se compararon utilizando dos estadísticas. Por un lado, se realizó una comparación de los valores medios de cada serie y por otro lado se aplicó un test de análisis de solapamiento, o test de Perkins ya

que su aplicación está basada en el estudio desarrollado por este autor (*Perkins et al., 2007*).

Es importante tener en cuenta que la selección de estas dos estadísticas para realizar la validación se debe a que son complementarias, ya que mientras que la comparación de las medias de ambas series nos da una idea del error en relación al valor medio de las mismas, el análisis de solapamiento lo que nos cuantifica es la variación a lo largo de todo el rango de distribución de valores (o función de densidad de probabilidad).

### **2.2.3.1. Comparación de valores medios**

La comparación de los valores medios se hizo calculando en primer lugar el promedio de temperatura máxima para cada estación de AEMET y para cada uno de los 9 RCMs para dicha estación para el periodo histórico. Posteriormente se calculó un porcentaje de error (PE) aplicando la siguiente fórmula:

$$PE = 100 \times \frac{T_{mod} - T_{est}}{T_{ref}}$$

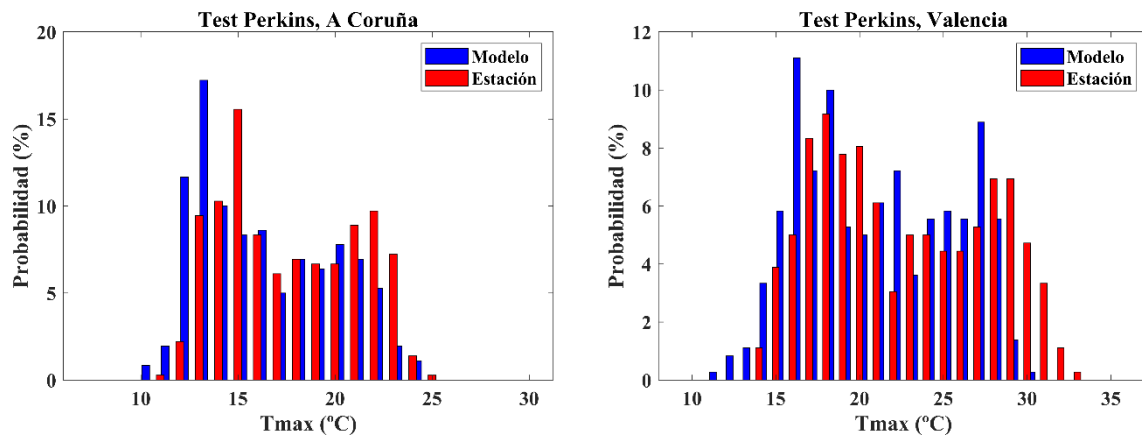
Donde PE es el porcentaje de error (%),  $T_{mod}$  es la temperatura máxima media de cada modelo para el período histórico,  $T_{est}$  es la temperatura máxima media para cada estación y  $T_{ref}$  es el promedio de estas dos temperaturas anteriores ( $T_{mod}$  y  $T_{est}$ ).

### **2.2.3.2. Test de Perkins**

La metodología que se siguió en este estudio es la misma que ya fue aplicada en anteriores estudios siguiendo Perkins et al., (2007). Estos autores comparan los valores modelados con los valores *in-situ* aplicando un test de solapamiento de ambas series a analizar. Esta técnica considera una amplia distribución de datos, discrepando de la metodología clásica que analiza la precisión de datos basándose únicamente en la media y su desviación estándar (Perkins et al., 2007).

En este trabajo lo que se hizo con el test es comparar el grado de solapamiento de los valores de temperatura máxima medios en diferentes rangos de distribución de valores (% de probabilidad). Dicho rango, no es más que la agrupación de datos obtenidos del modelo y de la estación *in-situ*, en intervalos de 1°C entre los 0 y los 30°C, con lo que se tienen 30 rangos de distribución. Tomamos, dentro de cada uno de los 30 rangos el valor más bajo de temperatura máxima media, ya sea el de la estación *in-situ* o la del modelo. Una vez tenemos esos 30 valores más pequeños, los sumamos y seguidamente los multiplicamos por 100 para obtener el porcentaje de solapamiento. En función de este dato, sabremos la similitud entre los valores observados y nuestros valores, siendo más parecidos cuanto más cerca del 100% se encuentren.

La figura 2.3 muestra, a modo de ejemplo, las distribuciones de probabilidades de la temperatura máxima medida *in situ* y la simulada por los RCMs para los casos de A Coruña y Valencia con el objetivo de facilitar el entendimiento de la metodología seguida.



**Figura 2.3.** Distribución de probabilidades de las series de temperatura máxima medidas *in-situ* en las estaciones de AEMET de A Coruña y Valencia y la serie resultante del promedio de todos los RCMs de CORDEX (azul) para esas mismas ciudades.



## 3. RESULTADOS

### 3.1 Validación de datos

#### 3.1.1 Temperatura máxima media

En este apartado se compara la temperatura máxima promediada para todo el periodo histórico (1976-2005) para cada uno de los nueve modelos con la medida *in situ* en la estación de AEMET. En la Tabla 3.1 se representa el porcentaje de error entre ambas series mostrando mayoritariamente valores negativos en todas las estaciones seleccionadas para la validación. Teniendo en cuenta que, tal y como se explicó en el capítulo 2 (Subsección 2.2.3.1), el porcentaje de error se calculó como el valor medio de cada modelo menos el valor medio de la serie *in-situ*, un valor negativo indica que la temperatura media del modelo es menor que la temperatura *in-situ* de la estación. Por lo tanto, una primera conclusión que se puede sacar es que la temperatura del modelo subestima la temperatura máxima real en todas las estaciones seleccionadas. De los nueve modelos considerados, el modelo 7 es el que tiene un menor porcentaje de error, seguido del 6 y del 5. Lo que nos indica que estos modelos subestiman menos la temperatura real dada por la estación. Por lo contrario, los modelos 4, 3 y 1 subestiman más la temperatura medida *in-situ*. Aunque se tratará en mayor detalle en la discusión de los resultados, comentar que los menores valores en el modelo pueden ser causados por diferentes motivos como, por ejemplo, el efecto isla de calor en las ciudades o la selección de los píxeles que representan a cada ciudad en cada modelo.

**Tabla 3.1.** Porcentaje de error (%) entre el valor medio de temperatura máxima de las series de los modelos de CORDEX y las series de datos *in-situ* de 10 estaciones de AEMET durante el período histórico (1976-2005). Diferencia calculada como la diferencia del valor del modelo menos los datos *in-situ*.

Estaciones	Modelos									Promedio Estación
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A Coruña	-13	-14,5	-14,5	-19	-12,7	-1,5	-3,4	-6,6	-8,6	<b>-10,4 ± 5,8</b>
Santander	-15,7	-16,6	-19,6	-18,5	-15,3	-7,9	-7,9	-10,8	-12,7	<b>-13,9 ± 4,3</b>
León	-29	-22,8	-19,2	-23	-10,9	-10,2	-7,2	-17,9	-12,1	<b>-16,9 ± 7,3</b>
Valladolid	-25,8	-18,5	-16,1	-22,2	-7,3	-11,3	-6,5	-17,9	-10,2	<b>-15,1 ± 6,7</b>
Barcelona	-15,2	-9,9	-18,1	-13,6	-6,3	-6,7	-3,8	-8,7	-6,3	<b>-9,8 ± 4,8</b>
Valencia	-7,3	-10,6	-15,8	-9,2	-6,8	-3,8	-7,1	-3,3	-8,2	<b>-8,0 ± 3,7</b>
Madrid	-16,2	-11,1	-10,8	-14,3	0,2	-3,4	-1,3	-9,4	-4,1	<b>-7,8 ± 5,8</b>
Ciudad Real	-16,6	-14,3	-13,4	-19,3	-4	-7,3	-6,6	-12,1	-8,6	<b>-11,4 ± 5,0</b>
Cádiz	-0,9	-2,7	-6,8	-14	-1,1	-0,9	-0,1	2,1	1,8	<b>-2,5 ± 5,0</b>
Melilla	-5,4	-10,3	-18,3	-10,2	-9,3	-12,2	-11	-6,2	-8,8	<b>-10,2 ± 3,7</b>
<b>Promedio RCMs</b>	<b>-14,5</b>	<b>-13,1</b>	<b>-15,3</b>	<b>-16,3</b>	<b>-7,4</b>	<b>-6,5</b>	<b>-5,5</b>	<b>-9,1</b>	<b>-7,8</b>	<b>-11,2</b>
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	<b>8,6</b>	<b>5,5</b>	<b>4</b>	<b>4,8</b>	<b>4,9</b>	<b>4</b>	<b>3,3</b>	<b>6,1</b>	<b>4,2</b>	<b>6,4</b>

En relación al promedio de los nueve modelos para cada estación (última columna de la tabla 3.1) se puede apreciar que en las estaciones de León, Valladolid y Santander se obtiene un porcentaje de error cerca del 15% o incluso mayor, lo que indica que en estas ciudades los modelos subestiman más la temperatura *in-situ* de la estación. Por el contrario, en las estaciones de Madrid, Valencia, Barcelona o Cádiz el porcentaje de error es menor al 10%, siendo en Cádiz el menor con un valor próximo al 3%. Cabe destacar también que, según el promedio de todos los modelos (última fila de la tabla 3.1) ninguno supera un porcentaje de error del 20% por lo que según esta estadística no hay razón para descartar ningún modelo.

### 3.1.2 Test de Perkins

El análisis del grado de solapamiento de las series de CORDEX y las series *in-situ* de AEMET también fue incluido en este trabajo porque nos permite comparar toda la serie de datos y no sólo su valor medio, proporcionando así una medida complementaria a la analizada en la sección anterior.

El promedio del valor de solapamiento a los 9 RCMs es superior al 70% en todas las estaciones consideradas (tabla 3.2, última columna). El modelo 4 muestra el porcentaje más bajo con un 70,4% y el 9 el más alto con un 77,9%. Por lo tanto, se puede afirmar que no existe ningún modelo que se desvíe significativamente del patrón general, ya que todos ellos se mueven en un rango similar de porcentaje de solapamiento. Por este motivo, se decidió contar con los 9 RCMs seleccionados inicialmente para llevar a cabo el análisis mediante un multimodelo de las proyecciones futuras en la temperatura máxima media, así como el análisis relativo a eventos extremos y olas de calor.

**Tabla 3.2.** Porcentaje de solapamiento entre las series de temperatura máxima de los modelos de CORDEX y las series de datos *in-situ* de 10 estaciones de AEMET durante el período histórico (1976-2005).

Estaciones	Modelos									Promedio estación
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A Coruña	66,4	70	70	64,4	68	68,3	72,8	76,9	78,9	<b>70,6 ± 4,8</b>
Santander	69,4	69,4	65	68,2	70,6	79,7	82,6	75	71,2	<b>72,3 ± 5,7</b>
León	68,3	77,2	78,3	70,3	81,1	75,8	79,7	76,9	80,5	<b>76,5 ± 4,4</b>
Valladolid	73,3	76,9	81,1	69,4	80,3	79,7	83,3	76,9	82,5	<b>78,2 ± 4,5</b>
Barcelona	72,5	79,7	66,4	73	84,4	75,3	79,4	78,9	82,8	<b>76,9 ± 5,7</b>
Valencia	71,4	77,8	66,1	72,2	85,3	73,9	78,3	77,8	75,8	<b>75,4 ± 5,4</b>
Madrid	71,7	79,2	75	72,8	73,9	70,3	74,4	75,5	79,2	<b>74,7 ± 3,0</b>
Ciudad Real	72,8	76,4	76,4	68,9	81,9	74,2	76,9	73,6	82,8	<b>76,0 ± 4,3</b>
Cádiz	74,5	74,2	82	68,8	75,7	76	73,6	74,5	71,5	<b>74,5 ± 3,6</b>
Melilla	75,5	75,8	60,8	76,4	75	68,6	70,3	81,9	73,9	<b>73,1 ± 6,0</b>
<b>Promedio RCMs</b>	<b>71,6 ± 2,8</b>	<b>75,7 ± 3,5</b>	<b>72,1 ± 7,4</b>	<b>70,4 ± 3,3</b>	<b>77,6 ± 5,8</b>	<b>74,2 ± 4,1</b>	<b>77,1 ± 4,3</b>	<b>76,8 ± 2,4</b>	<b>77,9 ± 4,5</b>	<b>74,4 ± 5,1</b>



El valor promedio del porcentaje de solapamiento entre las series *in-situ* de AEMET y cada uno de los RCMs para las 10 estaciones tomadas como referencia es de 74,4%.

## **3.2. Análisis de variaciones futuras de la temperatura máxima, eventos extremos y olas de calor.**

### **3.2.1 Variaciones futuras de las temperaturas máximas**

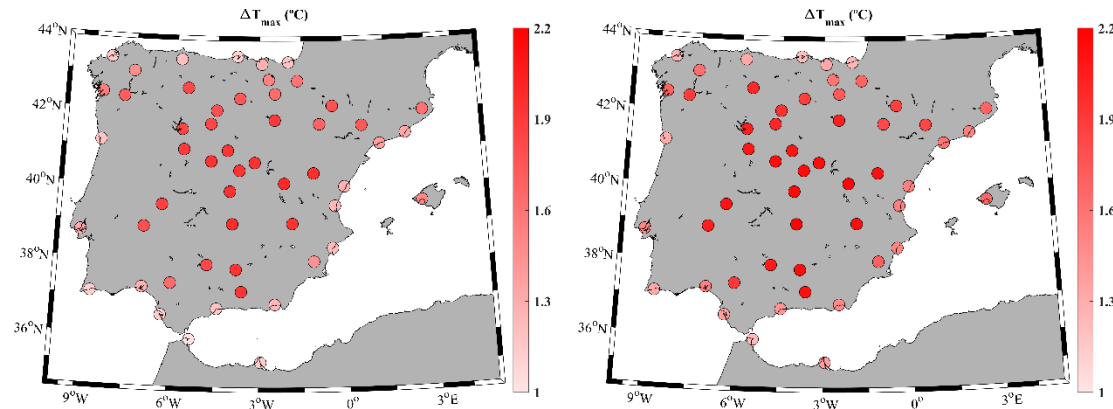
En este apartado se muestra la temperatura máxima media ( $T_{max}$ ) durante la estación cálida (junio-septiembre) para el periodo histórico y el futuro, tanto cercano (2020-2049) como lejano (2070-2099) bajo dos escenarios, el RCP4.5 (el más favorable) y el RCP8.5 (el más desfavorable). Los resultados se obtuvieron mediante un multimodelo.

La tabla 3.3, muestra los valores de  $T_{max}$  para cada ciudad bajo los diferentes escenarios y para los distintos periodos. Podemos ver como en muchas ciudades (22 de 53 analizadas), sobre todo del norte peninsular, algunas capitales de Castilla y León, ciudades como Barcelona o Ceuta y una de Portugal como Porto, la  $T_{max}$  histórica no supera los 25°C. Sin embargo, para el futuro cercano (2020-2049) bajo el RCP8.5 se puede observar una disminución del número de ciudades (14 ciudades) en las que no superarán los 25°C de  $T_{max}$ . Además, para finales de siglo bajo el RCP8.5 sólo cuatro ciudades no superarán los 25°C de  $T_{max}$  que se corresponden con las que están más al norte peninsular y a las bañadas por el Atlántico, salvo Oviedo.

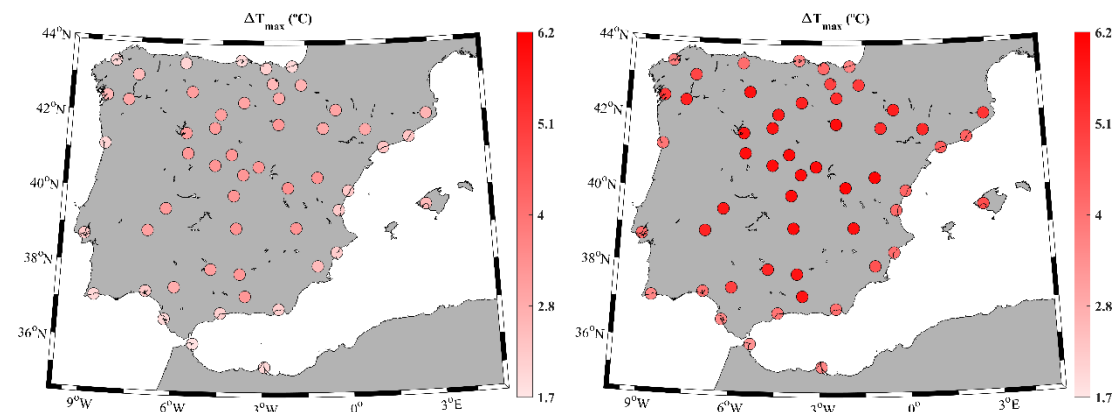
También podemos hacer referencia a que solo en cuatro ciudades se superan los 30°C de  $T_{max}$  histórica y se localizan sobre todo en el sur peninsular. Pero como podemos observar en la tabla 3.3, en un futuro cercano y bajo un escenario RCP 8.5, se produce un aumento del número de ciudades (con un total de 14) que superarán los 30°C de  $T_{max}$ , sobre todo las que se localizan en el centro y sur peninsular. Y más agravante es la situación para finales de siglo, ya que bajo el escenario RCP8.5 todas las ciudades, salvo aquellas situadas en zonas del norte y zonas costeras, superarán los 30°C  $T_{max}$ . Incluso, las ciudades más cálidas como Córdoba y Sevilla podrían superar los 38°C de  $T_{max}$ .

En la figura 3.1 podemos ver el incremento, diferencia entre el periodo futuro e histórico, que se proyecta en la  $T_{max}$  para el futuro cercano bajo los escenarios RCP4.5 (Figura 3.1a) y RCP8.5 (Figura 3.1b). En líneas generales se espera un incremento dependiendo de cada zona de entre 1°C y 2.2°C con pocas diferencias entre los dos escenarios. En zonas del interior se observa un aumento cercano a los 2°C sobre todo para el escenario RCP8.5 (Figura 3.1b). Por lo que, en general, el incremento es mayor sobre todo en el interior peninsular que en zonas costeras.

En la figura 3.2 vemos el incremento en la  $T_{\max}$  bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para el futuro lejano (2070-2099). Se puede ver que el aumento es mucho mayor bajo el escenario RCP8.5 (Figura 3.2b) sobre todo en zonas del sur y del interior peninsular, con un aumento de la  $T_{\max}$  entre los 5° y 6°C. Este incremento es menor en zonas costeras del Mediterráneo y del Cantábrico con un aumento de entre 3° y 4°C bajo el escenario RCP8.5 y de en torno a los 2°C bajo el escenario RCP4.5 (Figura 3.2a).



**Figura 3.1.** Mapas con la diferencia de temperatura máxima media ( $\Delta T_{\max}$  °C) entre el futuro cercano (2020-2049) y el periodo histórico (1976-2005) bajo los escenarios (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5.



**Figura 3.2.** Mapas con la diferencia de temperatura máxima media ( $\Delta T_{\max}$  °C) entre el futuro lejano (2070-2099) y el periodo histórico (1976-2005) bajo los escenarios (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5.

**Tabla 3.3** Valores de temperatura máxima media ( $T_{\text{máx}}$ ) de todas las ciudades consideradas para el período histórico y para los periodos futuros bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

CIUDADES	TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA				
	Histórico (1976-2005)	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Albacete	28,6 ± 2,1	30,6 ± 2,4	30,8 ± 2,3	31,9 ± 2,7	34,6 ± 2,9
Alicante	27,3 ± 1,4	28,5 ± 1,6	28,8 ± 1,5	29,5 ± 1,8	31,4 ± 1,9
Almería	27 ± 1,4	28,2 ± 1,6	28,4 ± 1,6	29,1 ± 1,8	31 ± 1,8
Ávila	22,8 ± 2	24,7 ± 2,3	24,9 ± 2,3	26,1 ± 2,6	28,8 ± 2,9
Badajoz	31,3 ± 1,6	33,1 ± 1,8	33,4 ± 1,9	34,4 ± 2	36,9 ± 2,1
Barcelona	24,5 ± 1,4	25,8 ± 1,7	26 ± 1,7	26,8 ± 2	28,8 ± 2,2
Bilbao	21,7 ± 1,5	23 ± 1,8	23 ± 2	23,9 ± 2,1	25,9 ± 2,4
Burgos	22,5 ± 2	24,2 ± 2,4	24,4 ± 2,4	25,5 ± 2,7	28,1 ± 3,1
Cáceres	29,8 ± 1,6	31,7 ± 1,9	31,9 ± 1,9	33 ± 2,1	35,6 ± 2,3
Cádiz	27,9 ± 1,9	29 ± 2	29,2 ± 2,1	29,8 ± 2,1	31,4 ± 2,2
Castellón	26,3 ± 1,5	27,5 ± 1,7	27,8 ± 1,8	28,5 ± 2	30,5 ± 2,2
Ceuta	24,4 ± 1,3	25,3 ± 1,4	25,6 ± 1,4	26,2 ± 1,6	27,7 ± 1,8
Ciudad real	29,5 ± 1,9	31,4 ± 2,2	31,6 ± 2,1	32,8 ± 2,4	35,4 ± 2,6
Córdoba	33 ± 1,6	34,8 ± 1,8	35,1 ± 1,8	36,1 ± 2	38,5 ± 2,1
Coruña	20,6 ± 1,5	21,7 ± 1,7	21,8 ± 1,9	22,5 ± 1,9	24,3 ± 2
Cuenca	24,7 ± 1,9	26,6 ± 2,3	26,8 ± 2,2	28 ± 2,6	30,8 ± 2,9
Gasteiz	21,4 ± 1,7	22,9 ± 2,1	22,9 ± 2,1	24 ± 2,4	26,3 ± 2,7
Gerona	26,6 ± 1,9	28,2 ± 2,4	28,2 ± 2,3	29,3 ± 2,7	31,8 ± 2,9
Granada	28,4 ± 1,8	30,3 ± 2	30,5 ± 2	31,7 ± 2,2	34,3 ± 2,4
Guadalajara	27,1 ± 2	29,1 ± 2,3	29,3 ± 2,3	30,4 ± 2,6	33,2 ± 2,9
Huelva	29,6 ± 1,5	30,1 ± 1,7	31,1 ± 1,7	32 ± 1,7	33,6 ± 1,8
Huesca	25,9 ± 1,7	27,7 ± 2,2	27,8 ± 2,2	28,9 ± 2,5	31,5 ± 2,8
Jaén	28,5 ± 2,2	30,4 ± 2,4	30,7 ± 2,3	32 ± 2,5	34,3 ± 2,7
León	22,9 ± 1,8	24,7 ± 2,3	24,8 ± 2,3	26 ± 2,6	28,8 ± 2,9
Lleida	29,7 ± 1,7	31,4 ± 2,2	31,5 ± 2,1	32,6 ± 2,4	35,1 ± 2,7
Logroño	23,8 ± 1,9	25,4 ± 2,3	25,5 ± 2,3	26,7 ± 2,6	29,1 ± 3
Lugo	21,3 ± 1,7	22,7 ± 2	22,9 ± 2,2	23,8 ± 2,3	26,2 ± 2,6
Madrid	28,4 ± 1,9	30,3 ± 2,3	30,5 ± 2,2	31,6 ± 2,5	34,3 ± 2,8
Málaga	26,8 ± 1,5	27,9 ± 1,8	28,2 ± 1,7	28,9 ± 2	30,7 ± 2,1
Melilla	25,4 ± 1,4	26,5 ± 1,6	26,8 ± 1,5	27,4 ± 1,7	29 ± 1,9
Murcia	30,6 ± 1,9	32 ± 2,1	32,3 ± 2	33,1 ± 2,3	35,2 ± 2,4
Ourense	23,9 ± 1,8	25,6 ± 2,2	25,7 ± 2,4	26,8 ± 2,5	29,5 ± 2,7
Oviedo	20 ± 1,7	21,1 ± 1,9	21,3 ± 2,1	22 ± 2,2	24,1 ± 2,4
Palencia	24,7 ± 2	26,4 ± 2,4	26,6 ± 2,4	27,7 ± 2,6	30,4 ± 3
Palma	27,3 ± 1,7	28,7 ± 2	28,9 ± 2	29,9 ± 2,2	32 ± 2,4
Pamplona	22,4 ± 1,8	23,9 ± 2,21	24 ± 2,3	25 ± 2,5	27,4 ± 2,9
Pontevedra	23,1 ± 1,7	24,6 ± 2	24,7 ± 2,2	25,7 ± 2,3	28,2 ± 2,5
Salamanca	25,3 ± 1,9	27,2 ± 2,3	27,4 ± 2,2	28,5 ± 2,5	31,3 ± 2,8
San Sebastián	21,0 ± 1,5	22,1 ± 1,6	22,2 ± 1,8	22,9 ± 1,9	24,6 ± 2,0
Santander	20,4 ± 1,2	21,5 ± 1,4	21,6 ± 1,6	22,3 ± 1,6	24 ± 1,8
Segovia	23,6 ± 2,1	25,6 ± 2,5	25,7 ± 2,5	26,9 ± 2,8	29,7 ± 3,1
Sevilla	33,5 ± 1,5	35,1 ± 1,6	35,4 ± 1,6	36,3 ± 1,7	38,4 ± 1,8
Soria	22,8 ± 2	24,7 ± 2,4	24,9 ± 2,4	26 ± 2,8	28,8 ± 3,2
Tarragona	25,2 ± 1,4	26,5 ± 1,7	26,8 ± 1,7	27,6 ± 2	29,6 ± 2,2
Teruel	24 ± 1,9	26 ± 2,4	26,1 ± 2,2	27,4 ± 2,6	30,1 ± 3

### TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA

CIUDADES	Histórico (1976-2005)	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Toledo	29,2 ± 2	31,1 ± 2,3	31,4 ± 2,3	32,5 ± 2,5	35,2 ± 2,8
Valencia	27,2 ± 1,6	28,4 ± 1,8	28,7 ± 1,8	29,4 ± 2	31,3 ± 2,2
Valladolid	25,5 ± 2	27,3 ± 2,3	27,5 ± 2,3	28,6 ± 2,6	31,3 ± 2,9
Zamora	25,9 ± 1,9	27,7 ± 2,3	27,9 ± 2,3	29,1 ± 2,5	31,8 ± 2,8
Zaragoza	28,5 ± 1,9	30,2 ± 2,3	30,3 ± 2,3	31,4 ± 2,6	33,9 ± 3
Porto	22,9 ± 1,5	24 ± 1,5	24,2 ± 1,7	25 ± 1,7	26,8 ± 1,7
Lisboa	26,9 ± 1,5	28,1 ± 1,6	28,3 ± 1,8	29,1 ± 1,8	31 ± 1,9
Faro	26,2 ± 1,6	27,2 ± 1,7	27,4 ± 1,8	28,1 ± 1,9	29,7 ± 1,9

### 3.2.2. Porcentaje de días bajo condiciones extremas en el futuro.

En esta sección se cuantifica el porcentaje de días con temperatura máxima extrema (%T<sub>ext</sub>) proyectados para el futuro bajo los dos escenarios durante la estación cálida.

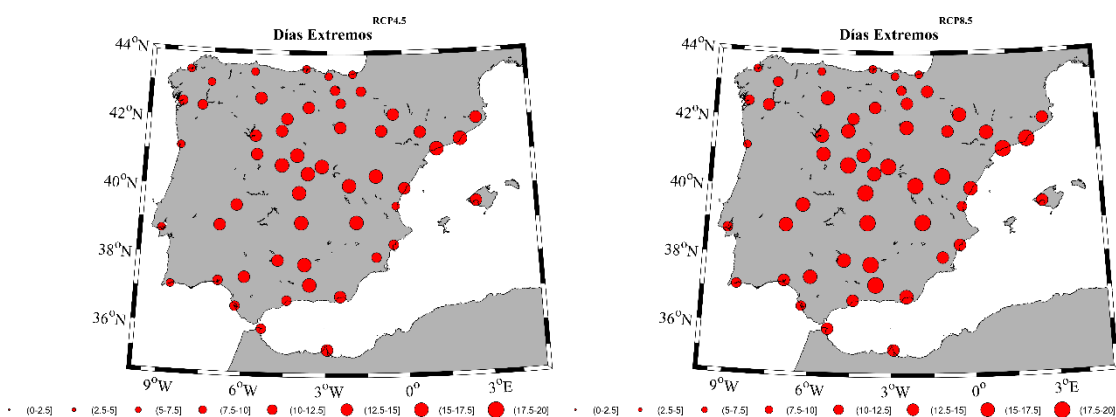
En la tabla 3.4 se muestra el porcentaje de días con temperaturas máximas extremas para las 53 ciudades analizadas. Para el futuro cercano bajo el escenario RCP4.5 se observa que hay 10 ciudades, sobre todo del norte peninsular, las que están bañadas por el Océano Atlántico y Valencia, que no superarán el 10% de días con temperaturas máximas extremas. La gran mayoría presentarán porcentajes de entre el 10 y el 15% y en 13 de ellas se superará el porcentaje del 15%. Estas ciudades se localizan sobre todo en el interior peninsular, exceptuando Barcelona. En relación al escenario RCP8.5, se observa un aumento del número de ciudades, en este caso 16 ciudades ya superarán el 15% de días con temperaturas máximas extremas, localizadas mayoritariamente en el interior peninsular, zona sur y algunas ciudades que baña el Mar Mediterráneo. Sin embargo, en el futuro cercano no se superará el 10% en la mayor parte de las ciudades localizadas al norte.

Si nos centramos en el futuro lejano, en general podemos comprobar que bajo el escenario RCP4.5 casi la gran mayoría de las ciudades superarán el 20% de días bajo temperaturas extremas, exceptuando las del norte peninsular y algunas ciudades costeras atlánticas como por ejemplo las tres ciudades de Portugal. También comprobamos que hay 17 ciudades que ya superarán el 25% de días bajo temperaturas máximas extremas, localizadas sobre todo en el centro y sur peninsular. Es bajo el escenario RCP8.5 donde se produce un aumento mucho mayor en estos porcentajes, ya que se puede ver como una veintena de ciudades superarán el 50% de días de temperatura máxima extrema en zonas bañadas por el Mar Mediterráneo, y en el centro y sur peninsular. Así, algunas ciudades como Barcelona, Tarragona, Castellón y Granada llegarán incluso a superar el 60% de días de temperatura máxima extrema.

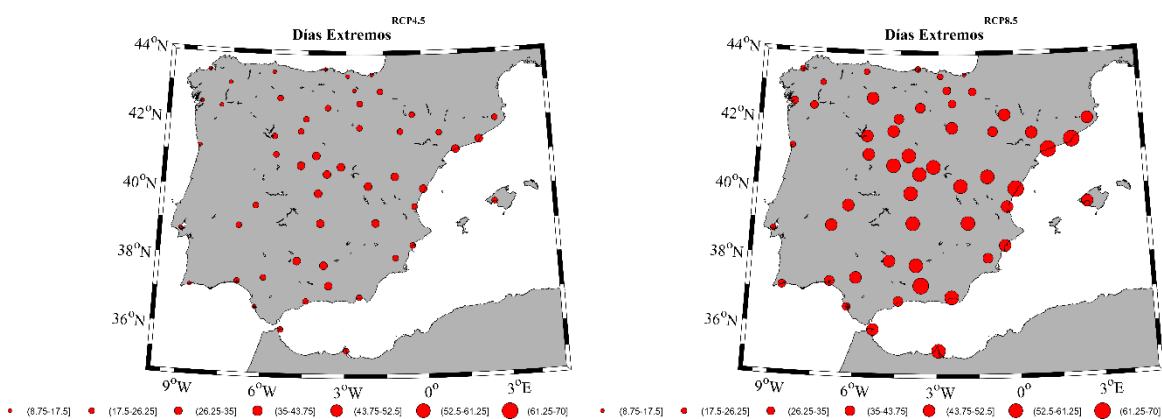
En la figura 3.3 podemos ver el %T<sub>ext</sub> en las ciudades analizadas para el futuro cercano

(2020-2049) bajo el escenario RCP4.5 (Figura 3.3a) y RCP8.5 (Figura 3.3b). La figura 3.3 muestra que no hay claras diferencias entre los dos escenarios, simplemente comentar que bajo el RCP8.5 (Figura 3.3b), se produce un aumento sobre todo en el centro y sur peninsular de entorno al 15% y algo menos para la zona norte y las zonas costeras atlánticas de en torno al 10% de días.

En la figura 3.4 podemos ver el  $\%T_{ext}$  en las ciudades analizadas para el futuro lejano (2070-2099) bajo el RCP4.5 (Figura 3.4a) y RCP8.5 (Figura 3.4b). Se observa que hay diferencias notables en el aumento del porcentaje de días, sobre todo para el RCP8.5. Así, se esperan fuertes incrementos en el número de días bajo temperaturas máximas extremas en las zonas costeras del Mediterráneo, zonas del sur peninsular y del centro, llegando a superar el porcentaje de 50% de días. El incremento en las ciudades del norte y las bañadas por el Océano Atlántico es menor, ya que no se llegará a superar en la mayor parte de los casos la cifra del 25% de días. Por lo tanto, se observa un patrón claramente diferente en el incremento de  $\%T_{ext}$  entre la zona más al oeste y la más al este de la Península Ibérica.



**Figura 3.3** Porcentaje de días bajo temperaturas máxima extremas en las ciudades analizadas para el futuro cercano (2020-2049) bajo el escenario RCP4.5 (a) y RCP8.5 (b).



**Figura 3.4.** Porcentaje de días bajo temperaturas máximas extremas en las ciudades analizadas para el futuro lejano (2070-2099) bajo el escenario RCP4.5 (a) y RCP8.5 (b).

**Tabla 3.4.** Porcentaje de días bajo temperaturas máxima extremas en las ciudades analizadas para el futuro cercano (2020, 2049) y lejano (2070-2099) bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

CIUDADES	DÍAS CON TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (%)			
	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Albacete	16.01 ± 6	17.8 ± 5.2	29.5 ± 12.5	56 ± 16.6
Alicante	10.9 ± 3.3	13.4 ± 4.3	19.1 ± 8.8	44.2 ± 18.9
Almería	13 ± 3.9	16.1 ± 4.3	24.4 ± 9	53.1 ± 16.3
Ávila	15.6 ± 4.8	17.7 ± 4.4	28.2 ± 9.7	54.2 ± 13.9
Badajoz	13.4 ± 3.2	15.4 ± 2.9	22.5 ± 4.7	45 ± 7.5
Barcelona	15.9 ± 6.1	18.9 ± 8	33.2 ± 14.3	69.1 ± 18.8
Bilbao	8.7 ± 1.8	8.9 ± 2.9	11.2 ± 2.6	18.6 ± 6.9
Burgos	12.7 ± 3.4	13.8 ± 3.8	20.7 ± 6.5	38.4 ± 11.1
Cáceres	13.9 ± 3.7	16.3 ± 3.4	24.3 ± 6.4	49.6 ± 9.8
Cádiz	10.5 ± 2.6	12.2 ± 2	16.6 ± 2.8	31.9 ± 6.1
Castellón	13.4 ± 4.9	17.2 ± 7.4	29.1 ± 15.1	63 ± 25.6
Ceuta	12 ± 3.8	13.8 ± 3.6	22.2 ± 7.9	52 ± 12.7
Ciudad real	15.8 ± 5.5	18.1 ± 4.8	29.3 ± 10.6	56.8 ± 13.1
Córdoba	14.8 ± 5	17.1 ± 4.2	26.4 ± 8.1	52.2 ± 8.8
Coruña	8.8 ± 1.5	9.2 ± 2.5	11.3 ± 2.1	21.9 ± 5.1
Cuenca	16.2 ± 5.6	18.3 ± 4.9	30.2 ± 11.9	58 ± 15.4
Gasteiz	11 ± 2.5	11.6 ± 3.5	16.2 ± 4.5	29 ± 8.6
Gerona	12.9 ± 4.1	13.5 ± 4.5	21.8 ± 8.7	47 ± 15
Granada	17.5 ± 5.9	19.7 ± 6	32.9 ± 13	62.6 ± 14
Guadalajara	15.5 ± 5.1	17.6 ± 4.2	28.5 ± 10.2	55.2 ± 14.2
Huelva	11.5 ± 3	13.3 ± 2.3	19.6 ± 4.6	38.2 ± 8.7
Huesca	14 ± 4	15.6 ± 4.2	24.3 ± 8.6	49.3 ± 13.3
Jaén	16.3 ± 6	18.4 ± 5.3	29.6 ± 11.4	56.7 ± 12.9
León	13.2 ± 3.7	15.4 ± 4.3	22.3 ± 7	45.8 ± 12
Lleida	13.8 ± 3.9	15.3 ± 4.1	24.2 ± 8.4	50.5 ± 13.2
Logroño	11.7 ± 2.9	12.6 ± 3.6	18.7 ± 6.1	34.7 ± 10.6
Lugo	9.6 ± 1.9	10.4 ± 3.2	12.9 ± 3.2	24.5 ± 6.7
Madrid	15.3 ± 5	17.3 ± 4.2	27.8 ± 9.7	54.8 ± 14.2
Málaga	11.3 ± 3.3	12.8 ± 3.2	19.5 ± 7.8	40.4 ± 14.7
Melilla	12.5 ± 5.2	14.9 ± 5.3	24.7 ± 12.7	55.6 ± 24.8
Murcia	12.1 ± 3.8	13.9 ± 5.1	21.5 ± 10.4	43.3 ± 18
Ourense	11.5 ± 2.5	13.1 ± 3.7	17 ± 3.9	34.2 ± 8.2
Oviedo	8.4 ± 1.9	8.9 ± 3.3	11.2 ± 4	22.7 ± 9.3
Palencia	12.9 ± 3.7	14.7 ± 3.8	21.9 ± 7.2	43.2 ± 12
Palma	13 ± 4.9	14.5 ± 4.1	24 ± 10.7	50.9 ± 18.1
Pamplona	11.9 ± 2.7	12.5 ± 3.4	17.9 ± 5.4	32.3 ± 9.6
Pontevedra	10.9 ± 1.4	11.5 ± 2.5	14.8 ± 2.2	30.3 ± 6
Salamanca	14.2 ± 3.8	16.5 ± 4	25.1 ± 7.7	49.7 ± 12.4
San Sebastián	8,7± 1,7	8,9 ± 3	10,9 ± 2,7	17,3 ± 6,9
Santander	8.6 ± 2.3	9.1 ± 4.6	11.9 ± 4.6	24.1 ± 12.9
Segovia	15.2 ± 4.7	17.2 ± 4.5	27.4 ± 9.7	52.5 ± 14.1
Sevilla	13.3 ± 4	15.3 ± 3	22.6 ± 5.3	44 ± 5.7
Soria	14.5 ± 4.4	16.1 ± 4.1	25.4 ± 9.2	47.8 ± 13.8
Tarragona	15.3 ± 4.2	18.2 ± 6	31.9 ± 13.5	67.8 ± 19.7

CIUDADES	DÍAS CON TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA (%)			
	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Teruel	16.2 ± 5.5	17.8 ± 4.6	29.5 ± 11.3	55.7 ± 15
Toledo	15.6 ± 5.3	17.7 ± 4.5	28.3 ± 10.1	55 ± 13.9
Valencia	10 ± 3.2	12.3 ± 4.9	18.4 ± 10.1	48 ± 25.4
Valladolid	13.4 ± 4.1	15.3 ± 4.2	23.3 ± 8	45.8 ± 12.8
Zamora	13.3 ± 3.7	15.7 ± 4	23.1 ± 7.1	47 ± 11.9
Zaragoza	12.9 ± 3.6	14.1 ± 3.8	21.3 ± 7.5	41.2 ± 12.4
Porto	9.1 ± 1.4	9.7 ± 1.9	11.8 ± 2.2	22 ± 6.1
Lisboa	9.6 ± 1.8	10.3 ± 1.8	13 ± 1.9	22.7 ± 4.6
Faro	9.9 ± 2	11.9 ± 1.6	16.8 ± 2.5	34.4 ± 4.8

### 3.2.3 Porcentaje de días bajo ola de calor para el futuro.

En este apartado se muestra el porcentaje de días bajo condiciones de ola de calor durante la estación cálida para el futuro bajo los dos escenarios considerados en este trabajo, RCP4.5 y el RCP8.5.

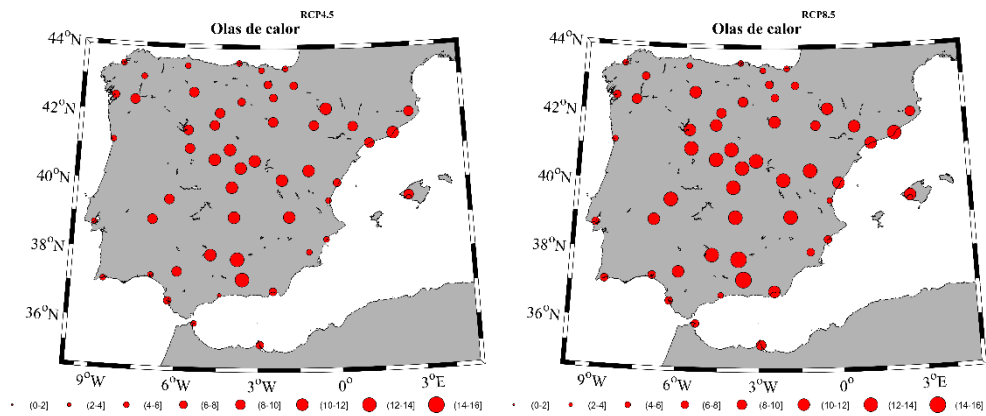
En la tabla 3.5 se muestra el porcentaje de días bajo ola de calor para todas las ciudades consideradas. Bajo el escenario RCP4.5 y para el futuro más cercano, podemos ver como en 14 ciudades se superarán el 10% de días bajo olas de calor. Estas ciudades están ubicadas sobre todo en zonas del interior y sur peninsular. Por el contrario, podemos ver cómo algunas ciudades del norte de la península y alguna ciudad costera del Mediterráneo y del Atlántico no superarán el 5% de días de ola de calor. Para el escenario RCP8.5 vemos un aumento en el número de ciudades, en este caso 27 ciudades que superarán el 10% de días de ola de calor e incluso ciudades donde se espera un incremento superior al 15%, principalmente las ubicadas sobre todo en el centro y sur de la península y algunas ciudades del Mediterráneo.

Si nos vamos a finales de siglo, podemos comprobar como bajo el escenario RCP4.5 prácticamente casi todas las ciudades superarán el 10% de días bajo ola de calor e incluso ciudades del interior y sur de la península superarían el 20% de días de ola de calor. Bajo el escenario más pesimista, comprobamos como prácticamente todas las ciudades superarán el 20% de días de ola de calor, exceptuando las ciudades más al norte y zonas atlánticas. También es destacado el número de ciudades que superarían los 40% de días bajo ola de calor, localizadas sobre todo en el interior, sur de la Península y zonas bañadas por el Mediterráneo. Hay que destacar especialmente las ciudades de Barcelona y Tarragona dónde superarían el 60% de días bajo condiciones de ola de calor.

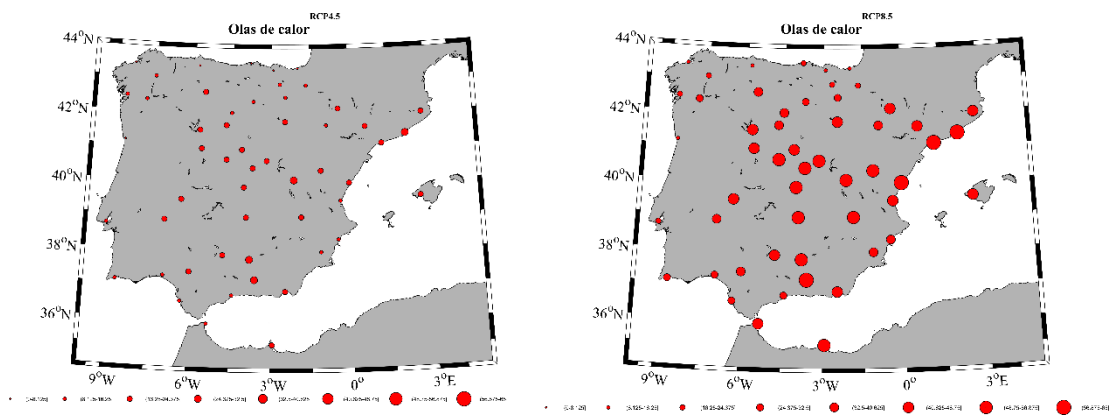
El mapa de la figura 3.5 muestra el porcentaje de días bajo ola de calor en todas las ciudades consideradas para el futuro cercano bajo los escenarios RCP4.5 (Figura 3.5a) y RCP8.5 (Figura 3.5b). Se observa un aumento sobre todo en el centro y sur de la Península de en torno a 10-12% de días bajo ola de calor para el escenario RCP4.5.

Bajo el escenario RCP8.5 este porcentaje aumenta hasta el 12-14% así como el número de ciudades bajo ese porcentaje incluyendo en este caso alguna situada a orillas del Mediterráneo.

La figura 3.6 muestra el porcentaje de número de días bajo condiciones de ola de calor para el futuro lejano. Visualmente destaca la importante diferencia que existe entre ambos escenarios. Así, bajo el escenario RCP4.5 (Figura 3.6a) muy pocas ciudades superan el 25%, sin embargo, bajo el escenario RCP8.5 (Figura 3.6b) las únicas ciudades que no sobrepasan este límite son algunas ciudades ubicadas al norte y oeste de la Península Ibérica. Además, bajo el escenario RCP8.5 hay muchas ciudades que superarán el 40% de días bajo ola de calor y están ubicadas en zonas del centro y sur de la Península, y alguna que otra ciudad del Mediterráneo.



**Figura 3.5.** Porcentaje de días bajo condiciones de ola de calor para el futuro cercano (2020-2049) bajo dos escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5.



**Figura 3.6.** Porcentaje de días bajo condiciones de ola de calor para el futuro lejano (2070-2099) bajo dos escenarios: (a) RCP4.5 y (b) RCP8.5.



**Tabla 3.5.** Valores de porcentaje de días bajo ola de calor para el futuro cercano y lejano bajo los escenarios 4.5 y 8.5.

CIUDADES	DÍAS BAJO CONDICIONES OLA DE CALOR (%)			
	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Albacete	11.5 ± 5.8	13.1 ± 5.6	23.9 ± 13.1	51.2 ± 18.8
Alicante	4.5 ± 3.3	6.3 ± 3.9	10.8 ± 8.6	35.7 ± 21.2
Almería	7.7 ± 3.9	10.3 ± 4.3	17 ± 8.7	46.5 ± 18.1
Ávila	11.2 ± 4.8	13.1 ± 4.9	22.7 ± 10.2	49.5 ± 15.6
Badajoz	9.4 ± 3.6	11.3 ± 3.2	17.7 ± 5.3	40.2 ± 8.7
Barcelona	10.1 ± 5.9	12.6 ± 8.1	25.8 ± 14.6	64 ± 21.2
Bilbao	4.4 ± 1.8	4.5 ± 2.9	5.6 ± 2.8	11.5 ± 7.4
Burgos	8 ± 3.4	8.5 ± 4.1	14.4 ± 6.5	30.7 ± 12.5
Cáceres	9.9 ± 4	12.2 ± 3.9	19.3 ± 6.8	45.1 ± 11.2
Cádiz	6 ± 2.8	7.4 ± 2.2	11 ± 3.1	25.4 ± 6
Castellón	7.7 ± 4.6	10.7 ± 7.6	22 ± 15.6	57.4 ± 28.5
Ceuta	5.2 ± 3.3	6.5 ± 3.9	13.5 ± 8.4	44.4 ± 14.9
Ciudad real	11.5 ± 5.6	13.5 ± 5.4	24 ± 11.6	52.5 ± 14.9
Córdoba	10.9 ± 5	13 ± 4.5	21.7 ± 9	47.4 ± 10.1
Coruña	5.3 ± 1.6	5.3 ± 2.5	6.5 ± 2.4	15.7 ± 5.3
Cuenca	12 ± 5.9	13.7 ± 5.3	25 ± 12.6	53.5 ± 17.3
Gasteiz	6.5 ± 2.5	6.5 ± 3.5	9.8 ± 4.5	20.7 ± 9.5
Gerona	8.6 ± 3.9	9.3 ± 4.5	16.4 ± 8.8	41 ± 16.9
Granada	13 ± 5.9	15.2 ± 6.4	27.8 ± 13.8	58.4 ± 15.9
Guadalajara	11.3 ± 5.2	13.2 ± 4.6	23 ± 10.7	50.7 ± 15.9
Huelva	6 ± 3	7.4 ± 2.3	12.4 ± 4.7	30.5 ± 8.8
Huesca	10 ± 3.9	11.3 ± 4.2	19.1 ± 8.9	44 ± 14.8
Jaén	12.2 ± 6	14.2 ± 5.9	24.5 ± 12.4	52.3 ± 14.7
León	9.1 ± 3.6	11 ± 4.7	16.7 ± 7.3	40.5 ± 13.3
Lleida	9.8 ± 3.9	11.1 ± 4.3	18.9 ± 8.6	45.3 ± 15
Logroño	7.1 ± 3.2	7.5 ± 3.7	12.4 ± 6	26.7 ± 11.6
Lugo	5.9 ± 2.2	6.4 ± 3.2	8.4 ± 3.6	18.1 ± 7.3
Madrid	10.7 ± 5	12.7 ± 4.5	22.4 ± 10.2	50 ± 15.9
Málaga	3.8 ± 2.7	4.8 ± 2.8	10.2 ± 7.5	30.8 ± 17.2
Melilla	6.9 ± 5	8.6 ± 5.2	18 ± 12.8	50 ± 26.9
Murcia	5.4 ± 2.9	6.8 ± 4.1	13.6 ± 9.5	34.7 ± 20.4
Ourense	8.1 ± 2.6	9.1 ± 4.1	12.3 ± 4.2	28.3 ± 8.5
Oviedo	4.4 ± 2	4.9 ± 3.5	6.3 ± 4.2	16.1 ± 10.4
Palencia	8.5 ± 3.7	9.9 ± 4.2	16 ± 7.5	36.6 ± 13.3
Palma	8.7 ± 4.7	10.2 ± 4.1	18.4 ± 10.2	45.2 ± 19.9
Pamplona	7.3 ± 2.9	7.4 ± 3.5	11.6 ± 5.4	24.3 ± 10.4
Pontevedra	7.2 ± 1.4	7.5 ± 2.6	9.9 ± 2.3	24.1 ± 5.8
Salamanca	9.9 ± 4.1	12 ± 4.7	19.6 ± 8.2	44.8 ± 14
San Sebastián	4.1 ± 1.8	4.4 ± 2.8	5.3 ± 2.7	10.7 ± 7.2
Santander	4.3 ± 2.3	4.9 ± 4.4	6.6 ± 4.7	18 ± 13.9
Segovia	10.9 ± 4.7	12.5 ± 4.9	21.9 ± 10.3	47.5 ± 15.8
Sevilla	9.3 ± 4	11 ± 3	17.7 ± 5.7	38.7 ± 6.5
Soria	9.9 ± 4.5	11 ± 4.5	19.1 ± 9.5	41.7 ± 15.7
Tarragona	8.1 ± 4.1	10.4 ± 6.1	23.2 ± 14.5	61.3 ± 23.1
Teruel	11.8 ± 5.9	13.1 ± 5.1	23.8 ± 11.8	50.7 ± 17
Toledo	11.3 ± 5.5	13.1 ± 5.1	22.9 ± 10.8	50.6 ± 15.5

CIUDADES	DÍAS BAJO CONDICIONES OLA DE CALOR (%)			
	RCP4.5 (2020-2049)	RCP8.5 (2020-2049)	RCP4.5 (2070-2099)	RCP8.5 (2070-2099)
Valencia	4.1 ± 2.3	5.7 ± 4	11.1 ± 9.2	41.1 ± 27.6
Valladolid	9 ± 4	10.7 ± 4.6	17.5 ± 8.4	40 ± 14.5
Zamora	9.2 ± 3.8	11.2 ± 4.6	17.7 ± 7.6	41.9 ± 13.5
Zaragoza	8.2 ± 3.5	9 ± 4.2	15.4 ± 7.6	34.2 ± 14
Porto	5.4 ± 1.7	5.9 ± 2	7,3 ± 2.3	16.1 ± 6.5
Lisboa	5.5 ± 2.2	6 ± 2.1	8.1 ± 2.3	16.6 ± 4.8
Faro	4.6 ± 2.2	6.1 ± 1.4	9.9 ± 2.9	26.7 ± 4.9

## 4. DISCUSIÓN

En un contexto de cambio climático, el principal objetivo de este trabajo fue analizar cómo evolucionarán a lo largo del S.XXI las temperaturas máximas en las principales ciudades de la Península Ibérica, Baleares, Ceuta y Melilla. Con este propósito se tomaron datos de 9 modelos regionales del proyecto CORDEX, que cuenta con proyecciones futuras a escala diaria con una resolución espacial de  $0.11^\circ \times 0.11^\circ$ . Se seleccionaron dos escenarios, RCP4.5 y RCP8.5, para analizar cómo evolucionarán las temperaturas máximas medias, los eventos extremos de temperatura y las olas de calor durante la estación cálida (junio-septiembre) para dos periodos futuros: cercano (2020-2049) y lejano (2070-2099). Para analizar cómo evolucionarán los eventos extremos en el futuro se utilizó como criterio el cálculo del percentil 95 para establecer un valor umbral a partir del cual consideramos un evento extremo. Consideramos que esta metodología es la más apropiada ya que la zona analizada abarca ciudades con características climáticas muy diferentes.

En primer lugar, se analizó la fiabilidad de las diferentes simulaciones comparando las series de temperatura máxima de cada modelo con datos *in-situ* de cada estación de AEMET mediante dos métodos complementarios, comparación de medias y test de Perkins. Se llegó a la conclusión de que los modelos tienden a subestimar el valor de la temperatura máxima real. Este hecho puede estar relacionado con el efecto de isla de calor que se da en las grandes urbes y que podría estar infravalorado por los modelos, debido a que este fenómeno es de una resolución espacial muy baja por lo que puede no estar suficientemente integrado en las simulaciones. Además, se debe tener en cuenta que la selección de cada pixel que define a cada ciudad se hizo considerando los cuatro vecinos más próximos, lo que también puede llevar a cierta atenuación de la señal de temperatura máxima. A mayores, también es importante señalar que, dado que el periodo histórico analizado es bastante extenso, se inicia en 1976, en muchas ocasiones las estaciones meteorológicas ubicadas en las ciudades sufrieron cambios importantes en su entorno debido al crecimiento de las mismas, lo cual puede favorecer también una ligera sobreestimación de la temperatura en los propios datos medidos *in-situ* con respecto al patrón general de temperatura de la ciudad.

En relación al análisis de la diferencia de temperatura máxima media para el futuro en comparación al periodo histórico (1975-2005), en la figura 3.1 se observa como para el futuro cercano se espera un incremento dependiendo de la zona de entre  $1^\circ\text{C}$  y  $2,2^\circ\text{C}$ . Las zonas donde más se notará serán las del interior peninsular. No se proyecta una gran diferencia entre el escenario RCP4.5 (figura 3.1.a) y RCP8.5 (figura 3.1.b). Sin embargo, para el futuro lejano (figura 3.2), la diferencia entre ambos escenarios es mucho mayor. Así, bajo el escenario RCP8.5 se espera un incremento entre los  $5^\circ\text{C}$  y  $6^\circ\text{C}$  en ciudades del interior y sur peninsular, siendo las zonas costeras y el Cantábrico dónde el incremento es menor, con valores de alrededor de  $4^\circ\text{C}$ . En relación a valores

medios de temperatura máxima se puede ver en la tabla 3.3 que para el futuro cercano bajo el escenario RCP8.5, muchas ciudades del sur e interior peninsular ya superarán con facilidad los 30°C, pero para finales de siglo la mayoría de las ciudades analizadas ya superarán los 30°C quedando al margen sólo las del norte peninsular. Señalar como casos extremos las ciudades de Sevilla y Córdoba donde se proyectan valores medios de temperatura máxima diaria superiores a los 38°C a final de siglo.

Considerando que tras el proceso de validación una de las conclusiones a las que se llegó es que las simulaciones tienden a subestimar ligeramente la temperatura máxima media *in situ*, es importante señalar que tal vez los valores de temperatura máxima media que se han comentado a lo largo de este trabajo pueden llegar a ser incluso algo mayores en las diferentes ciudades analizadas.

En relación al porcentaje de días de eventos extremos, por propia definición de lo que se considera como evento extremo, durante el periodo histórico el porcentaje promedio de días bajo condiciones de evento extremo es del 5%. Por lo tanto, considerando el futuro cercano, se proyecta un incremento del 10% de días de temperatura extrema, llegando al 15% en zonas del sur e interior peninsular bajo el escenario RCP8.5 (figura 3.3). Para finales de siglo, se puede apreciar en la figura 3.4 que habrá un notable aumento del porcentaje de días de temperatura extrema, ya que habrá lugares donde el incremento supere el 45% de días con temperatura extrema, estos lugares corresponderían con las zonas costeras del Mediterráneo, interior y sur peninsular, como por ejemplo Granada el incremento superará el 55% de días con temperatura extrema o Jaén que podrá superar el 50% de días con temperatura máxima extrema. Esto supone un incremento de más del 45% con respecto al período histórico, tomado como referencia. Bajo el escenario RCP4.5 para finales del siglo XXI las ciudades con un mayor incremento no superarían el 25% respecto al periodo histórico.

En cuanto a las olas de calor, se calculó el valor promedio de días bajo condiciones de ola de calor para el período histórico con el propósito de poder establecer una comparación con los valores proyectados para el futuro. Así, se obtuvo un valor aproximado del 2% que varía ligeramente dependiendo de cada ciudad. Se observa que para el futuro cercano bajo el escenario RCP8.5 (figura 3.5b) se superará de largo ese 2% de días bajo ola de calor, llegando incluso al 12-14%. Las ciudades más afectadas serán las del sur e interior peninsular y algunas bañadas por el Mediterráneo. Para finales de siglo, el incremento en muchas ciudades de estas zonas será superior al 40% (figura 3.6b). Destacar que ciudades densamente pobladas como Barcelona, registrarán un incremento superior al 60%. Bajo el escenario RCP4.5, el incremento sería menor del 20% en la mayor parte de las ciudades, no sobrepasando el 10% en ciudades del norte peninsular para el futuro lejano.

Los resultados de este estudio se compararon con los resultados obtenidos en la “*Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España*” (Amblar-Francés et al., 2017) elaborado por el Ministerio de Agricultura Pesca Alimentación y Medio Ambiente. En este informe también se estudia la variación de la temperatura máxima en

relación al periodo histórico. A la hora de realizar la comparación entre nuestro trabajo y este informe se debe tener en cuenta que los periodos tomados como referencia varían, ya que por ejemplo el trabajo de Amblar-Francés et al., (2017) toma como periodo histórico el 1961-1990 y como futuro lejano el 2081-2100. Además, los RCMs seleccionados en un caso y otro no son exactamente los mismos. En esta guía, para el futuro lejano y bajo el RCP8.5 se proyectan variaciones durante el verano (junio-agosto) entre 5,4°C y 8.4°C que son valores que se encuentran ligeramente por encima del rango de incremento obtenido en este estudio para el futuro lejano bajo el mismo escenario de emisiones. En cuanto al patrón espacial, vemos que los valores de incremento inferiores también se dan en las zonas costeras, especialmente en el norte peninsular.

Sobre las olas de calor este informe nos dice que, para finales de siglo, todas las proyecciones presentan anomalías positivas respecto al periodo histórico con valores más altos en el escenario RCP8.5. Los valores probables para finales de siglo pronostican que las olas de calor más largas tendrán una duración de entre 15 y 50 días más que el promedio, tomando como periodo de referencia el periodo histórico en la España peninsular, estos datos son similares a nuestros resultados en el que vemos que muchas ciudades superarán el 40 % de días bajo ola de calor (alrededor de 48 días considerando toda la estación cálida) para el escenario RCP8.5. Según el informe los cambios menores se producirían en Galicia, comunidades de la Cornisa Cantábrica y la Rioja y se dispararían en las comunidades del levante español y en Baleares. Por lo tanto, este patrón espacial coincide con el obtenido en nuestro trabajo.

Es necesario mencionar también que, al hablar de eventos extremos y olas de calor, la adaptación a estos episodios será muy importante para toda la población. La adaptación es la capacidad que tendrá cada ciudad para mitigar de manera eficiente los posibles efectos de las temperaturas extremas y olas de calor. La zona que analizamos presenta una importante variabilidad geográfica que es necesario tener en cuenta para aplicar medidas de control y prevención para la salud. Como ejemplo, decir que las ciudades del sur peninsular como pueden ser Sevilla o Córdoba hoy en día ya están mejor preparadas para tratar de mitigar estos fenómenos si se compara con ciudades del norte peninsular como pueden ser San Sebastián o Santander, ya que estas últimas no están tan acostumbradas a sufrir temperaturas tan altas. Igualmente es necesario tener en cuenta que, aunque las ciudades del sur peninsular o del interior estén acostumbradas a altas temperaturas máximas y tengan políticas y medidas de adaptación más desarrolladas que las del norte, el hecho de que se incrementen aún más siendo ya de por sí altas supondrá un peligro añadido para la población. Por lo tanto, es importante tener en cuenta que se deberán adoptar políticas y tomar medidas tanto en las ciudades en las que hoy ya existen como en las ciudades en las que estos fenómenos hoy en día no son tan comunes.

En la actualidad el gobierno tiene un Plan para reducir el impacto sobre la salud de la población en ciudades dónde se dé un exceso de temperatura (Ministerio de Sanidad Consumo y Bienestar Social, 2019). Este plan se basa en las siguientes actuaciones:

desarrollo de un Sistema de Información Ambiental para la predicción de temperaturas excesivas, información a la población sobre los efectos del exceso de calor, coordinación en los servicios sociales para la identificación de los grupos de riesgo. Estas actuaciones del Plan se activan desde el 1 de junio hasta el 15 de septiembre de cada año. Los datos expuestos en este trabajo en relación a la diferencia de temperatura máxima media, porcentaje de días de eventos extremos y olas de calor deberían de servir a modo de concienciación para las diferentes instituciones para que vean la gravedad de la situación, sobre todo para finales de siglo, y así adecuar las medidas a incluir en este tipo de planes que buscan mitigar los efectos de los eventos extremos de temperatura máxima.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la evolución futura de las temperaturas máximas durante la estación cálida (junio-septiembre) en 53 ciudades (Península Ibérica, Baleares, Ceuta y Melilla). Se utilizaron datos de temperatura máxima obtenidos del proyecto CORDEX mediante 9 modelos regionales y a partir de sus simulaciones para el periodo histórico (1980-2005) y para los dos periodos futuros: uno próximo (2020-2049) y otro lejano (2070-2099), se analizó como variará la temperatura máxima, el porcentaje de días con eventos extremos y el porcentaje de días bajo ola de calor, en base a dos escenarios futuros el RCP4.5 y el RCP8.5. Como paso previo, se observó que los 9 RCMs son válidos para llevar a cabo este análisis ya que muestran un grado de fiabilidad similar. Las principales conclusiones que se llegaron son las siguientes:

- Las temperaturas máximas medias aumentarán a lo largo del siglo XXI en toda la Península Ibérica, con incrementos entre los 5°C y los 6°C en zonas de sur e interior peninsular a finales de siglo bajo el escenario RCP8.5. En 31 ciudades se superarán los 30°C y ciudades como Sevilla o Córdoba llegarán a superar incluso los 38°C. Las ciudades del norte serán las que tengan un menor incremento alrededor de los 3°C y 4°C y no se espera que superen los 30°C a finales de siglo.
- El porcentaje de días con eventos extremos irán también en aumento, con incrementos superiores al 45% de días con temperaturas extremas en ciudades costeras del Mediterráneo y también del interior y sur peninsular para finales de siglo bajo el escenario RCP8.5. Menores incrementos, con valores en torno al 25% se esperan en ciudades del oeste y norte peninsular.
- Por último, las olas de calor también tendrán un aumento drástico, se proyecta un incremento del 40% de días bajo ola de calor para finales de siglo según el escenario RCP8.5, estas ciudades se concentrarán sobre todo en el interior y sur peninsular, como las zonas costeras bañadas por el Mediterráneo. Quedan al margen las zonas del norte y zonas costeras bañadas por el Atlántico que no superarán el 20% de días bajo ola de calor para finales de siglo.

En definitiva, todos los resultados analizados muestran un claro aumento en la temperatura máxima de todas las ciudades y por consiguiente un aumento de los eventos con temperatura extrema y de olas de calor para finales de siglo. Ante estas predicciones, las zonas más afectadas deberán aplicar medidas para prevenir los efectos adversos de estos eventos extremos.





## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Amblar-Francés, P., Casado, M.J., Pastor, A., Ramos, P., y Rodríguez, E. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España. Ministerio de agricultura y pesca alimentación y medio ambiente.
- Basu R., y Samet J.M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. *Epidemiologic Reviews*, 24, 190-202.
- Cámara-Díez, E. (2006). Variables meteorológicas y salud. *Documentos de Sanidad Ambiental*. Comunidad de Madrid, Madrid.
- Giorgi, F., Jones, C., y Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58, 175-183.
- IPCC, (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. Available: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/> 2.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... y Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578.
- Ministerio de Sanidad Consumo y Bienestar Social, (2019). Plan Nacional de Actuaciones Preventivas de los Efectos del Exceso de Temperaturas sobre la Salud. Disponible en: [https://www.msbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/planAltasTemp/2019/docs/Plan\\_Nacional\\_de\\_Exceso\\_de\\_Temperaturas\\_2019.pdf](https://www.msbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/planAltasTemp/2019/docs/Plan_Nacional_de_Exceso_de_Temperaturas_2019.pdf)
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... y Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Patz J. A., Campbell-Lendrum D., Holloway T. and Foley J. A. (2005). Impacts of regional climate change on human health. *Nature*, 438(17), 310-317.
- Schoof, J.T., & Robeson, S.M. (2016). Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States. *Weather and Climate Extremes* 11, 28-40.

## **Páginas web consultadas**

**CORDEX:** <http://www.euro-cordex.net/>

**MATLAB:** <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

**AEMET DATOS:** <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>

**INE:** <https://www.ine.es/>

**EUROSTAT :** [https://ec.europa.eu/info/departments/eurostat-european-statistics\\_es](https://ec.europa.eu/info/departments/eurostat-european-statistics_es)

**NOAA:** <https://www.noaa.gov/>