

---

*ESTUDIO Y METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO DE SERIES CLIMÁTICAS  
PARA EL ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LA TEMPERATURA EN LA  
PROVINCIA DE ALICANTE*

---

*Autor: Javier Muñoz Martínez  
Tutores: Joaquín Giménez Torres  
Juan Gil Moltó*



**CIENCIAS AMBIENTALES**  
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

Departamento de Física Aplicada  
Grado de Ciencias Ambientales  
Facultad de Ciencias Experimentales  
Universidad Miguel Hernández  
Curso académico 2020/2021

## Resumen

En base a los numerosos estudios sobre el aumento de la temperatura global y los datos expuestos por el IPCC, este Trabajo de Final de Grado se ha enfocado al estudio de la tendencia y la evolución de las temperaturas máximas diarias para el periodo 2000-2019 en tres emplazamientos de la provincia de Alicante.

Se ha llevado a cabo el tratamiento estadístico de distintas series de datos de temperaturas máximas, recogidos en diferentes estaciones meteorológicas, para la detección y corrección de lagunas, valores extremos y ruptura de las series mediante la aplicación de un procedimiento de homogeneización, requisito para la comparación entre series climáticas.

Tras el tratamiento estadístico, se ha estudiado la evolución mensual y anual de las series homogeneizadas en función de las tendencias observadas en un periodo de 20 años.

### Palabras clave:

Análisis de tendencias; Temperatura máxima; Cambio climático; Homogeneización.

## Abstrac

Based on the numerous studies on the increase in global temperature and the data presented by the IPCC, this final degree project has focused on the study of the trend and evolution of the maximum daily temperatures for the period 2000-2019 in three locations in the province of Alicante.

The statistical treatment of different series of maximum temperature data, collected in different meteorological stations, has been carried out for the detection and correction of gaps that may contain, as well as extreme values, and breaking of the series by applying a homogenization procedure, a requirement for the comparison between climatic series.

After statistical treatment, the monthly and annual evolution of the homogenized series was studied based on the observed trends over the 20-year period.

### Key words:

Trend analysis; Maximum temperature; Climate change; Homogenization.

## Contenido

1.	INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES PREVIOS _____	1
2.	OBJETIVOS _____	10
3.	MATERIALES, EMPLAZAMIENTOS Y MÉTODOS _____	10
3.1.	Zona de estudio _____	10
3.2.	Origen de datos. Estaciones meteorológicas _____	11
3.3.	Análisis estadístico de series climáticas _____	12
3.3.1.	Prueba de Normalidad. Distribución de series _____	12
3.3.2.	Prueba de Homocedasticidad. Homogeneidad de varianzas _____	12
3.3.3.	Prueba de Kruskal-Wallis y Test U de Mann-Whitney. Distribución no normal _____	13
3.3.4.	Teorema Central del Límite _____	14
3.3.5.	Estudio de las correlaciones _____	14
3.4.	Procedimientos de Homogeneización _____	14
3.4.1.	Climatol _____	14
3.4.2.	Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) _____	16
3.5.	Procedimiento de Análisis de tendencias _____	16
3.5.1.	Mann-Kendall _____	17
3.5.2.	Test de Yue _____	17
3.5.3.	Pendiente de Sen _____	17
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	17
4.1.	Elección de las series de datos. Comparación entre estaciones _____	17
4.2.	Reconstrucción y homogeneización de las series _____	24
4.3.	Descriptivos de las series resultantes homogeneizadas _____	27
4.4.	Estudio de tendencias de la temperatura máxima _____	33
5.	CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN _____	36
6.	BIBLIOGRAFÍA _____	38

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES PREVIOS

La temperatura, junto a otras variables meteorológicas que definen las condiciones de un determinado clima, como la precipitación o la humedad relativa, están cambiando y consecuencia de ello, el clima global también sufre modificaciones que dan lugar a lo que conocemos como *“el Cambio Climático”*. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), el agua de los océanos y la atmósfera se han calentado, y como si de una cadena de efectos se tratará, el hielo disminuye por derretimiento, el nivel del mar aumenta y los gases de efecto invernadero escapan más fácilmente concentrándose a lo alto de la atmósfera, produciendo con mayor frecuencia temperaturas altas extremas y disminución de las más frías, tanto a escalas de tiempo diarias como estacionales, llegando a producir condiciones diferentes a las establecidas por las clasificaciones climáticas.

La región del Mediterráneo es una de las zonas más estudiadas para el análisis de la evolución de la temperatura debido a su sensibilidad al cambio climático. Además, destaca por sus contrastes topográficos y la alta variabilidad del clima. Por ello, tanto las condiciones climáticas, como la región, han sido el punto principal en los estudios sobre el cambio climático y la variabilidad de este (Gil-Guirado y Pérez-Morales, 2019). El clima Mediterráneo, cuyo nombre proviene del mar Mediterráneo, es el clima con más extensión de la región. Está caracterizado por altas temperaturas en verano, junto con la sequía estival, mientras que el invierno es lluvioso y las temperaturas son más moderadas, con primaveras y otoños variables. Existen numerosos subtipos de climas mediterráneos según la clasificación climática de Köppen y Geiger (1936). En lo que respecta al clima mediterráneo típico de la ribera mediterránea, Csa (Tabla 1), las precipitaciones no son abundantes, sobrepasándose los 1000 mm únicamente en puntos de gran altitud, y apenas se producen en verano. La temperatura media se encuentra alrededor de los 20 °C, pero presenta variabilidad estacional, siendo inferior a 18 °C en los meses más fríos y superior a 22 °C en los meses cálidos.

En lo que respecta a la Península Ibérica, se observan dos grandes climas a parte del Mediterráneo, que son el clima Subtropical-Tropical (característico de las Islas Canarias) y el clima Oceánico (representado sobre todo en la zona norte de la Península). Según los datos medios anuales de la temperatura media del aire, representados en el Atlas Climático Ibérico proporcionado por la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), varían entre valores inferiores

a 2,5 °C en las zonas de mayor altitud, como en los Pirineos, donde se presenta un clima comúnmente conocido como de Montaña, hasta valores superiores a 17 °C en provincias como Huelva, Sevilla, Cádiz y la costa sureste entre Málaga y Alicante donde el clima es Mediterráneo ( $T > 20$  °C). En cuanto a las medias mensuales, estas presentan variación estacional, alcanzando máximas en verano (principalmente julio y agosto) con valores superiores a 27 °C en provincias como Badajoz, Toledo y Córdoba, mientras que los valores mínimos ( $T < 0$  °C) se dan en invierno, entre diciembre y febrero, y sobre todo zonas con altitudes elevadas.

<b>Valores climáticos medios. Clima Mediterráneo Típico (Csa)</b>													
<b>Mes</b>	<b>En</b>	<b>Fb</b>	<b>Mr</b>	<b>Ab</b>	<b>My</b>	<b>Jn</b>	<b>Jl</b>	<b>Ag</b>	<b>Sp</b>	<b>Oc</b>	<b>Nv</b>	<b>Dc</b>	<b>Anual</b>
<b>T máx. media (°C)</b>	16	16	18	20	23	26	29	29	28	25	21	17	<b>22</b>
<b>T mín. media (°C)</b>	9	9	10	13	16	19	22	23	21	18	14	10	<b>15</b>
<b>Precipitación total (mm)</b>	108	91	64	42	19	9	4	8	27	54	79	108	<b>641</b>

Tabla 1. Valores climáticos medios de temperaturas máximas y mínimas y precipitaciones, de cada mes y al año, del Clima Mediterráneo Típico (Csa). Fuente: AEMET (elaboración propia).

En lo que respecta a la precipitación, las estaciones pluviométricas registran valores superiores a 2200 mm en las zonas montañosas del noroeste de Navarra y sudoeste de Galicia, donde el clima característico es el Oceánico (fundamentalmente Cfb, según Koppén), mientras que los valores mínimos se registran en el sureste, Almería, Murcia y sur de Alicante, con precipitaciones inferiores a 300 mm anuales, nuevamente caracterizando el clima Mediterráneo. Al igual que la temperatura, la precipitación mensual varía a lo largo del año, siendo diciembre el mes más lluvioso, con medias mayores a 120 mm, y el más seco julio, con medias inferiores a 75 mm.

Para el análisis de las variables climatológicas, conviene tener en cuenta que la escala local y regional ofrecen unos resultados que tienen mayor asimilación por la población local (Magaña, 2012), lo que permite conocer cómo la percepción del clima cambia según la perspectiva considerada para el análisis de las condiciones climáticas que se dan en un determinado momento. Según Chen y Chen (2013), pocos artículos científicos hacen referencia a cómo la comparación de los parámetros climáticos a lo largo del tiempo, y en diferentes escalas, puede dar lugar a valores diferentes a los determinados para cada clima,

es decir, podemos encontrar parámetros de un clima desértico donde hace menos de 30 años existían parámetros propios de clima mediterráneo, como es el caso de Murcia (Gil-Guirado y Pérez Morales, 2019).

El mayor problema para el análisis de las series climáticas en los países mediterráneos, incluyendo España, es la “inexactitud” de los datos, consecuencia de la reubicación de las estaciones meteorológicas. Además, los instrumentos de medida, los errores de dichos instrumentos, cortes en el suministro eléctrico, horarios de observación, e incluso la aparición de microclimas, son factores que pueden generar variaciones en la serie. Sin embargo, cabe comentar que España cuenta con una amplia base de datos desde mediados del S.XIX (El Kenawy et al., 2013), la cual facilita la reconstrucción de las series climáticas a largo plazo, lo que constituye uno de los objetivos del presente Trabajo Final de Grado.

Concretamente, en España existen observaciones meteorológicas desde la primera mitad del S. XVIII, pero recogidas de forma irregular. A partir de finales de este siglo comienzan los primeros registros mediante observaciones instrumentales puntuales y de manera continua, llevadas a cabo por Francisco Fernández Navarrete, con la ayuda de la Real Academia de Medicina. Pero fue en el S.XIX cuando se estableció una red de estaciones meteorológicas con datos que solamente se manipulaban con objetivos científicos y estadísticos, y no para transmitir información. Con la implantación del Real Decreto 11 de agosto de 1887, surge un Servicio Meteorológico, denominado actualmente Agencia Estatal de Meteorología, AEMET (Real Decreto 186/2008, del 8 de febrero), siendo uno de sus cometidos el “calcular y predecir el tiempo probable en los puestos y capitales de provincia”. A lo largo del mismo siglo, se establecieron más de 500 estaciones y, hoy en día, la red de observación meteorológica en España contiene alrededor de 5000 (109 estaciones principales, 766 automáticas, 1276 termométricas y 2472 pluviométricas). Además, actualmente se pueden encontrar otras redes meteorológicas repartidas por comunidades autónomas, las cuales permiten un estudio más concreto de las características de cada región. Por ejemplo, en la Comunidad Valenciana (zona escogida para el presente estudio) existen agencias como la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica (RVVCCA), el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), una entidad autónoma de la Generalitat creada por la Ley 4/1991 de la Generalitat Valenciana de 13 marzo o la Asociación Valenciana de Meteorología (AVAMET), asociación sin ánimo de lucro que se acoge a la Ley Orgánica 1/2002, de 22 de marzo, y a la

Ley 14/2008, de 18 de noviembre. Estas disponen de estaciones meteorológicas repartidas por las provincias de Alicante, Valencia y Castellón, cuya presencia permite la comparación de parámetros meteorológicos a nivel nacional y regional para un mejor análisis climático.

En las últimas décadas, el desarrollo de conjuntos de datos climáticos completos y homogéneos ha sido de considerable interés en el Mediterráneo (Eischeid et al., 2000). Esto se debe al interés científico por mejorar la calidad, extensión y espacio de las series temporales climáticas para la posterior investigación de la amplitud del cambio climático. Muchos investigadores (Romero et al., 1998; Vicente-Serrano et al., 2010) se han enfocado en el estudio de los cambios en la precipitación y temperatura, debido al gran impacto tanto ambiental como socioeconómico que conlleva. La continuidad de temperaturas extremas y el aumento de la temperatura ya es una realidad a nivel global, cuyos efectos pueden llegar a ser muy diferentes en las distintas partes del mundo (desde inundaciones, incendios en épocas del año poco habituales, sequías de extensa duración, aumento de huracanes y rayos, etc.). Romero et al. (1998) y Vicente-Serrano et al. (2010) revelaron que, desde mediados del siglo XIX, la temperatura media de la superficie de la Tierra aumentó aproximadamente 0,75 °C/año. Junto con las variaciones observadas en la temperatura media anual, estos estudios también informaron de una tendencia positiva de precipitación de alrededor del 1% durante el siglo XX. Por otra parte, según Schär y Jendritzky (2004), las olas de calor extremas del verano se cobraron alrededor de 22000 vidas en diferentes partes de Europa, mientras que, según Karl y Easterling (1999), en Bangladesh se informaron aproximadamente de 140000 muertes relacionadas con las inundaciones en 1991. Esto, por lo tanto, muestra claramente la importancia del cambio climático extremo en todo el mundo, a nivel nacional y regional, desde la perspectiva del calentamiento global.

Para comprender mejor el estado futuro, es necesario conocer el patrón cambiante de las precipitaciones y la temperatura a escala local, ya que las variaciones climáticas locales y regionales no coinciden con la escala mundial, y la evaluación de la variabilidad y el cambio climático a menor escala son cuestiones fundamentales (Rahman y Lateh, 2016). En lo que respecta al estudio de la evolución de las temperaturas y otras variables climáticas, los conjuntos de datos climáticos completos, confiables y espacialmente densos son obligatorios para diferentes tipos de análisis climáticos (Eischeid et al., 2000). A partir de ellos, numerosas investigaciones han comprobado las tendencias de aumento de temperatura en la superficie,

pero la evolución de los cambios no es uniforme (Salomon et al., 2007). De igual forma, en el informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013) también se ha demostrado las tendencias positivas, estadísticamente significativas, de la temperatura y la precipitación en todo el mundo.

Para la realización de los estudios climatológicos, una vez recopilados los datos de las estaciones, ha de llevarse a cabo la homogeneización de las series temporales. Esto permite la generación de registros continuos y la mejora de datos incompletos de las estaciones mediante funciones de correlación espacial, utilizando para ello estaciones vecinas, ya que pueden producirse espacios en blanco o saltos en los registros debido a los “fallos”, ya mencionados, en un observatorio determinado. Por tanto, para un correcto análisis de las tendencias de temperatura debería tenerse en cuenta la homogeneidad de las series de datos, así como la posible existencia de puntos de cambio. Sin embargo, esta práctica todavía no está lo suficientemente estandarizada, y es habitual encontrar trabajos en los que la homogeneización de las series no se ha llevado a cabo, por lo que las conclusiones o resultados de dichos estudios pueden no ser lo suficientemente precisos ni reales.

Una serie temporal se considera estacionaria si los datos no presentan tendencias, desplazamientos o saltos. En los análisis climáticos de tendencias, los supuestos de estacionalidad e invariabilidad se consideran inválidos debido a la variabilidad natural del sistema climático (Xu et al., 2003). La no detección de puntos de cambio antes del análisis de tendencias puede llegar a dar resultados engañosos ya que la información derivada del análisis de saltos no se tiene en cuenta en la tendencia de la temperatura (Villarini et al., 2009). Para obtener resultados más fiables y razonables, Li et al. (2014) recomiendan, previo al estudio de las tendencias, la realización inicial de la detección de puntos de cambio o desplazamientos. Sin la aparición de estos, no se podrá detectar una evidencia de aumento o disminución de las variables climáticas en ciertas partes de la serie. Además, el desconocimiento y debate sobre cuáles son los factores que modifican una tendencia, tanto creciente como decreciente, debe concretarse en cualquier análisis de tendencias.

Habitualmente, la homogeneización de las series se inicia con la comparación de los coeficientes de correlación de Pearson entre las series a homogeneizar, así como las distancias entre los puntos de muestreo. El estudio se puede completar mediante el análisis de medias y medianas, pues no puede haber diferencias significativas entre estos valores en las distintas



series. La comparación de medias se realiza, en series normales mediante pruebas paramétricas llamadas pruebas de comparaciones múltiples “post-hoc” (análisis estadísticos que tienen lugar tras la observación de los datos), como la prueba de Tukey (Tukey, 1953) para igualdad de varianzas, y la prueba de Games-Howell (Games y Howell, 1976) para varianzas desiguales. Ambas pruebas son similares, exceptuando que en la segunda no se asume homogeneidad de varianzas o tamaños de muestras iguales, por lo que esta se puede utilizar en casos en los que las suposiciones de Tukey no se cumplen (Ruxton y Beauchamp, 2008). La homogeneidad de varianzas se estudia mediante el test de Levene (Levene, 1960).

Cuando se dispone de tres o más muestras que no se distribuyen de forma normal se aplica la prueba de Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), test no paramétrico considerado equivalente a una prueba ANOVA con la condición de no normalidad. En este caso, un nivel de significancia menor a 0,05 indica que hay alguna mediana diferente.

Para saber cuál es la muestra con mediana diferente, estas se comparan por pares, mediante el Test U de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947) lo que equivale a la prueba t-Student, pero considerando siempre que no existe una distribución normal. Si el nivel de significancia es menor de 0,05 indica que sí existen diferencias significativas entre ambas muestras.

Para la detección de tendencias en los datos existen numerosas pruebas estadísticas. Las más utilizadas en estudios de variabilidad climática son la prueba de Mann-Kendall, (Mann 1945, Kendall 1975) junto con el estimador de pendiente de Sen (Sen, 1968).

El método no paramétrico de Mann-Kendall (MK) se ha aplicado en muchos estudios para determinar si existe tendencias monótonas en los datos hidrometeorológicos, como la temperatura, las precipitaciones y flujos de energía (Deka et al., 2013). Con MK se analiza la diferencia de los signos entre los puntos de datos anteriores y posteriores. Así, si existe una tendencia, los valores de los signos tenderán a aumentar o disminuir constantemente. Otra prueba similar a MK es la prueba no paramétrica de Spearman, que permite comprobar la ausencia de tendencias (Yue et al., 2002). Por tanto, ambos métodos consideran la posible o posibles estacionalidades de la serie de datos.

Finalmente, la magnitud verdadera en la pendiente de una tendencia existente se determina mediante un procedimiento simple no paramétrico conocido como la estimación de Theil-Sen. Este sistema permite estimar las tendencias significativas de los datos mediante el estudio del

valor de la pendiente, resultado de la línea de regresión (Tangang et al., 2007). Por lo tanto, este procedimiento estima la magnitud de la tendencia por unidad de tiempo, e informa de la pérdida o ganancia de temperatura o precipitación durante el periodo temporal escogido.

En la mayoría de los estudios se ha demostrado la existencia de una tendencia positiva de la temperatura máxima. Por ejemplo, a escala global de 0,011 °C/año (Easterling et al., 1997) para invierno y primavera, y de 0,005 °C/año en verano, durante el periodo 1950-1993. También a nivel más local, Brunet et al. (2007) analizó las tendencias en España observando una pendiente de 0,01 °C/año (periodo 1850-2005) y González-Hidalgo et al. (2016), una pendiente de Sen de 0 019 °C/año (periodo 1951-2010) y concluyendo que las tendencias de los últimos años son superiores a las de épocas anteriores.

Los debates sobre el cambio climático han generado mayor interés en la homogeneización de series. Estadísticamente, los saltos o puntos de cambio generan series no homogéneas, que pueden generar cierta desviación en la estimación de las tendencias climáticas. Todo esto puede conducir a análisis inexactos para la detección del cambio climático regional en algunas circunstancias (Menne et al., 2010). Por lo tanto, es necesario ajustar estas inhomogeneidades antes de analizar las tendencias, combinando diferentes pruebas estadísticas de homogeneización (Jones et al., 1986). Un ejemplo es el efecto isla de calor urbano local (UHI), el cual puede influir en una estación meteorológica “urbana” frente a una “rural”.

En resumen, los diferentes trabajos anteriores llegan a la conclusión de que, para el estudio estadísticamente correcto de los cambios del clima reales, y la obtención de resultados coherentes en cada estación, las series temporales han de homogeneizarse.

Para el análisis de homogeneidad de una serie climática, al igual que para el estudio de tendencias, existen numerosas pruebas estadísticas entre las que destacan, por su aplicabilidad a la meteorología, así como por su robustez estadística, el método de Easterling y Peterson (1995), que detecta múltiples espacios en la serie, la prueba de homogeneidad normal estándar, la regresión de dos fases, el análisis múltiple de series para la homogeneización (MASH) (Aguilar et al., 2003), así como los métodos clásicos de homogeneización SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) de Alexandersson (Alexandersson, 1986; González-Rouco, 2001) y la Prueba de Pettitt (Pettitt, 1979).

La Prueba de Homogeneidad Normal Estándar (SNHT) es capaz de detectar inhomogeneidades, localizando los puntos de ruptura más significativos mediante la comparación de las observaciones con un promedio. Por su parte, la prueba no paramétrica de Pettit, registra *outlier* o valores anómalos en la serie de tiempo analizada, siendo más sensible a estructuras no homogéneas en medio de la serie (Costa y Soares, 2009), y permite identificar el momento en que se produce un cambio.

Actualmente, existen diversos sistemas o paquetes de programación que se han desarrollado como herramienta para aplicar las numerosas pruebas estadísticas, junto con el objetivo de dinamizar las funciones de homogeneización, control de calidad y rellenado de datos en un conjunto de series climáticas. En esta línea, se conocen varios proyectos como “Acción COST ES0601”, llevado a cabo por la *European Science Foundation* (Venema et al., 2012); el proyecto MULTITEST, para series mensuales, cuyo objetivo era actualizar y mejorar los resultados de un ejercicio de comparación preliminar mediante el uso de valores mensuales de precipitación y temperatura, con el de paquetes de homogeneización sobre diversos problemas de heterogeneidad (Guijarro, 2011); y el proyecto europeo INDECIS, cuyo estudio se centra en las series temporales diarias. Otro paquete, utilizado por gran parte de la comunidad científica, es el *R Climatol* (herramienta empleada en este trabajo), desarrollado a través del software *R studio*, y que contiene aquellas funciones necesarias para el correcto análisis de las series temporales. En este paquete se utiliza el lenguaje de programación *R*, y su principal funcionalidad consiste en rellenar los datos ausentes y rectificar los considerados anómalos, a partir de la división de los valores promedios de las variables de series vecinas, mediante el método de interpolación propuesto por Paulhus y Kohler (1952). Además, *Climatol* ofrece también hacerlo restando las medias o mediante una estandarización completa, generar diferentes series a partir de las originales y estudiar las diferencias y similitudes, gráfica y analíticamente (Guijarro, 2018).

Para acabar con la introducción, he de recalcar el impulso en la última década del análisis de las variables meteorológicas, sobre todo temperatura y precipitación, y la evaluación de las series climáticas, reafirmando así los trabajos científicos que apuntan a un cambio en clima del mundo, gradual y exponencial, con consecuencias como el aumento de las temperaturas medias y la reducción de la cantidad de precipitación, viéndose este cambio reforzado por las consecuencias generadas de la desenfrenada actividad antrópica. Además, mencionar

también que muchos investigadores se han comenzado a cuestionar la fiabilidad de los datos en las series, empezando a aplicar los reajustes ya comentados y, sobre todo, planteado la misión de generar series climáticas más fiables y acordes con la realidad. Así, estudios actuales, por ejemplo *“Spatio-temporal analysis of climatic variables in the western part of Bangladesh”* de Kamruzzaman et al. (2018), indican como la detección y análisis de las tendencias de las variables climáticas son esenciales para el desarrollo de la agricultura en un contexto de cambio climático. En este trabajo se detectaron tendencias empleando 12 estaciones meteorológicas, para el periodo 1962-2011, utilizando métodos como Mann-Kendall o Spearman. Los resultados concluyeron que no existían tendencias significativas para la precipitación en la mayor parte de la zona de estudio y, sin embargo, en el caso de la temperatura, las tendencias significativas se detectaron en más del 80% de las estaciones. Otro ejemplo, en este caso desarrollado en la Península Ibérica, es el de Gil-Guirado y Pérez-Morales, de 2019 y su trabajo *“Variabilidad climática y patrones termo-pluviométricos en Murcia”*, en el que define cómo la caracterización climática, a diferentes escalas, es fundamental para analizar la variabilidad de la serie. El análisis se realiza en el periodo entre 1863-2017, donde se utilizan herramientas para el completado de datos faltantes, detección de valores extremos y el posterior análisis estadístico de las tendencias y puntos de ruptura. En este estudio, al igual que en el anterior, las precipitaciones presentan un patrón cambiante menos definido, aunque la tendencia significativa a la disminución de estas se puede observar junto con la tendencia al aumento de la temperatura, lo que envuelve a Murcia en un nuevo clima según la clasificación climática de Köppen, donde antes presentaba un clima mediterráneo seco, y en la actualidad se puede considerar como mediterráneo semiárido, afirmando así el cambio en el clima mundial.

## 2. OBJETIVOS

Para el presente Trabajo de Fin de Grado se han establecido los siguientes objetivos principales:

- Seleccionar puntos de muestreo con series de datos adecuadas.
- Generar series de datos homogeneizadas y depuradas para el periodo 2000-2019.
- Realizar un descriptivo estadístico de los datos analizados.
- Estudiar la evolución temporal de la temperatura máxima en los puntos seleccionados de la provincia de Alicante.
- Generar una metodología estándar de tratamiento de series climáticas para el análisis de tendencias en la temperatura.

## 3. MATERIALES, EMPLAZAMIENTOS Y MÉTODOS

En este apartado se abordan los lugares escogidos para el estudio de temperaturas y los procedimientos más destacados de la metodología llevada a cabo, a partir de paquetes o software como *R-Climatol*, *SPSS statistics* y *XLSTAT* de *Excel*, así como las principales pruebas estadísticas que se han realizado para las series climáticas.

### 3.1. Zona de estudio

La zona escogida para llevar a cabo el análisis de la temperatura en este Trabajo de Fin de Grado se sitúa en un área particular de la península, ubicada en la región sureste de España. Esta región engloba las provincias de Alicante, Murcia y Almería, y se caracteriza por la aridez, la sequía estival, la elevada evapotranspiración e insolación y la variabilidad de las precipitaciones, siendo esta última la característica más definitoria del clima de la región (Gil-Guirado, 2017).

Por otro lado, según la clasificación de Köppen, esta zona se registra dentro de Climas Secos (tipo B). Una descripción detallada de estos climas se puede encontrar en la obra "*Los climas secos de España según el sistema de Köppen*" (López Gómez, J. y López Gómez, A., 1987).

### 3.2. Origen de datos. Estaciones meteorológicas

Los datos utilizados para este trabajo proceden de la AEMET, cuya base de datos cuenta con el mayor registro de estaciones de la península y es la principal base de datos meteorológica de España, ofrecidos a través de sus recursos “Open data” de acceso público, donde se encuentran establecidas 290 estaciones con datos desde 1920 hasta la fecha. A partir de 2013 se registraron datos de más de 800 estaciones.

Los valores de temperatura máxima para el análisis se han obtenido de 7 estaciones de la zona sureste de la península, cuyas ubicaciones se encuentra entre las Provincias de Alicante y Murcia. Estas estaciones fueron seleccionadas en base a la integridad del conjunto de datos, así como por la proximidad relativa entre ellas.

En la tabla 2 se describen las estaciones meteorológicas seleccionadas inicialmente, junto con las coordenadas de longitud y latitud, y su elevación sobre el nivel del mar.

El periodo escogido abarca un total de 20 años completos, comenzando el 01/01/2000 y acabando el 31/12/2019, obteniendo así los datos de temperatura máxima para todos los días, exceptuando los valores en blanco, completados posteriormente mediante el proceso de homogeneización.

Estación meteorológica	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Descripción de la zona
<b>EEA Elche *</b>	38° 14' 53" N	0° 41' 52" O	62	Periurbana
<b>Aeropuerto Alicante *</b>	38° 16' 58" N	0° 34' 15" O	37	Periurbana
<b>Alicante</b>	38° 22' 21" N	0° 29' 39" O	81	Urbana
<b>EA Monforte del Cid *</b>	38° 23' 57" N	0° 43' 48" O	259	Rural
<b>Crevillente</b>	38° 14' 55" N	0° 48' 30" O	73	Rural
<b>Murcia</b>	38° 0' 7" N	1° 10' 15" O	61	Periurbana
<b>Alcantarilla (Base Aérea)</b>	37° 57' 28" N	1° 13' 43" O	75	Periurbana

*Tabla 2. Lista de las estaciones meteorológicas con sus respectivas coordenadas geográficas. Fuente: elaboración propia. (\*) Series elegidas para el análisis final.*

### 3.3. Análisis estadístico de series climáticas

El método estadístico es una parte más en el análisis de datos, y en virtud de este, existen numerosas pruebas o test estadísticos (ya comentados en la introducción) que se han utilizado en el presente trabajo.

Los procedimientos estadísticos se han realizado con el uso de las herramientas *R-Climatol*, *SPSS statistics* y *XLSTAT* de *Excel*, programas que cuentan con una carga de paquetes y funciones para la síntesis de los datos requeridos.

A continuación, se presentan las pruebas estadísticas llevadas a cabo para el análisis de la temperatura máxima de las series de datos.

#### 3.3.1. Prueba de Normalidad. Distribución de series

Para poder aplicar pruebas estadísticas paramétricas ha de cumplirse la normalidad, es decir, que los valores de las variables independientes sigan una distribución normal (o campana de Gauss).

Según el número de datos que contenga la muestra se pueden aplicar diferentes tipos de pruebas estadísticas. Puesto que en este estudio se analizan las temperaturas máximas diarias de un periodo de tiempo de 20 años ( $n \geq 30$ ), se empleará la *Prueba de Kolmogórov-Smirnov*, para el análisis de normalidad. En este test, las hipótesis son:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ) la población o muestra tendrá distribución normal.
- Hipótesis alternativa ( $H_a$  o  $H_1$ ). Se rechaza  $H_0$ . En este caso la distribución de la muestra será distinta a la normal.

Para aceptar la hipótesis nula ( $H_0$ ) el  $p$ -valor de cada serie ha de ser mayor a 0,05 ( $\alpha > 0,05$ ). En ese caso, se considera que la distribución de esa población es normal con un nivel de confianza del 95%.

#### 3.3.2. Prueba de Homocedasticidad. Homogeneidad de varianzas

En el análisis de las series paramétricas es conveniente estudiar la homogeneidad de las varianzas, es decir, que las varianzas de la variable dependiente que se comparan sean lo más parecidas posible. Este requisito se conoce como *homocedasticidad* y para su estudio se empleará, junto con el estudio gráfico de los datos, el *Test de Levene*.

A nivel gráfico, una primera aproximación que puede realizarse es la identificación de las barras de error, que representa la media con *Intervalo de Confianza* (IC) y, en función de la longitud de estas barras, permite estimar si tiene igualdad de varianzas. También existe el conocido diagrama de caja y bigotes, donde la longitud de las cajas tiene como límites el percentil 25 y el percentil 75, lo cual representa una estimación principal de la variabilidad de los datos. Si se observa que las barras (o cajas) son de misma longitud, puede suponerse que las varianzas, de cada serie, no serán distintas o bien, serán muy parecidas.

Para asegurar la primera estimación de la homogeneidad de varianzas entre dos o más grupos de datos, se lleva a cabo el test de Levene mediante la comparación de medias con ANOVA (Análisis de Varianzas) de un factor. De nuevo se plantean dos hipótesis:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): Las varianzas de las series no son diferentes, es decir son homogéneas.
- Hipótesis alternativa ( $H_a$  o  $H_1$ ): Las varianzas de las series son diferentes.

Para aceptar la hipótesis nula ( $H_0$ ) el  $p$ -valor de cada serie ha de ser mayor a 0,05 ( $\alpha > 0,05$ ), en ese caso sabremos que existe homogeneidad de varianzas.

De la misma manera, para comparar dos series de datos diferentes, se aplica *T-Student de muestras independientes* que sirve tanto para varianzas iguales o no iguales.

En el caso de ANOVA de un factor también se han empleado, asumiendo varianzas iguales o desiguales, las *Pruebas de Tukey* y de *Games-Howell (GH)* (comparaciones múltiples *post hoc*). La prueba no paramétrica GH se utiliza para comparar medias de dos series distintas cuando las varianzas no son iguales. Si las varianzas resultan homogéneas se utiliza la prueba de Tukey.

### 3.3.3. Prueba de Kruskal-Wallis y Test U de Mann-Whitney. Distribución no normal

Cuando se dispone de tres o más muestras que no se distribuyen de forma normal se aplica la *Prueba de Kruskal-Wallis*, test no paramétrico considerado equivalente a una prueba ANOVA con la condición de no normalidad. En este caso, un nivel de significancia menor a 0,05 indica que hay alguna mediana diferente.

Para saber cuál es la muestra con mediana diferente, estas se comparan por pares, mediante el *Test U de Mann-Whitney*, lo que equivale a la prueba T-Student, pero considerando siempre que no existe una distribución normal. Si el nivel de significancia es menor de 0,05 indica que sí existen diferencias significativas entre ambas muestras.



### 3.3.4. Teorema Central del Límite

El *Teorema Central del Límite* o *Teorema del Límite Central* establece que, para una muestra grande ( $n \geq 30$ ), cualquier serie de datos garantiza una distribución aproximadamente normal.

El enunciado del Teorema es el siguiente: Sea  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un conjunto de variables aleatorias, independientes e idénticamente distribuidas de una distribución con media  $\mu$  y varianza  $\sigma^2 \neq 0$ . Entonces, si  $n$  es lo suficientemente grande, la variable aleatoria  $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$  tiene, aproximadamente, una distribución normal con  $\mu_{\bar{X}} = \mu$  y  $\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma^2/n$ .

Puesto que en este estudio se dispone de distintas series, con variables para un periodo de 2000-2019, se aproximará que la distribución en todas las series climáticas será normal o cercana a una distribución normal.

### 3.3.5. Estudio de las correlaciones

El estudio de la dependencia lineal se hará mediante el *Coefficiente de Correlación de Pearson*.

## 3.4. Procedimientos de Homogeneización

### 3.4.1. Climatol

Una vez elegidas las series de datos finales, la siguiente actuación es la detección de lagunas/huecos o saltos en las series climáticas mediante diferentes métodos. Además, se ha desarrollado el procedimiento de homogeneización en el que se eliminan o reducen las alteraciones en las series climáticas producidas por factores externos.

Dicho procedimiento consiste en la comparación de las series climáticas del estudio, seleccionadas anteriormente por su proximidad, alta correlación y comparación de medias y medianas. La homogeneización se lleva a cabo mediante el paquete *R-Climatol* ya que contienen las herramientas necesarias y permite efectuar el control de calidad de los datos, así como completar los datos faltantes de las series.

El principal problema de esta metodología es que no se conocen las medias y desviaciones típicas si las series no están completas (que es lo más habitual). Por ello, *Climatol* realiza un primer cálculo de estas medias y desviaciones, y completa las lagunas mediante los datos disponibles de cada serie a partir de esos valores provisionales, que vuelven a calcularse a partir de las series ya completadas. Seguidamente, vuelve a calcular los valores anteriores

ausentes con los nuevos parámetros, y a generar nuevas medias y desviaciones típicas. Este proceso se repite hasta que ninguna media cambie, por lo que se generarán numerosas series donde, finalmente, tras la repetición se obtendrán las series finales lo más homogéneas posibles. Las series originadas a partir de las demás se usan como referencia para las correspondientes series observadas, de manera que el siguiente paso es determinar las anomalías mediante la resta de valores estimados frente a los observados. De esta forma, las series de anomalías nos permitirán:

- El control de calidad de las series
- La eliminación de anomalías que superen el umbral de desviación estándar previamente indicado (*dz.max*)
- La aplicación del *Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)*

Para el empleo de datos diarios es necesario reajustar los parámetros del *Climatol*. Algunos de estos parámetros son:

- “**std**”: Tipo de normalización llevado a cabo.
  - *std 1*, desviaciones de la media.
  - *std 2*, normalización por proporción respecto a la media.
  - *std 3*, estandarización (restar la media y dividir por la desviación estándar de la muestra).
- “**swa**”: Tamaño del paso adelante que se aplicará a la ventana escalonada en la aplicación de SNHT. El valor predeterminado es 365 términos (un año) para los datos diarios.
- “**dz.max**”: Umbral de tolerancia de valores atípicos, en desviaciones estándar (5 por defecto).
- “**wd**”: indica el mayor o menor peso que se otorga a las estaciones vecinas, es decir la ponderación de estaciones vecinas. (El valor predeterminado es de (0,0,100), lo que significa que no se aplica ponderación en las dos primeras etapas y 100 km en la tercera).
- “**snht1**”: Valor de umbral para la prueba de ventana SNHT escalonada aplicada en la etapa 1 (25 por defecto).
- “**snht2**”: Valor de umbral para la prueba SNHT cuando se aplica a la serie completa en etapa 2 (el mismo valor que *snht1* por defecto).

Debido a que el presente estudio se basa en datos diarios y estos muestran una alta variabilidad que disminuye la eficiencia de la detección de inhomogeneidades, primero se aplica el estudio de la normalización para las series mensuales. De esta forma, *Climatol* detecta cortes en las series mensuales y, a partir de los mismos, lleva a cabo la homogeneización de las series diarias.

#### 3.4.2. Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)

Para los valores aleatorios de las series temporales es necesaria la implantación de la *Prueba de Alexandersson*, también conocida como prueba *SNHT*. Este riguroso análisis se aplica para detectar puntos de ruptura en una serie y considera una serie como homogénea en el caso de si los cocientes entre los observatorios forman series de datos aleatorios o de gran incertidumbre. Según Alexandersson (1986) “para detectar no homogeneidades relativas, se usan ratios en el caso de las precipitaciones, o diferencias en el caso de las temperaturas”.

Para que el procedimiento sea lo más exacto posible, se aplica una primera vez sobre ventanas temporales y una segunda a las series completas. Finalmente, se aplica una tercera vez dedicada a rellenar las lagunas o saltos de las series y subseries homogéneas.

#### 3.5. Procedimiento de Análisis de tendencias

Para el análisis de la tendencia en la temperatura máxima se ha utilizado la herramienta *XLSTAT* de *Excel* con la que, una vez elegidas y homogeneizadas las series principales, se lleva a cabo el estudio de la tendencia de las series de temperatura máxima mensual y anual. Para conocer si existe tendencia en dichas series se llevan a cabo dos métodos estadísticos principales: el *Test de Mann-Kendall* (MK) y el cálculo de la *Pendiente de Sen*.

En base al nivel de significancia representa por el  $p$ -valor tras aplicar la prueba MK, se conoce si existe con gran probabilidad una tendencia (positiva o negativa) en los valores de la serie. El  $p$ -valor ha de ser menor a 0,05 (nivel de significancia) para poder afirmar que existe una tendencia estadísticamente significativa.

Para conocer si la tendencia es positiva o negativa aplicaremos la *Prueba de la Pendiente Sen*. Si su valor es positivo, la tendencia será a incrementar la magnitud de medida, por tanto, indicará una tendencia al aumento de la temperatura. En cambio, si su valor es negativo, indicará que la temperatura tiende a decrecer.

### 3.5.1. Mann-Kendall

Esta prueba permite determinar las posibles tendencias de la serie temporal en las máximas y mínimas mensuales e índices extremos. Es una prueba no paramétrica, lo que significa que no es necesaria una distribución normal y detecta la tendencia sin importar si es lineal o no lineal, aunque el registro no debe ser persistente (Campos-Aranda, 2015). Concretamente, para series temporales con 10 o más puntos se utiliza la *Prueba Z* (Kamruzzaman et al., 2018).

### 3.5.2. Test de Yue

La autocorrelación presente en algunas de estas series afecta los resultados de la prueba, causando problemas en la detección y evaluación del nivel de significación. La presencia de autocorrelación positiva tiende a aumentar la probabilidad de detección de tendencia cuando, en efecto, ésta no existe, mientras que la autocorrelación negativa tiende a disminuirla. Para solucionar este problema, Yue et al. (2002) crearon una técnica de pre-blanqueo (*trend-free prewhitening, TFPW*) que remueve la correlación serial sin alterar la tendencia presente en la serie. Este test se aplicará en combinación con Mann-Kendall en el software estadístico *XLSTAT*.

### 3.5.3. Pendiente de Sen

También se trata de un test no paramétrico, y se utiliza para conocer o interpretar la verdadera pendiente de una línea de regresión y se basa en una estimación de mínimos cuadrados. Se estudia la pendiente de una tendencia, como cambio por unidad de tiempo, suponiendo que esta es lineal. Este test se aplicará en combinación con Mann-Kendall en el software estadístico *XLSTAT*.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Elección de las series de datos. Comparación entre estaciones

Tras la recopilación de los datos diarios en el periodo 2000-2019 de las series temporales en sus respectivas ubicaciones (Tabla 3), se ha llevado a cabo la elección de las series de datos principales en base a la similitud entre los valores de los parámetros y las condiciones climáticas de cada una de las estaciones meteorológicas elegidas de la red termopluviométrica de la AEMET.

Resumen de datos de las estaciones				
Estaciones	Válido		Perdidos	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Elche	7198	98,5%	107	1,5%
Crevillente	7282	99,7%	23	0,3%
Monforte	7192	98,5%	113	1,5%
Aeropuerto	7259	99,4%	46	0,6%
Alicante	7299	99,9%	6	0,1%
Murcia	7305	100,0%	0	0,0%
Alcantarilla	7305	100,0%	0	0,0%

Tabla 3. Relación de datos de temperatura máxima presentes en las diferentes estaciones meteorológicas. Fuente: SPSS statistics.

Como se ha comentado, esta elección se ha realizado con el diagnóstico previo en SPSS statistics y mediante el estudio de las correlaciones (Tabla 4), normalidad, la homogeneidad entre las varianzas y comparación de medias y medianas de temperatura máxima para encontrar series similares que definan una relación óptima de homogeneidad.

		Correlaciones						
		TmáxElche	TmáxMonforte	TmáxAeropuerto	TmáxCrevillente	TmáxMurcia	TmáxAlicante	TmáxAlcantarilla
TmáxElche	Correlación de Pearson	1	,974**	,981**	,981**	,966**	,971**	,962**
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	14396	7085	7152	7175	7198	7192	7198
TmáxMonforte	Correlación de Pearson	,974**	1	,975**	,988**	,982**	,977**	,980**
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,000	,000	,000
	N	7085	7192	7146	7169	7192	7186	7192
TmáxAeropuerto	Correlación de Pearson	,981**	,975**	1	,983**	,966**	,985**	,963**
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,000	,000	,000	,000
	N	7152	7146	7259	7237	7259	7253	7259
TmáxCrevillente	Correlación de Pearson	,981**	,988**	,983**	1	,983**	,983**	,980**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000		,000	,000	,000
	N	7175	7169	7237	7282	7282	7276	7282
TmáxMurcia	Correlación de Pearson	,966**	,982**	,966**	,983**	1	,963**	,996**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000		,000	,000
	N	7198	7192	7259	7282	7305	7299	7305
TmáxAlicante	Correlación de Pearson	,971**	,977**	,985**	,983**	,963**	1	,960**
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000		,000
	N	7192	7186	7253	7276	7299	7299	7299
TmáxAlcantarilla	Correlación de Pearson	,962**	,980**	,963**	,980**	,996**	,960**	1
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	7198	7192	7259	7282	7305	7299	7305

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Tabla 4. Correlaciones de Pearson entre los datos de temperatura máxima de las 7 estaciones. Se muestra la significancia bilateral y el número de datos (N). Fuente: SPSS statistics.

Tras aplicar el test de Kolmogórov-Smirnov (para muestras con  $n > 30$ ) se ha observado que ninguna de las estaciones representa una distribución normal significativa (Tabla 5), lo que

conduce a la aplicación de la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis para comparar las medianas de las series.

Pruebas de normalidad				
Estaciones		Kolmogórov-Smirnov <sup>a</sup>		
		Estadístico	gl	Sig.
T <sub>máx</sub>	Elche	0,060	7198	< 0,001
	Crevillente	0,060	7282	< 0,001
	Monforte	0,056	7192	< 0,001
	Aeropuerto	0,060	7259	< 0,001
	Alicante	0,065	7299	< 0,001
	Murcia	0,056	7305	< 0,001
	Alcantarilla	0,057	7305	< 0,001

a. Corrección de significación de Lilliefors

Tabla 5. Prueba de normalidad de Kolmogórov-Smirnov para las siete series de temperaturas máximas.  
Fuente: SPSS statistics.

Al estudiar la distribución de la temperatura en base a las medianas, mediante la prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes, el  $p$ -valor fue cero, lo que apunta a que existen diferencias entre las siete series analizadas. Por lo tanto, se realizó en análisis por parejas para muestras independientes (Tabla 6), en la que cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de dos estaciones son iguales.

De la tabla 6 se deduce que no se puede afirmar, con un nivel de significación del 0,05, que las medianas de las series de temperatura máxima en Monforte, Aeropuerto y Elche sean distintas. Esto plantea la posibilidad de escoger dichas estaciones como fuente de datos.

Por otra parte, haciendo uso del Teorema Central del Límite, puesto que la muestra es lo suficientemente grande (número de datos superior a 30), puede considerarse que las distribuciones de las medias muestrales seguirán aproximadamente una distribución normal, es decir, que la media muestral tendrá una función de distribución próxima a una normal. Por esta razón se ha decidido seguir analizando las muestras como normales y aplicar el test de Levene con ANOVA de un factor (Tabla 7).

Comparaciones por parejas de Estaciones					
Estación 1-Estación 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. Ajustada <sup>a</sup>
Monforte-Aeropuerto	-376,513	244,176	-1,542	0,123	1,000
Monforte-Elche	470,047	244,690	1,921	0,055	1,000
Monforte-Alicante	-1155,346	243,843	-4,738	0,000	0,000
Monforte-Crevillente	2899,268	243,984	11,883	0,000	0,000
Monforte-Alcantarilla	-4267,077	243,793	-17,503	0,000	0,000
Monforte-Murcia	-4822,168	243,793	-19,780	0,000	0,000
Aeropuerto-Elche	93,534	244,125	,383	0,702	1,000
Aeropuerto-Alicante	-778,833	243,275	-3,201	0,001	0,029
Aeropuerto-Crevillente	2522,755	243,417	10,364	0,000	0,000
Aeropuerto-Alcantarilla	-3890,564	243,226	-15,996	0,000	0,000
Aeropuerto-Murcia	-4445,655	243,226	-18,278	0,000	0,000
Elche-Alicante	-685,299	243,792	-2,811	0,005	0,104
Elche-Crevillente	-2429,221	243,933	-9,959	0,000	0,000
Elche-Alcantarilla	-3797,030	243,742	-15,578	0,000	0,000
Elche-Murcia	-4352,121	243,742	-17,855	0,000	0,000
Alicante-Crevillente	1743,922	243,083	7,174	0,000	0,000
Alicante-Alcantarilla	-3111,731	242,891	-12,811	0,000	0,000
Alicante-Murcia	-3666,822	242,891	-15,097	0,000	0,000
Crevillente-Alcantarilla	-1367,809	243,033	-5,628	0,000	0,000
Crevillente-Murcia	-1922,901	243,033	-7,912	0,000	0,000
Alcantarilla-Murcia	555,091	242,841	2,286	0,022	0,468

Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de 0,05.

a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

Tabla 6. Prueba por parejas para las siete estaciones meteorológicas. Fuente: SPSS statistics.

Prueba de homogeneidad de varianzas				
	Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
Se basa en la media	163,038	6	50833	< 0,001
Se basa en la mediana	162,426	6	50833	< 0,001
Se basa en la mediana y con gl ajustado	162,426	6	49446,712	< 0,001
Se basa en la media recortada	163,021	6	50833	< 0,001

Tabla 7. Prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas de las temperaturas máximas de las siete estaciones. Fuente: SPSS statistics.

Partiendo de un valor de significancia de 0,05, se acepta la hipótesis alternativa que indica que sí existen diferencias entre las varianzas. Por lo tanto, dada la no homogeneidad de varianzas se escoge, para comparar medias, el *Test de Games-Howell* (Tabla 8).

Comparaciones múltiples (Variable dependiente: T <sub>máx</sub> )						
(I) Estaciones	(J) Estaciones	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Elche	Crevillente	-1,12639*	,10501	,000	-1,4361	-,8167
	Monforte	,21697	,10772	,405	-,1007	,5346
	Aeropuerto	,00462	,10046	1,000	-,2916	,3009
	Alicante	-,32858*	,09952	,017	-,6221	-,0351
	Murcia	-2,11021*	,11077	,000	-2,4368	-1,7836
	Alcantarilla	-1,87472*	,11230	,000	-2,2059	-1,5436
Crevillente	Elche	1,12639*	,10501	,000	,8167	1,4361
	Monforte	1,34337*	,10872	,000	1,0228	1,6640
	Aeropuerto	1,13101*	,10154	,000	,8316	1,4304
	Alicante	,79781*	,10061	,000	,5011	1,0945
	Murcia	-,98382*	,11175	,000	-1,3133	-,6543
	Alcantarilla	-,74833*	,11326	,000	-1,0823	-,4144
Monforte	Elche	-,21697	,10772	,405	-,5346	,1007
	Crevillente	-1,34337*	,10872	,000	-1,6640	-1,0228
	Aeropuerto	-,21236	,10433	,392	-,5200	,0953
	Alicante	-,54556*	,10343	,000	-,8505	-,2406
	Murcia	-2,32719*	,11429	,000	-2,6642	-1,9902
	Alcantarilla	-2,09169*	,11577	,000	-2,4331	-1,7503
Aeropuerto	Elche	-,00462	,10046	1,000	-,3009	,2916
	Crevillente	-1,13101*	,10154	,000	-1,4304	-,8316
	Monforte	,21236	,10433	,392	-,0953	,5200
	Alicante	-,33320*	,09585	,009	-,6158	-,0506
	Murcia	-2,11483*	,10748	,000	-2,4318	-1,7979
	Alcantarilla	-1,87933*	,10905	,000	-2,2009	-1,5578
Alicante	Elche	,32858*	,09952	,017	,0351	,6221
	Crevillente	-,79781*	,10061	,000	-1,0945	-,5011
	Monforte	,54556*	,10343	,000	,2406	,8505
	Aeropuerto	,33320*	,09585	,009	,0506	,6158
	Murcia	-1,78163*	,10660	,000	-2,0960	-1,4673
	Alcantarilla	-1,54614*	,10819	,000	-1,8652	-1,2271
Murcia	Elche	2,11021*	,11077	,000	1,7836	2,4368
	Crevillente	,98382*	,11175	,000	,6543	1,3133
	Monforte	2,32719*	,11429	,000	1,9902	2,6642
	Aeropuerto	2,11483*	,10748	,000	1,7979	2,4318
	Alicante	1,78163*	,10660	,000	1,4673	2,0960
	Alcantarilla	,23550	,11862	,424	-,1143	,5853
Alcantarilla	Elche	1,87472*	,11230	,000	1,5436	2,2059
	Crevillente	,74833*	,11326	,000	,4144	1,0823
	Monforte	2,09169*	,11577	,000	1,7503	2,4331
	Aeropuerto	1,87933*	,10905	,000	1,5578	2,2009
	Alicante	1,54614*	,10819	,000	1,2271	1,8652
	Murcia	-,23550	,11862	,424	-,5853	,1143

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Tabla 8. *Test de Games-Howell para medias. Fuente: SPSS statistics.*



La *Prueba de Games-Howell* muestra que no se puede afirmar que las medias de las series de Monforte, Elche y Aeropuerto sean distintas con un valor de significancia de 0,05.

Debido a esto, las series escogidas para el análisis final han sido la **Estación Experimental Agraria de Elche** (EAA Elche), la **Estación del Aeropuerto de Alicante** y la **Estación Agroclimática de Monforte**.

Además de los criterios estadísticos, las tres estaciones climáticas cumplen el criterio de aproximación, con una distancia entre ellas menor a 20 km (Figura 1). Esta proximidad relativa, para un correcto análisis de las tendencias y la homogeneización de series climáticas, es un factor fundamental, pues las series han de representar la misma zona climática. La mayor distancia la podemos encontrar entre la estación situada en Monforte del Cid y en Aeropuerto de Alicante con aproximadamente 19 km. La menor la vemos entre la estación de Elche y el Aeropuerto con una distancia aproximada a los 12 km y, el último caso, entre la estación de Elche y la estación de Monforte existe una distancia de 17 km.

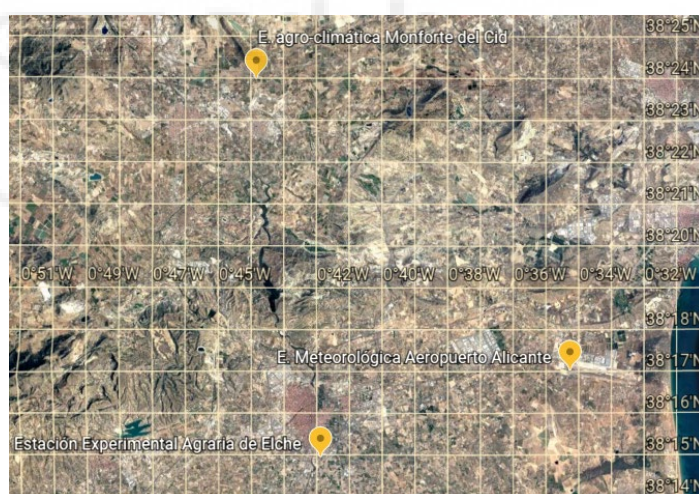


Figura 1. Ubicación de las series principales (\*) junto a la cuadrícula de coordenadas UTM, longitud y latitud.  
Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se muestra en la tabla 9 un resumen descriptivo de los datos de temperaturas máximas recogidas de las tres estaciones seleccionadas, previo a la homogeneización y rellenado de datos faltantes. Estos datos nos permitirán la comparación, no solo entre las series originales, sino también con las correspondientes series homogeneizadas. De ella se observa la similitud existente en las medias y medianas de las tres estaciones, así como la proximidad a la normalidad, pero también la aparición de valores anómalos en los extremos

de los rangos de temperatura ( $T_{\text{máx}}$  de 51,50°C en Elche), lo que implica la necesidad del proceso de homogeneización.

Descriptivos						
		Estaciones		Estadístico	Error estándar	
T máx.	Elche	Media		23,3168	,07352	
		95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	23,1727		
			Límite superior	23,4609		
		Mediana		23,3750		
		Varianza		38,909		
		Desviación estándar		6,23773		
		Mínimo		3,60		
		Máximo		51,50		
		Rango		47,90		
		Rango intercuartil		10,29		
		Asimetría		-,047	,029	
		Curtosis		-,750	,058	
		Monforte	Media		23,0998	,07873
			95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	22,9455	
	Límite superior			23,2542		
	Mediana		22,9100			
	Varianza		44,576			
	Desviación estándar		6,67652			
	Mínimo		3,89			
	Máximo		42,46			
	Rango		38,57			
	Rango intercuartil		11,15			
	Asimetría		,019	,029		
	Curtosis		-,916	,058		
	Aeropuerto		Media		23,3122	,06846
			95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	23,1780	
		Límite superior		23,4464		
		Mediana		23,2000		
		Varianza		34,024		
		Desviación estándar		5,83305		
Mínimo		5,60				
Máximo		41,20				
Rango		35,60				
Rango intercuartil		9,80				
Asimetría		-,001	,029			
Curtosis		-,905	,057			

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de las tres estaciones seleccionadas. Fuente: SPSS statistics.

## 4.2. Reconstrucción y homogeneización de las series

Una vez elegidas las estaciones meteorológicas para el análisis de las tendencias de las temperaturas máximas, se ha llevado a cabo la homogeneización de las series de datos, comenzando con la detección de saltos o valores extremos en las series, requisito fundamental para llevar a cabo la homogeneización, y el rellenado de los valores faltantes.

Con este fin, se ha empleado el paquete *R Climatol* empleando los datos obtenidos para la temperatura máxima de las tres estaciones que, tal y como se ha comentado previamente, presentan huecos por falta de datos de determinadas fechas durante el periodo escogido de 20 años.

Para comenzar el análisis de la homogeneización, el paquete *Climatol* aplica la prueba SNHT tres veces, sobre ventanas temporales, series completas y finalmente para el relleno de las anomalías o saltos. Conforme se avanza en la homogeneización, las series generadas se estudian mediante los gráficos producidos por el propio *Climatol*, lo que permite la modificación de los parámetros propios del análisis para la mejora de las series finales. El procedimiento llevado a cabo y sus resultados se expone a continuación.

En primer lugar, se realiza una reducción de datos, partiendo de los valores diarios, y calculando los valores mensuales, ya que los primeros tienen mayor variación. A partir de estos, *Climatol* genera una tabla de posibles saltos a homogeneizar, generando un archivo con los mismos, que utilizará posteriormente como punto de partida para el primer análisis con datos diarios.

A continuación, se realizó el estudio de homogeneización aplicando los parámetros por defecto del paquete *Climatol*, junto con el archivo de inhomogeneidades detectadas a nivel mensual. De esa forma, la normalización de las muestras se realiza mediante estandarización ("*std 3*"), con un umbral de detección y eliminación de anomalías de 5 veces la desviación estándar. Los primeros resultados generados por *Climatol* se muestran en un gráfico, el cual representa la disponibilidad de valores de temperatura máxima, por estaciones y globalmente, a lo largo del periodo 2000-2019 (Figura 2). Para la prueba SNHT se aplicó un valor umbral igual a 25 y se considera una distancia de 0 km para la ponderación de valores ("*wd*") tanto para la primera (ventanas escalonadas), como la segunda (series completas).

Para la tercera etapa, completado de los huecos, se considera por defecto, un valor de “*wd*” de 100 km.

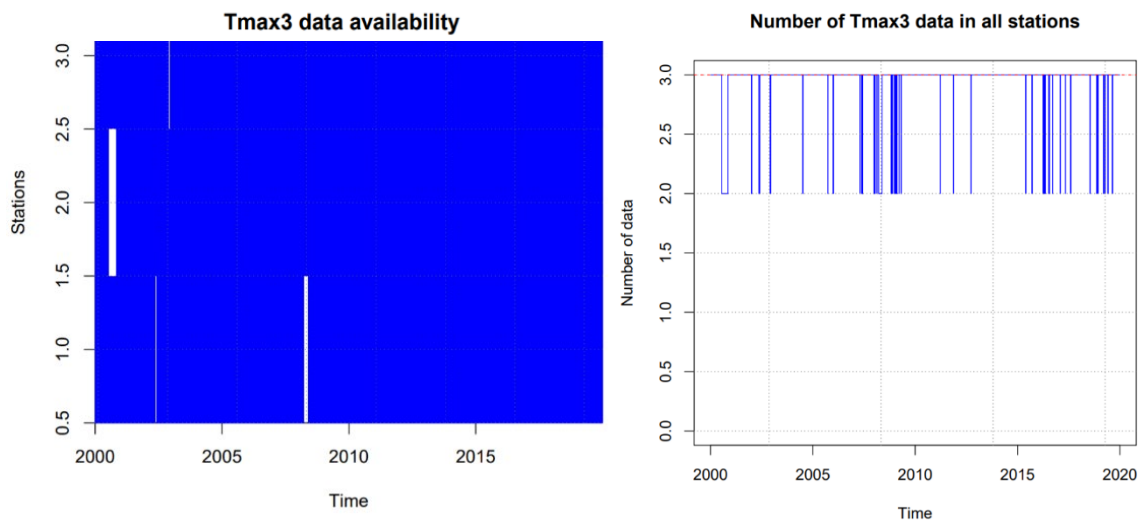


Figura 2. Datos de temperatura máxima disponibles en el periodo 2000-2019, por estación (izquierda) y globales (derecha). Fuente: R Climatol.

A partir de los valores y gráficos obtenidos de la primera ejecución del paquete *Climatol*, se realizó un segundo ensayo, modificando en este caso el tipo de normalización, “*std*”, que en este caso se llevó a cabo por proporción respecto a la media (“*std 2*”), agrupándose sensiblemente los resultados entorno a errores más bajos, pero observándose un histograma de anomalías normalizado y una distribución de anomalías para la series completas (Figura 3) mejorables según los procedimientos de homogeneización del propio programa (Guijarro, 2018). Los histogramas de SNHT, ya sea en ventanas o en las series completas, indican los umbrales de detección de cambios en el promedio de las series.

Para finalizar, y basándonos en dicho procedimiento, se realizó un tercer análisis de homogeneización con parámetros seleccionados en referencia a los resultados de análisis anterior. De nuevo, se realizó empleó la normalización en base a la proporción en la media (“*std 2*”), se escogió como valor umbral para la eliminación de anomalías (“*dz.max*”) valor 6 para ampliar el rango de valores a considerar, y diferentes valores umbrales de SNHT para las etapas del proceso. Sobre las ventanas temporales se considera un valor SNHT igual a 20 y para las series completas un SNHT igual a 55. Con estos nuevos parámetros, se obtuvieron las gráficas que se muestran en la figura 4.

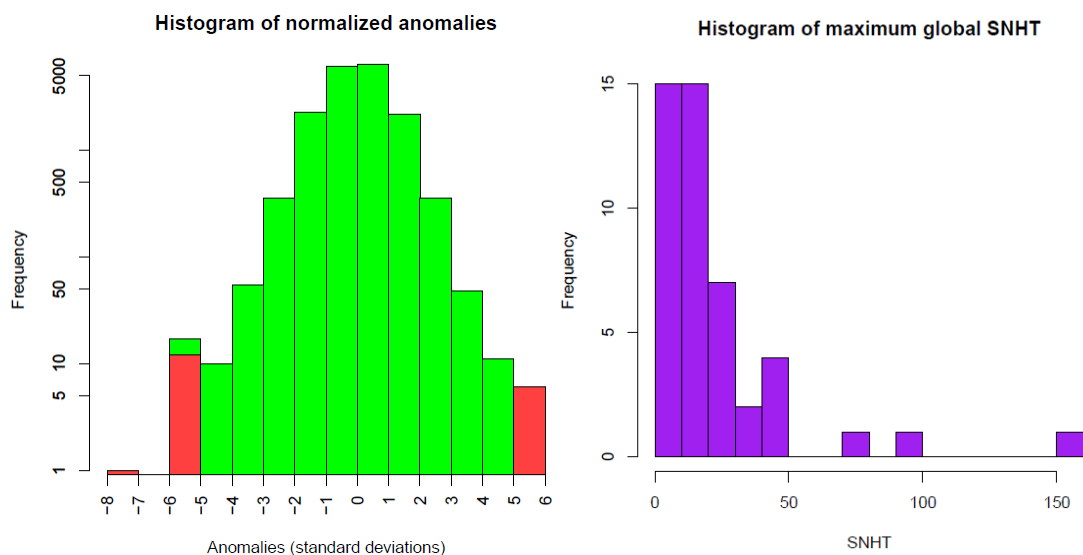


Figura 3. Histograma del conjunto de anomalías (izquierda) y de máximos globales SNHT para las series completas (derecha). Fuente: R Climatol.

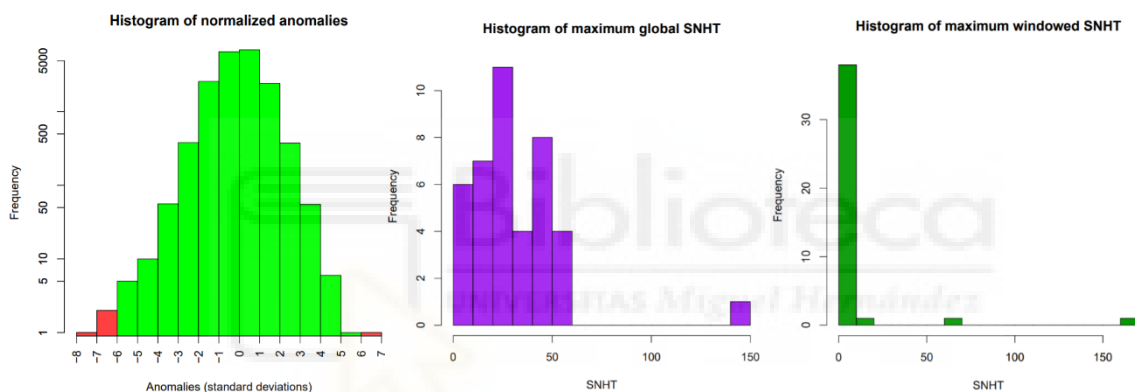


Figura 4. Histogramas anomalías normalizadas del conjunto de valores (izquierda), de máximos de SNHT encontrados en ventanas escalonadas (centro) y en series completas (derecha). Fuente: R Climatol.

Con el estudio de homogeneización mediante el paquete *Climatol*, se obtienen numerosas series finales de las diferentes estaciones, creadas a partir de las series de referencia principales. Entre ellas se han seleccionado 3 series nuevas, ya homogeneizadas, en base al gráfico de calidad/singularidad de las series finales (Figura 5).

Este diagrama final muestra números para cada serie generada en el estudio de acuerdo con sus errores típicos finales (RMSE por sus siglas en inglés) y los valores de SNHT. Los RMSE se calculan a partir de la comparación de los valores estimados y observados en cada serie. Un valor alto de RMSE puede indicar una mala calidad, aunque también puede deberse a la influencia de un microclima generado el sitio de la estación. Las seleccionadas en base al gráfico SNHT/RMSE han sido la serie **nº5** de Elche, la serie **nº11** de Monforte del Cid y la serie **nº34** de Aeropuerto de Alicante.

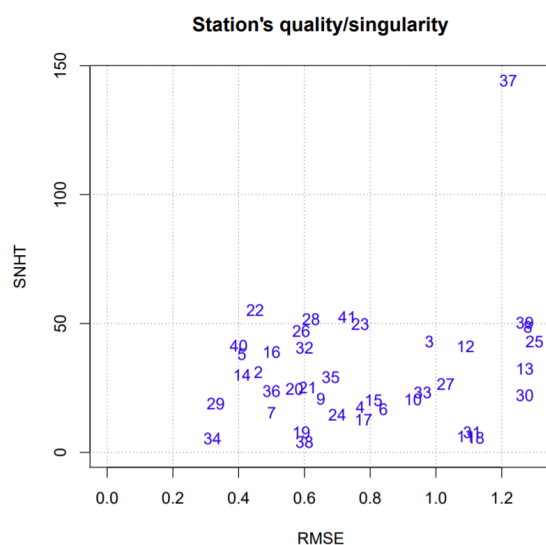


Figura 5. Gráfico de calidad/singularidad de las series finales (SNHT/RMSE). Fuente: R Climatol.

Por último, se muestran los gráficos donde se indican las reconstrucciones de series completas de los subperiodos homogéneos (Figura 6). La parte de arriba muestra las medias anuales móviles de las series reconstruidas, con los datos originales en negro, mientras que los trazos de colores representan los rellenados de las series resultantes. La parte de abajo muestra las correcciones realizadas en las series, también en diferentes colores.

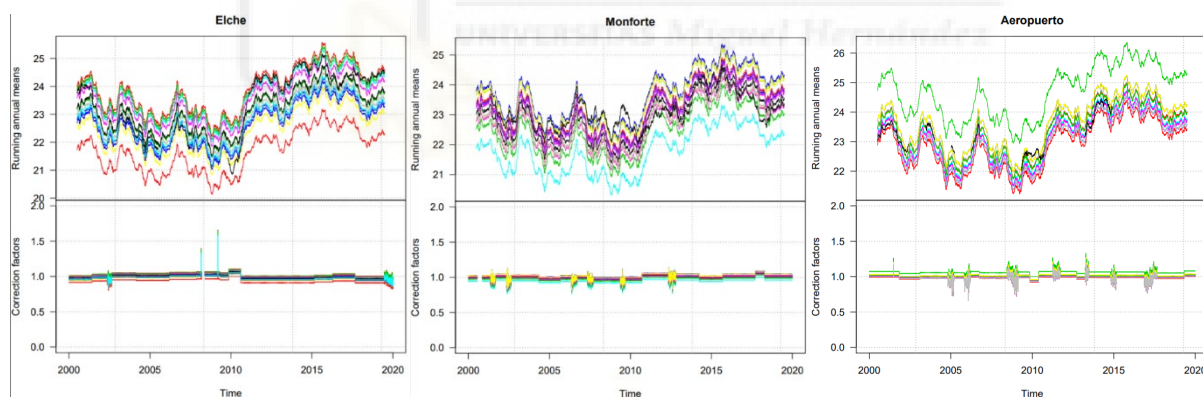


Figura 6. Gráfico de reconstrucción de series completas para subperiodos homogéneos. Fuente: R Climatol.

### 4.3. Descriptivos de las series resultantes homogeneizadas

Al igual que se realizó con las series originales, se han estudiado los estadísticos descriptivos clásicos para la comparación entre las nuevas series homogeneizadas de las tres estaciones seleccionadas. El resumen de los mismo se muestra en las tablas 10 y 11.

Resumen de datos de las estaciones				
Estaciones	Válido		Perdidos	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje
Aeropuerto	7305	100,0%	0	0,0%
Elche	7305	100,0%	0	0,0%
Monforte	7305	100,0%	0	0,0%

Tabla 10. Relación de datos de temperatura máxima homogeneizada en las diferentes estaciones meteorológicas. Fuente: SPSS statistics.

Tras la homogeneización y rellenado de huecos, todas las series contienen el mismo número de datos 7305, que corresponden a los días comprendidos entre el 01/01/2000 y el 31/12/2019, no existiendo ahora ya valores ausentes (Tabla 10).

Las nuevas series, como cabía de esperar, también tienen medias similares entre sí (Tabla 11 y Figura 7) con valores de 23,01, 23,11 y 23,20 °C para Aeropuerto, Elche y Monforte, respectivamente, y los valores extremos detectados en las series originales, que superaban anómalamente las temperaturas habituales, han sido corregidos, dando lugar a rangos de temperaturas similares en los tres puntos de muestreo (37,2, 38,0 y 38,2 °C para Aeropuerto, Elche y Monforte, respectivamente, frente a los 47,9, 38,6 y 35,6 °C, respectivamente, de las series originales).

Y, si bien el test de Kolmogórov-Smirnov sigue indicando la no normalidad de los datos, la prueba de Kruskal-Wallis (p-valor 0,181) mantiene que la distribución de medianas es la misma a un nivel de confianza del 95% para los datos homogeneizados de las tres estaciones.

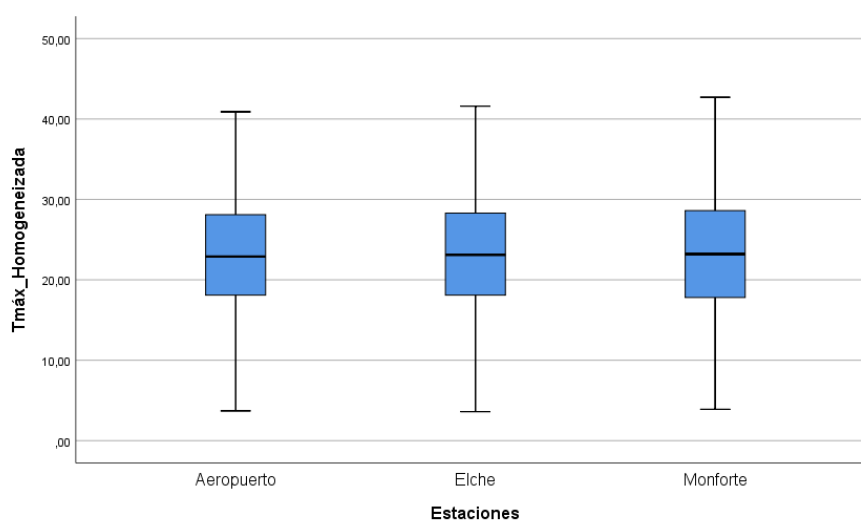


Figura 7. Diagrama de cajas de las series de temperaturas máximas homogeneizadas de las tres estaciones. Fuente: SPSS statistics.



Descriptivos. Tmáx Homogeneizada				
Estaciones		Estadístico	Error estándar	
Aeropuerto	Media		23,0143	0,07026
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	22,8766	
		Límite superior	23,1520	
	Mediana		22,9000	
	Varianza		36,060	
	Desviación estándar		6,00502	
	Mínimo		3,70	
	Máximo		40,90	
	Rango		37,20	
	Rango intercuartil		10,00	
	Asimetría		-0,008	0,029
	Curtosis		-0,876	0,057
	Elche	Media		23,1116
95% de intervalo de confianza para la media		Límite inferior	22,9713	
		Límite superior	23,2518	
Mediana		23,1000		
Varianza		37,391		
Desviación estándar		6,11481		
Mínimo		3,60		
Máximo		41,60		
Rango		38,00		
Rango intercuartil		10,20		
Asimetría		-0,043	0,029	
Curtosis		-0,822	0,057	
Monforte		Media		23,2021
	95% de intervalo de confianza para la media	Límite inferior	23,0523	
		Límite superior	23,3520	
	Mediana		23,2000	
	Varianza		42,665	
	Desviación estándar		6,53185	
	Mínimo		3,90	
	Máximo		42,70	
	Rango		38,80	
	Rango intercuartil		10,85	
	Asimetría		-0,029	0,029
	Curtosis		-0,863	0,057

Tabla 11. Estadísticos descriptivos de las tres series homogeneizadas. Fuente: SPSS statistics.



Nuevamente, como sucedía con las series originales, el test ANOVA de Levene indicó una diferencia entre las varianzas, mientras que la prueba de Games-Howell (Tabla 12) apunta a una igualdad entre las medias de las diferentes series entre sí.

Comparaciones múltiples (Variable dependiente: T <sub>máx</sub> Homogeneizada)						
(I) Estaciones	(J) Estaciones	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Aeropuerto	Elche	-0,09723	0,10027	0,596	-0,3323	0,1378
	Monforte	-0,18783	0,10381	0,167	-0,4312	0,0555
Elche	Aeropuerto	0,09723	0,10027	0,596	-0,1378	0,3323
	Monforte	-0,09060	0,10469	0,662	-0,3360	0,1548
Monforte	Aeropuerto	0,18783	0,10381	0,167	-0,0555	0,4312
	Elche	0,09060	0,10469	0,662	-0,1548	0,3360

Tabla 12. Test de Games-Howell para medias de las series homogeneizadas. Fuente: SPSS statistics.

Para profundizar en el estudio de los valores de las series de temperatura máxima, se ha llevado a cabo el estadístico descriptivo anual y mensual de cada una de las tres series homogeneizadas. La figura 8 muestra el estadístico descriptivo anual para la estación de Elche, donde se representan los valores medios, máximos y mínimos de la temperatura máxima diaria para cada año, además de la desviación típica de los datos.

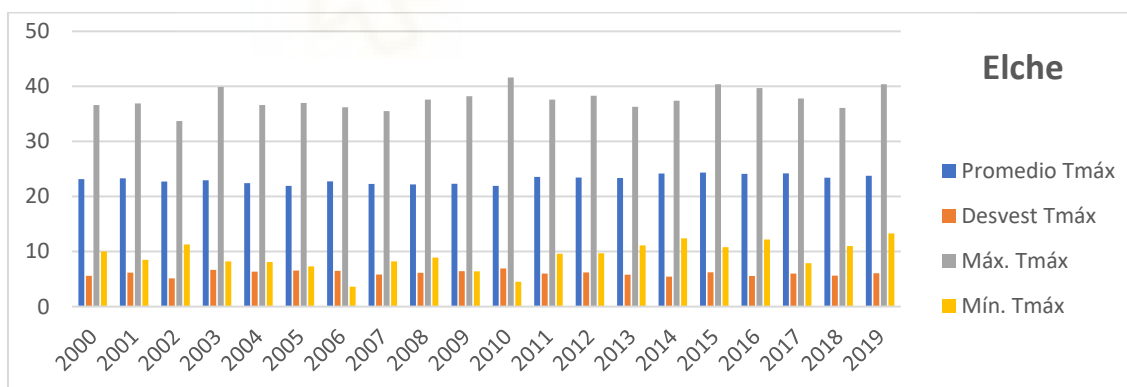


Figura 8. Estadístico descriptivo anual de la temperatura máxima diaria en la Estación Experimental Agraria de Elche. Fuente: elaboración propia.

En la figura 8 se observa que el año en el que se alcanzó la mayor temperatura fue 2010, con valor de 41,6 °C. A su vez, 2010 fue el año que más variabilidad representa respecto a la media, ya que existe un amplio rango entre la temperatura máximas mínima (4,5 °C) y la máxima absoluta (41,6 °C), por lo que, a pesar de ser el año con la máxima más alta, representa la media de temperatura máxima más baja (21,9 °C), junto con 2005. Por su parte, 2015 fue el

año con mayor media de la temperatura máxima (24,3°C), con una temperatura máximas de 40,4 °C. A modo de resumen, cabe comentar que el 95% de los años entre 2000 y 2019 presentaron máximas por encima de los 35 °C, a excepción de 2002 en el que se no se superaron los 33,7 °C.

En el caso de la estación de Aeropuerto de Alicante (Figura 9) el año del periodo 2000-2019 en el que se alcanzó la máxima temperatura (41,2 °C) fue 2015. Sin embargo, a diferencia de lo observado en Elche, este año no representa el periodo con mayor media de temperaturas máximas (24,3 °C para 2015), sino que, en esta ubicación, lo fue el año 2017 (24,6 °C). Valores muy próximos a 2015 se observan para los años 2003 y 2016, con máximas de temperatura máxima de 39,1 y 39,8 °C, respectivamente. Este último representa el año con la segunda media más alta de las temperaturas máximas anuales, con un valor de 24,5 °C.

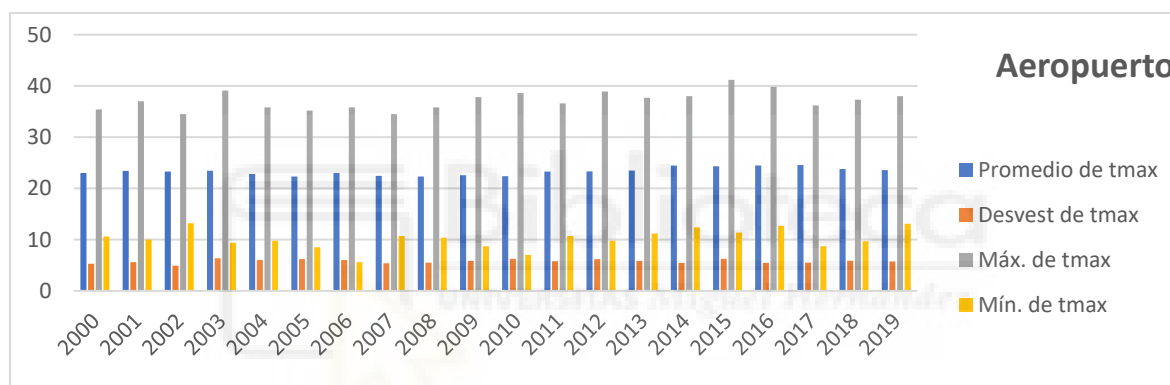


Figura 9. Estadístico descriptivo anual de la temperatura máxima diaria en la Estación de Aeropuerto Alicante. Fuente: elaboración propia.

Por último, la figura 10 corresponde a Monforte del Cid. En esta estación, el año con el día más caluroso fue 2019, con una temperatura máxima igual a 42,7 °C, y una temperatura máxima media de 23,8 °C. El año con mayor temperatura máxima media (24,4 °C) fue nuevamente 2015, al igual que se observó en la estación de Elche, seguido por 2017 (24,3 °C), que lo fue en el Aeropuerto.

Respecto al estadístico descriptivo mensual (Figura 11), agosto fue el mes más caluroso, tanto en Elche como en Monforte, alcanzándose valores máximos de temperatura iguales a 41,6 y 42,7 °C, respectivamente. En el caso de Alicante, la máxima se observó en el mes de julio, con un valor de 41,2 °C. Septiembre, tanto en Alicante como en Monforte, con valores de 39,8 y 42,3 °C respectivamente, fue el segundo mes con mayores máximas de temperatura. En el caso de Elche, el segundo mes más cálido fue julio con un valor de 40,4°C.

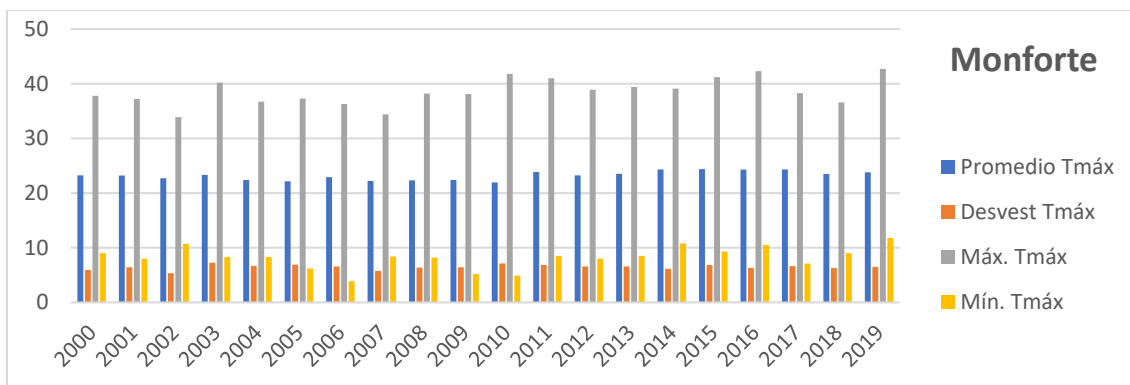


Figura 10. Estadístico descriptivo anual de la temperatura máxima diaria en la Estación Agroclimática de Monforte del Cid. Fuente: elaboración propia.



Figura 11. Estadístico descriptivo mensual de la temperatura máxima diaria para cada estación. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la media de la temperatura máxima mensual, puede observarse la aparición de una clara variabilidad estacional, siendo los meses con mayor media los de verano (junio, julio, agosto y septiembre), con agosto como el mes más caluroso, y los de menor media los

correspondientes al invierno (noviembre, diciembre, enero y febrero), tal y como era de esperar en la zona mediterránea.

La temperatura máxima más baja, en todas las estaciones coincide con el mes de enero, con mínimas de 3,6 °C para la estación de Elche, 5,6 °C en el Aeropuerto de Alicante y 3,9 °C en Monforte del Cid.

#### 4.4. Estudio de tendencias de la temperatura máxima

Analizar la tendencia de las variables climatológicas, en este caso la temperatura máxima, nos permite estudiar si sus valores han ido aumentando, disminuyendo o se han mantenido en el tiempo, y tratar de predecir el comportamiento futuro de la misma. En el presente trabajo, el estudio de tendencia se ha realizado a nivel anual y mensual, en las tres estaciones seleccionadas, atendiendo a la variación de los valores máximos, mínimos, medios y rangos de la temperatura máxima.

Para comenzar, se calcularon y/o extrajeron los promedios de los datos diarios, sus valores máximos, mínimos, medios y los rangos anuales, y se analizó la tendencia con el test de MK unido al test de Yue para corregir las posibles autocorrelaciones junto a la estimación de la pendiente de Sen de dichos valores durante el periodo 2000-2019 (Tabla 13 y Figura 12).

En la tabla 13 puede observarse que, para el caso de las temperaturas máximas, durante el periodo 2000-2019 se produjo una tendencia positiva significativa ( $p$ -valor < 0,05) en las tres estaciones de muestreo, con valores comprendidos entre 0,14 y 0,23 °C/año. Dado que los límites superiores e inferiores (al 95%) de cualquier localización engloban a los valores de las pendientes anteriores, no se puede afirmar que exista una diferencia significativa entre los tres puntos de muestreo, por lo que se concluye que, en todos ellos, se aprecia un aumento de la temperatura máxima similar durante el periodo estudiado. Estos resultados coinciden con las tendencias estudiadas por Brunet et al. (2007) y por González-Hidalgo et al. (2016). En este caso, los valores de la pendiente son algo superiores a los anteriores (0,185 °C/año de media en las tres estaciones entre 2000-2019, respecto a 0,01 y 0,019 °C/año para los periodos 1850-2005 y 1951-2010, respectivamente), lo que se podría justificar por la zona particular del estudio, ya que en este trabajo solo se tiene en cuenta una zona con clima mediterráneo, frente a los trabajos previos que engloban todo el país, el aumento progresivo de la

industrialización a nivel mundial, y una tendencia al aumento gradual de la temperatura con el paso de los años.

		Aeropuerto	Elche	Monforte
<b>Máxima</b>	Pendiente Sen	0,185	0,142	0,228
	valor-p (bilateral)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
	Límite inferior (95%)	0,050	-0,015	0,050
	Límite superior (95%)	0,333	0,271	0,409
<b>Mínima</b>	Pendiente Sen	0,083	0,200	0,066
	valor-p (bilateral)	0,062	0,005	0,043
	Límite inferior (95%)	-0,133	-0,019	-0,050
	Límite superior (95%)	0,242	0,367	0,238
<b>Promedio</b>	Pendiente Sen	0,070	0,075	0,070
	valor-p (bilateral)	0,005	0,004	0,005
	Límite inferior (95%)	0,009	0,008	0,015
	Límite superior (95%)	0,136	0,132	0,131
<b>Rango</b>	Pendiente Sen	0,093	-0,072	0,088
	valor-p (bilateral)	0,191	0,415	0,193
	Límite inferior (95%)	-0,179	-0,288	-0,111
	Límite superior (95%)	0,346	0,175	0,283

Tabla 13. Valores de la pendiente de Sen para las temperaturas máximas anuales. Fuente: XLSTAT (elaboración propia).

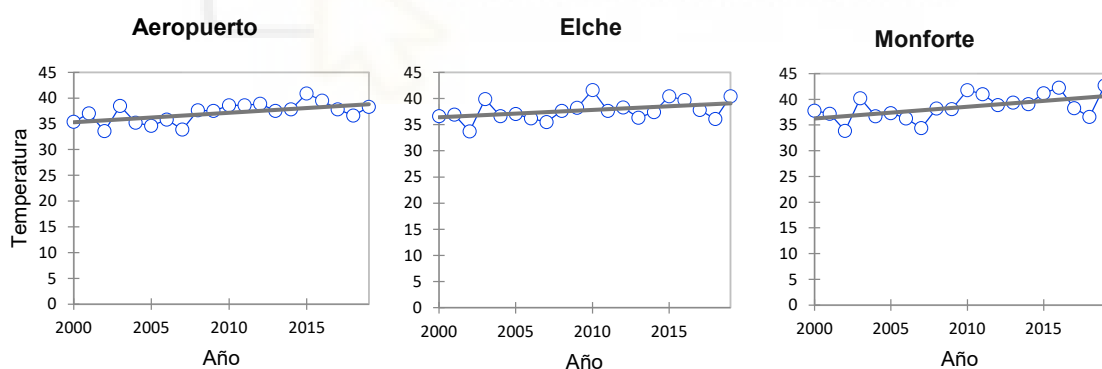


Figura 12. Representación de ejemplo del valor de la tendencia mediante el gráfico de Pendiente de Sen para las máximas de temperatura en cada estación climática. Fuente: XLSTAT.

En lo que respecta a las tendencias observadas para las mínimas de las temperaturas máximas, también parece observarse un ligero valor positivo en las tres estaciones (entre 0,07 y 0,08 °C/año), si bien para el Aeropuerto, el  $p$ -valor reduciría el intervalo de confianza a un 93%. Nuevamente los límites de confianza de la prueba apuntan a tendencias similares en las tres estaciones. De forma similar, se observan tendencias positivas en los promedios de las temperaturas máximas en todos los puntos, con valores de la pendiente de Sen de

0,07 °C/año, algo inferiores por tanto a los obtenidos para las temperaturas máximas, pero también estadísticamente significativas. Finalmente, el estudio de tendencias de los rangos de temperatura máxima produce  $p$ -valores muy superiores a 0,05, lo que desestima los resultados obtenidos para los valores de la pendiente de Sen.

Para análisis de las tendencias mensuales, de forma análoga a lo realizado para los valores anuales, se seleccionaron los valores máximos y mínimos de cada mes, y se calcularon los rangos y promedios mensuales del periodo 2000-2019 en las tres estaciones de medida.

A continuación, se aplicó nuevamente el test de MK junto al cálculo de la pendiente de Sen, con la corrección de Yue, obteniéndose los valores del estimador para cada mes, de cada año, en cada estación, lo que representa un conjunto de 36 valores para cada variable (máxima, mínima, media y rango). En la tabla 14 se muestran los estimadores de la pendiente de Sen para aquellos meses y localizaciones en los que el  $p$ -valor obtenido fue menor de 0,05 y, por tanto, se considera la tendencia positiva o negativa estadísticamente significativa con una confianza del 95%. Para mayor claridad, se han omitido los valores de los límites superior e inferior, pues nuevamente engloban a las pendientes de las estaciones vecinas.

	Aeropuerto				Elche				Monforte			
	Máx	Mín	Med	Rang	Máx	Mín	Med	Rang	Máx	Mín	Med	Rang
<b>Enero</b>	0,100	0,085	0,094			0,145	0,139			0,084	0,121	
<b>Febrero</b>												
<b>Marzo</b>						0,129		-0,183		0,090		
<b>Abril</b>	0,060							-0,118				
<b>Mayo</b>		0,119	0,089			0,173	0,068	-0,152		0,183	0,069	-0,134
<b>Junio</b>			0,071					-0,033			0,065	
<b>Julio</b>	0,154	0,131	0,161			0,146	0,137	-0,092	0,090	0,123	0,175	
<b>Agosto</b>	0,194	0,050	0,084	0,158	0,141	0,071	0,100	0,124	0,200		0,107	0,289
<b>Septiembre</b>	0,100		0,056	0,124			0,037	0,085	0,120		0,054	0,150
<b>Octubre</b>	0,132		0,079	0,176	0,125		0,101	0,100	0,183		0,087	0,178
<b>Noviembre</b>			0,074		0,065	0,094	0,110		0,101		0,099	
<b>Diciembre</b>		0,135	0,135		0,050	0,185	0,175	-0,135		0,152	0,143	
<b>Promedios</b>	0,123	0,104	0,094	0,153	0,095	0,135	0,108	-0,045	0,139	0,126	0,102	0,121

Tabla 14. Valores de la pendiente de Sen para las temperaturas máximas mensuales. Fuente: XLSTAT (elaboración propia).

Como puede apreciarse de la tabla 14, en los análisis mensuales se observan varias tendencias no significativas ( $p$ -valor > 0,05) tanto en las máximas, como en las mínimas y medias de las temperaturas máximas, siendo el mes de febrero el único que no mostró ninguna tendencia significativa en ninguna de las estaciones. Si se compara los promedios de los meses con

pendiente estadísticamente significativas, y los valores anuales, se observa una clara similitud, tal y como era de esperar.

En general, todas las tendencias significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) son positivas, es decir, apuntan a un aumento de la temperatura mensual, resultados similares a los observados para las tendencias anuales. Los rangos ahora resultan significativos para algunos meses con tendencias positivas y negativas. Los resultados para cada mes son indistinguibles para las tres estaciones debido a sus intervalos de confianza. Por tanto, existe convergencia (tendencia negativa) y divergencia (tendencia positiva), en algunos meses, entre las temperaturas máxima y mínima de las máximas. De esta forma, se observa que en el mes de mayo se produce una convergencia de las temperaturas máximas de las máximas y las mínimas de las máximas tanto en Elche como en Monforte, si bien en el Aeropuerto, el valor no fue significativo. Por otra parte, en los meses de agosto, septiembre y octubre, todas las estaciones presentaron valores de tendencia positiva, es decir, una divergencia en el rango de temperaturas estudiadas.

En el caso de las mínimas y medias de temperatura máxima, los meses de julio y diciembre presentan los valores más altos de incremento de temperatura con valores superiores a  $0,135$  °C/año para ambos meses en las tres estaciones. En el caso de las máximas, los datos más altos de tendencias positivas se dan en los meses agosto y octubre siendo superiores a  $0,132$  °C/año para las tres estaciones. La máxima pendiente con tendencia positiva se observa en el mes de agosto de la estación de Monforte, con un valor de  $0,20$  °C/año. Sin embargo, tal y como se comentó anteriormente, los intervalos de confianza de las medidas no permiten discriminar entre estaciones, por lo que se concluye que no existen diferencias significativas entre los puntos de muestreo, si bien en todos ellos se experimenta una tendencia al aumento de la temperatura máxima.

## 5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN

Se han alcanzado los objetivos propuestos en el presente Trabajo de Fin de Grado y se ha conseguido describir el comportamiento climático en un área próxima a la ciudad de Elche, mediante el estudio de la evolución de la temperatura máxima y el análisis de la tendencia. Por lo tanto, se enmarca en la línea de aportar información sobre las tendencias de temperatura a nivel regional y local.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha descrito una metodología para el análisis y homogeneización de series temporales, con un periodo de tiempo de hasta 20 años, así como para el análisis de tendencias de la temperatura. En esta metodología se presentan las diferentes herramientas utilizadas para el estudio y los procedimientos y pruebas estadísticas para el análisis, con el fin último de generar una metodología que pueda ser utilizada para estudios futuros en la evolución de la temperatura.

Se ha generado un conjunto de datos de temperatura máxima diaria, debidamente homogeneizados, para las tres estaciones de seleccionadas (Elche, Alicante y Monforte) para el periodo 2000-2019, completando los datos ausentes y corrigiendo los valores extremos o atípicos considerados anómalos.

Las tres series de temperatura escogidas tienen descriptivos muy similares, condición necesaria para que sean representativas de una misma zona climática.

El software *Climatol* se ha mostrado como una herramienta muy útil para homogeneizar series climáticas y es una herramienta novedosa en desarrollo y testeo, por lo que se debe profundizar en su manejo y opciones para optimizar su rendimiento.

Los valores anuales de la temperatura máxima (máxima, mínima y promedio) en las tres estaciones estudiadas confirman una tendencia creciente significativa al 95% similar, pues sus intervalos de confianza se solapan. Estos resultados coinciden con las tendencias estudiadas para España descritas previamente.

Este estudio apunta a una necesidad de estandarizar las metodologías de homogeneización de series, aumentar la densidad de estaciones meteorológicas, y continuar con la captación de datos y su posterior análisis.

Posibles continuaciones de este trabajo sería la ampliación de las variables estudiadas, incluyendo los valores de temperaturas mínimas, medidas diarias, radiación solar, humedad relativa y precipitaciones, lo que generaría una visión ampliada de la evolución del clima en la zona de estudio. De igual forma, se podría ampliar el área de muestreo incluyendo nuevas estaciones que cumplan con las condiciones establecidas en la metodología, dando así una idea menos local de la evolución climática.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Alexandersson H. (1986) A homogeneity test to precipitation data. *International Journal of Climatology*, 6, 661–675.
- Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T.C., Wieringa, J. (2003) *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization*. World Meteorological Organization.
- Atlas Climático Ibérico: Temperatura del aire y precipitación (1971-2000). Departamento de Producción de la Agencia Estatal de Meteorología de España y Departamento de Meteorología y Clima, Instituto de Meteorología de Portugal.
- Brunet, M., Saladié O., Jones P., Sigró J., Aguilar E., Moberg A., Lister D., Walther A., López D., Almarza C. (2006) The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series 1850–2003. *International Journal of Climatology*, 25, 1777–1802.
- Campos-Aranda, D.F. (2015) Búsqueda del cambio climático en la temperatura máxima de mayo en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 6, 143-160.
- Chen, D., Chen, H. W. (2013) Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901–2010. *Environmental Development*, 6, 69-79.
- Costa, A., Soares, A. (2009). Homogenization of Climate Data: Review and New Perspectives Using Geostatistics. *Mathematical Geosciences*, 41, 291-305.
- Deka, R.L., Mahanta, C., Pathak, H., Nath, K.K., Da, S. (2013) Trends and fluctuations of rainfall regime in the Brahmaputra and Barak basins of Assam, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, 61–71.
- Eischeid, J.K., Pasteris, P.A., Diaz, H.F., Plantico, M.S., Lott N.J. (2000) Creating a serially complete national daily time series of temperature and precipitation for the western United States. *Journal of Applied Meteorology*, 39, 1580–1591.
- Easterling, D.R., Peterson, T.C. (1995) A new method of detecting undocumented discontinuities in climatological time series. *International Journal of Climatology*, 15, 369–377.
- Easterling, D.R., Horton, B., Jones, P. D., Peterson, T. C., Karl, T. R., Parker, David, E., Salinger, M. J., Razuvayev, V., Neil P., Jamason, P., Folland, C. K. (1997) Maximum and Minimum Temperature Trends for the Globe. *Science*, 277, 364-367.
- El Kenawy, A., López-Moreno, J., Stepanek, P., Vicente-Serrano, S. (2013) An assessment of the role of homogenization protocols in the performance of daily temperature series and trends: Application to northeastern Spain. *International Journal of Climatology*, 33, 87-108.
- Games, P.A., Howell, J.F. (1976) Pairwise Multiple comparisons procedures with unequal n's and/or variances. *Journal of Educational Statistics*, 1, 113-125.
- Gil-Guirado, S. (2017) Deconstruyendo riesgos. Cuatro siglos de cambios en la vulnerabilidad y adaptación a las inundaciones y sequías en Murcia. *Revista de Historia Moderna, Universidad de Alicante*, 35, 308-344.
- Gil-Guirado, S., Pérez-Morales, A. (2019) Variabilidad climática y patrones termo-pluviométricos en Murcia (1863-2017). *Técnicas de análisis climático en un contexto de cambio global. Investigaciones Geográficas*, 71, 27-54.

- González-Hidalgo, J.C., Peña-Angulo, D, Salinas, C, Jiménez-Castañeda, A., Brunetti, M.; (2016), 'Variaciones recientes de las temperaturas en España: El efecto del periodo elegido en las tendencias de las series estacionales de promedios de máximas y mínimas', X Congreso Internacional AEC: Clima, sociedad, riesgos y ordenación del territorio. DOI: <http://dx.doi.org/10.14198/XCongresoAECAlicante2016-44>.
- Gonzalez-Rouco, J.F., Jimenez, J.L., Quesada, V., Valero, F. (2001) Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 14, 964-978.
- Guijarro, J.A. (2011) Influence of network density on homogenization performance. *Seventh Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*, 78, 11-18.
- Guijarro, J.A. (2018). Homogeneización de series climáticas con Climatol, Guía versión 3.1.1. Islas Baleares, España.
- IPCC (2013) *Climate change 2013: the physical science basis*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boshung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Jones, P., Wigley, T., Wright, P. (1986) Global temperature variations between 1861 and 1984. *Nature*, 322, 430-434.
- Kamruzzaman, M., Rahman, A.T.M.S., Ahmed, M.S., Ahmed, S., Kabir, E.E., Mazumder Q.H., Rahman, M.S., Jahan, C.S. (2018) Spatio-temporal analysis of climatic variables in the western part of Bangladesh. *Environment Development and Sustainability journal*, 20, 89-108.
- Karl, T.R., Easterling, D.R. (1999) Climate extremes: selected review and future research directions. *Weather and Climate Extremes*, 42, 309-325.
- Kendall, M.G. (1948). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin & Company, Londres.
- Köppen, W., Geiger, R. (1936) *Handbuch der Klimatologie. Das geographische System der Klimate*. Borntraeger Science Publishers, 1, 1-44.
- Kruskal, W.H., Wallis, W.A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583-621.
- Levene, H. (1960) Robust tests for equality of variances. Ed: Olkin, I. *Contributions to probability and statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling*. Stanford University Press, 278-292.
- Li, D., Xie, H., Xiong, L. (2014) Temporal change analysis based on data characteristics and nonparametric test. *Water Resour Manage*, 28, 227-240.
- López Gómez, J. y López Gómez, A. (1987) Los climas secos de España según el sistema de Köppen. *Papeles de Geografía (Física)*, 12, 5-10.
- Magaña, V. (2013) *Guía metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad ante cambio climático*. México: INE/PNUMA.
- Mann, H.B. (1945) Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 163-171.
- Mann, H.B., Whitney, D.R. (1947) On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 22, 125-128.

- Menne, M. J., Williams, C. N., Palecki, M. A. (2010) On the reliability of the U.S. surface temperature record. *Journal of Geophysical Research*, 115, 1-9.
- Paulhus, J.L.H., Kohler, M.A. (1952) Interpolation of missing precipitation records. *Monthly weather review*, 80, 129-133.
- Pettitt, A.N. (1979) A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, 126-135.
- Rahman, M. R., Lateh, H. (2016). Spatio-temporal analysis of warming in Bangladesh using recent observed temperature data and GIS. *Climate Dynamics*, 46, 2943-2960.
- Romero R., Guijarro J.A., Ramis C., Alonso S. (1998) A 30 year, 1964–1993, daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study. *International Journal of Climatology*, 18, 541-560.
- Ruxton, G.D., Beauchamp, G. (2008) Time for some a priori thinking about post hoc testing. *Behavioral Ecology*, 19, 690-693.
- Schär, C., Jendritzky, G. (2004) Hot news from summer 2003. *Nature*, 432, 559-560.
- Sen, P. K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (2007) *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ed: Cambridge University Press, New York.
- Tangang, F.T., Juneng, L., Ahmad, S. (2007) Trend and interannual variability of temperature in Malaysia: 1961–2002. *Theoretical and Applied Climatology*, 89, 127-141.
- Tukey, J.W. (1953) The Problem of Multiple Comparisons. En *The Collected Works of John W. Tukey VIII. Multiple Comparisons:1948-1983*, 1-300. Chapman and Hall, New York
- Venema, V.K.C., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I, Guijarro, J.A., Domonkos, P. et al. (2012) Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past*, 8, 89-115.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J., García-Vera, M., Stepanek, P. (2010) A complete daily precipitation database for North-East Spain: reconstruction, quality control and homogeneity. *International Journal of Climatology*, 30, 1146–1163.
- Villarini, G., Serinaldi, F., Smith, J.A., Krajewski, W.F. (2009) On the stationarity of annual flood peaks in the continental United States during the 20th century. *Water Resources Research*, 45, 1-17.
- Xu, Z.X., Takeuchi, K., Ishidaira, H. (2003) Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. *Journal Hydrology*, 279, 144–150.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002) The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16, 1807-1829.