



TENDENCIA DE LA TEMPERATURA REGIONAL EN EL SUROESTE DE EUROPA EN EL ÚLTIMO SIGLO (1903-2021)

Miguel Leandro Chacón Castiñeira

Trabajo entregado para la obtención del grado de Máster en
“Tecnología Ambiental”
Modalidad: “Investigación”

Septiembre / 2022

Directores:

José Antonio Adame Carnero
Isidoro Gutiérrez Álvarez

D. José Antonio Adame Carnero, DNI: 29043018K y cargo investigador y Coordinador de la Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo, del Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y **D. Isidoro Gutiérrez Álvarez**, DNI: 49083448E, investigador posdoctoral en el grupo LARUC de la Facultad de Medicina en la Universidad de Cantabria.

INFORMAN:

Que el trabajo titulado “**Tendencia de la temperatura regional en el suroeste de Europa en el último siglo (1903-2021)**” presentado por **D. Miguel Leandro Chacón Castiñeira, con Pasaporte: L350883**, ha sido realizado bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: Trabajo de Investigación), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad Internacional de Andalucía.

En Huelva, a 19 de septiembre de 2022

Fdo.: José Antonio Adame Carnero

Isidoro Gutiérrez Álvarez

RESUMEN

En la actualidad, la humanidad se enfrenta al reto de mitigar los efectos del cambio climático y pone a prueba su capacidad de adaptación al entorno que se ha formado producto del aumento desmedido de los gases de efecto invernadero provocado por la propia actividad humana. El calentamiento global constituye el principal efecto del cambio climático. La temperatura es la variable fundamental, utilizada para valorar el nivel de influencia del cambio climático en un territorio.

Es por ello que nuestro estudio se basa en el suroeste de la península ibérica con el objetivo de conocer la evolución y tendencia de las temperaturas en el último siglo. Para ello, se han utilizado las series históricas de observaciones experimentales de la estación meteorológica de la ciudad de Huelva del período 1903-2021 y el observatorio de El Arenosillo desde el 2000 al 2021, así como datos de reanálisis de ERA5-Land (ECMWF) del período 1950-2021.

La evolución mensual promedio de temperatura para la serie de AEMET de Huelva se comporta de forma habitual, presentando las menores temperaturas a inicios y finales de año con mínimas que rondan los 6 °C y máximas de 16 °C, siendo enero el mes más frío. A mediados de año se reportan los valores más elevados con máximas de 32 °C y mínimas de 18 °C, donde el mes de agosto resulta ser el más caluroso.

Los resultados de la comparación entre ambas estaciones para el período 2000-2021 muestran un coeficiente de correlación positivo de 0.977 y una diferencia de temperatura entre las estaciones de 1.0 ± 1.2 °C como promedio, con valores que oscilan entre 0 y 2.2 grados. Se obtiene que las temperaturas en Huelva resultan ser más elevadas que en El Arenosillo, asociado a la posición de la estación.

La colección de reanálisis ERA5-Land se comparó con las series experimentales para el período 2000-2021 donde el coeficiente de correlación fue de casi 0.99 para ambas. Por su parte, el cálculo de las diferencias de las temperaturas de las series de Huelva y El Arenosillo fue como promedio de 0.6 ± 1.0 °C y 1.1 ± 0.9 °C, respectivamente. Estos resultados indican que los datos de reanálisis de ERA5-Land están sobrestimando la temperatura, en media mensual, con una mayor diferencia en Huelva que en El Arenosillo.

En la investigación se obtuvo que la tendencia de las anomalías de las temperaturas medias para Huelva es de 0.11 ± 0.01 °C por década y para los datos de ERA5-Land es de 0.16 ± 0.02 °C por década con respecto a los períodos de referencia 1951-1980 y 1991-2020, resultando ser iguales para ambos.

Por su parte, en El Arenosillo la tendencia de las anomalías de las temperaturas medias es de 0.14 ± 0.02 °C/ década con respecto a los períodos de referencia 1951-1980 y 1991-2020, lo que indica que la temperatura media mensual está aumentando en ambos puntos de estudio.

ABSTRACT

Humanity is currently facing the challenge of mitigating the effects of climate change and is testing its capacity to adapt to the environment that has been created by the excessive increase in greenhouse gases caused by human activity. Global warming is the main effect of climate change. Temperature is the fundamental variable used to assess the level of influence of climate change on a territory.

That is why our study is based on the southwest of the Iberian Peninsula in order to know the evolution and trend of temperatures in the last century. For this purpose, we have used the historical series of experimental observations from meteorological station from the city of Huelva for the period 1903-2021 and the observatory of El Arenosillo from 2000 to 2021, as well as reanalysis data from ERA5-Land (ECMWF) for the period 1950-2021.

The average monthly temperature evolution for the AEMET series of Huelva behaves as usual, with the lowest temperatures at the beginning and end of the year, with minimum temperatures of around 6 °C and maximum temperatures of 16 °C, with January being the coldest month. In the middle of the year, the highest values are reported with maximums of 32 °C and minimums of 18 °C, with August being the hottest month.

The results of the comparison between both stations for the period 2000-2021 show a positive correlation coefficient of 0.977 and a temperature difference between the stations of 1.0 ± 1.2 °C on average, with values ranging between 0 and 2.2 degrees. It is obtained that temperatures in Huelva turn out to be higher than temperature evaluated in El Arenosillo, associated to the position of the station.

The ERA5-Land reanalysis collection was compared with the experimental series for the period 2000-2021 where the correlation coefficient was almost 0.99 for both. On the other hand, the results of the temperature differences of Huelva and El Arenosillo series averaged is 0.6 ± 1.0 °C and 1.1 ± 0.9 °C, respectively. These results indicate that the ERA5-Land reanalysis data are overestimating the temperature, in monthly mean, with the greatest differences between Huelva and El Arenosillo.

The research showed that the trend of the mean temperature anomalies for Huelva is 0.11 ± 0.01 °C per decade and for the ERA5-Land data it is 0.16 ± 0.02 °C per decade with respect to the reference periods 1951-1980 and 1991-2020, resulting to be the same for both.

On the other hand, in El Arenosillo the trend of the mean temperature anomalies is 0.14 ± 0.02 °C/decade with respect to the reference periods 1951-1980 and 1991-2020, which indicates that the mean monthly temperature is increasing in both studied places.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Niurka Castiñeira Morejón y Miguel A. Chacón Ramos, por su apoyo incondicional en cada uno de los momentos difíciles y su cariño constante a pesar de los miles de kilómetros que nos separan, los amo.

A mi familia, por siempre estar y ser el eslabón principal que me impulsa a seguir adelante cada día.

A mis directores de TFM, el Dr. José Antonio Adame Carnero por el aporte de sus conocimientos y la oportunidad de desarrollar este tema bajo su tutela dando la mejor de las guías y el Dr. Isidoro Gutiérrez Álvarez por su paciencia y entrega en la realización del trabajo. A los dos por brindar su tiempo e interés constante.

A la Universidad Internacional de Andalucía por brindarme la grandiosa oportunidad de ampliar mi aprendizaje y contribuir a mi constante formación profesional. A la cual le tendré una eterna gratitud.

A la Universidad de Huelva, que junto con la UNIA se han encargado de que llegue al alumnado los conocimientos impartidos a partir de un extraordinario claustro de profesores que desde todas partes de España se han dado cita aquí. Los mejores profesionales que han hecho de este Máster uno de los mejores y que ha futuro espero que siga siendo así.

Al director del Máster Universitario en Tecnología Ambiental, Rafael Torronteras por estar ahí en todo momento, brindando su apoyo, aclarando dudas, inquietudes, buscando la solución a los problemas en el menor tiempo posible; llegue a él mi más sentida gratitud.

Al team Cuba, ese equipo de estudio, ese equipo que se alejó de su familia en busca de crecer profesionalmente y que en todo este tiempo del máster hemos convivido formando una familia, amigos que quedan para siempre.

A mis amigos, Daide, Daniel y Lester, al frente del cañón en todo momento, donde uno tropieza y el otro lo ayuda a levantarse.

A los que están en la distancia y a los que voy conociendo en el camino, gracias por ser parte de esta historia.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. CAMBIO CLIMÁTICO Y EFECTO INVERNADERO.....	13
1.2. TEMPERATURA COMO SIGNO MÁS EVIDENTE DE CAMBIO CLIMÁTICO	14
1.3. EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE TEMPERATURA A ESCALA GLOBAL	14
1.4. EL NUEVO AR6, IMPORTANCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO REGIONAL.....	16
1.5. OBJETIVOS.....	17
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	20
2.2. OBSERVACIONES EXPERIMENTALES. SERIES DE AEMET Y EL ARENOSILLO.	23
2.3. DATOS DE REANÁLISIS: ERA5-LAND. CONSIDERACIONES GENERALES.....	24
2.4. ANÁLISIS DE LA TENDENCIA: VALORES MEDIOS Y ANOMALÍAS.	25
2.5. TRATAMIENTO DE DATOS.....	26
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES	29
3.1. EVOLUCIÓN MENSUAL PROMEDIO DE LA TEMPERATURA.....	29
3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE TEMPERATURA: OBSERVACIONES VS REANÁLISIS.	30
3.2.1. <i>Comparativa de observaciones experimentales</i>	30
3.2.2. <i>Comparativa de observaciones experimentales vs ERA5-Land</i>	31
3.3. TENDENCIA DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS.....	34
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS	43
ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Tipos y procedencia de las masas de aire más frecuentes sobre la Península Ibérica, (Hernández, 2012)</i>	20
<i>Figura 2: a) Ubicación del observatorio atmosférico, Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo (INTA) b) Ubicación de la estación meteorológica de Huelva</i>	22
<i>Figura 3: Estación meteorológica automática de la red meteorológica ordinaria (izquierda), Estación automática para el lanzamiento de radiosondeos (derecha), (Fuente; web de AEMET)</i>	23
<i>Figura 4: Valores mensuales y desviación estándar de las temperaturas mínimas, medias y máximas del observatorio de Huelva (AEMET) durante el período 1903-2021</i>	29
<i>Figura 5: Comparativa entre las observaciones de temperaturas medias de Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021</i>	30
<i>Figura 6: a) Evolución de la temperatura media mensual de Huelva y El Arenosillo, 2000-2021. b) Evolución mensual de las diferencias de temperaturas entre Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021. El círculo señala los valores atípicos extremos</i>	31
<i>Figura 7: a) Comparativa de la serie de temperaturas medias mensuales experimentales y extraídos de ERA5-Land en el período 2000-2021 para Huelva (a) y para El Arenosillo (b)</i>	32
<i>Figura 8: Comparativa entre las series de temperaturas medias mensuales extraídos de ERA5-Land para Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021</i>	33
<i>Figura 9: Diferencias de temperaturas de los observatorios de Huelva y El Arenosillo con respecto al ERA5-Land en el período 2000-2021. El círculo señala los valores atípicos extremos</i>	34
<i>Figura 10: Evolución de las anomalías de las temperaturas medias y de las tendencias para Huelva de 1903-2021 y ERA5-Land Huelva de 1950-2021 con respecto (a) al período de referencia 1951-1980 y (b) al período de referencia 1991-2020</i>	35
<i>Figura 11: Evolución de la temperatura media mensual de Huelva, 1903-2021</i>	36
<i>Figura 12: Evolución de las anomalías de las temperaturas medias y de las tendencias para ERA5-Land El Arenosillo de 1950-2021 con respecto al período de referencia 1951-1980 (a) y con respecto al período de referencia 1991-2020 (b)</i>	37
<i>Figura 13: Evolución de la temperatura media mensual a partir de los datos extraídos de ERA5-Land, 1950-2021</i>	37

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

“Cada grado importa, cada año importa, y cada decisión importa: no actuar hoy es añadir a la carga de las próximas generaciones. Limitar el calentamiento global a 1.5 grados no es imposible, pero requiere políticas fuertes e inmediatas”. (Valérie Masson - Delmotte, Copresidenta del Grupo de Trabajo I del IPCC 8/10/18 Representante del senado francés)

1.1. Cambio climático y efecto invernadero

El cambio climático constituye la mayor amenaza medioambiental a la que se enfrenta la humanidad, la cual se está produciendo con una velocidad e intensidad nunca vista, que alcanza no solo una perspectiva medioambiental, sino que abarca el ámbito económico, político y social.

Se denomina cambio climático a la variación global del clima en la Tierra, formado por la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera que ocurre en períodos de tiempo extensos como décadas o más años (Pérez, 2019). Estos cambios climáticos no son una novedad, ya que el clima del planeta no permanece estático y desde sus inicios han ocurrido variaciones en diversas escalas de tiempo donde la Tierra se ha calentado y enfriado de forma natural producidos por diversos factores como los cambios en los parámetros orbitales, variaciones en la radiación solar, caída de meteoritos y períodos de vulcanismos intensos que han requerido períodos de hasta millones de años. El problema actual radica en que dichos cambios se han incrementado debido a la influencia humana, demostrado por múltiples estudios que así lo confirman (cambio climático antropogénico) (Castro, 2016).

Los expertos afirman que el cambio climático antropogénico se comenzó a manifestar con los inicios de la Revolución Industrial, donde el aumento de la producción de combustibles fósiles para la generación de energía ha sido la causa principal de las circunstancias actuales, intensificadas desde 1950 y que asciende con el transcurso de los años. Gran parte de la comunidad científica ha denominado a la era geológica motivada por el impacto del ser humano en la Tierra como el Antropoceno (Rull, 2018). Es importante aclarar conceptos que se encuentran estrechamente relacionados con el cambio climático y que en ocasiones no se tiene la total claridad sobre ellos. El efecto invernadero, por su parte, es un proceso que ocurre de forma natural en el planeta, por el cual la atmósfera es capaz de retener parte de la radiación solar que alcanza la tierra, permitiendo que existan las condiciones idóneas para el desarrollo de la vida. De no existir este fenómeno, la temperatura media del planeta sería de 18°C bajo cero. La atmósfera está compuesta por varios gases, que en ciertas proporciones mantienen el equilibrio del planeta. El problema radica cuando las actividades que desarrolla el ser humano alteran esas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), que incluyen el dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua, entre otros, producidos por la quema de combustibles fósiles y la industrialización (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2022). La atmósfera retiene más calor del necesario y la temperatura media del planeta asciende,

ocurriendo el llamado calentamiento global, principal causa del cambio climático (Pérez, 2019).

1.2. Temperatura como signo más evidente de cambio climático

La temperatura constituye la principal variable climática para conocer la influencia del cambio climático en un territorio. Infiuye en fenómenos fisiológicos donde los seres vivos para su subsistencia necesitan que el rango de valores térmicos no exceda determinados umbrales. También en la mayoría de los fenómenos físicos que se desarrollan en la Tierra como la evaporación o la condensación, procesos que dependen directamente de la temperatura del aire (Ortega et al., 2001).

En el año 2015, se dieron importantes pasos en búsqueda de un marco común de actuación contra el cambio climático donde 195 países firmaron el Acuerdo de París, que estableció como objetivo fundamental evitar que el calentamiento global no supere los 2 °C respecto al período 1850-1900, aunque no llegar a los 1.5 °C sería mejor (Fernández, 2016). Sin embargo, las probabilidades indican que no se cumplirán de seguir así.

En un estudio realizado por Bruce Lieberman (2021) aborda el peligro que trae consigo sobrepasar los 2°C, pudiendo provocar consecuencias aún más devastadoras que las esperadas. Si se rebasa esa temperatura, la población mundial en lugar del 14 %, será el 37 % la que estará expuesta a olas de calor extremo cada cinco años; los arrecifes coralinos en vez de un 70-90 % disminuirán en un 99 %, provocando la desaparición de muchos ecosistemas marinos y costeros, el Ártico se descongelará en verano en lugar de una vez cada cien años, lo hará cada diez (Lieberman, 2021).

En el informe de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2021 se confirma que la temperatura media mundial anual estuvo en torno a 1.11 ± 0.13 °C por encima de la media preindustrial de 1850-1900, solo un poco inferior gracias al enfriamiento provocado a principios y finales de 2021 por el fenómeno climático de La Niña. Sin embargo, el verano del 2021 ha batido todos los récords que se registran hasta la fecha. Estos últimos siete años (2015-2021) han sido los años más cálidos desde que se mide la temperatura. Desde la década de 1980, cada decenio sucesivo ha sido más caluroso que el anterior y que cualquiera de sus antecesores desde el año 1850 (OMM, 2022).

1.3. Evolución del índice de temperatura a escala global

Según el investigador Alexis Hannart del Instituto Franco-Argentino de Estudios del Clima y de sus Impactos (IFAECI), un laboratorio internacional del Centro Nacional de Investigaciones Científicas (CNRS, de sus siglas en francés) con sede en Buenos Aires plantea: “Es un hecho que existe una gran diversidad de climas en la Tierra. Por ejemplo, tienen un promedio de -20 °C en Groenlandia, +25 °C en el Sahara y +10 °C en nuestras latitudes templadas. Cuando calculamos un promedio de todos estos valores de temperatura local en todos los puntos del mundo, obtenemos un valor total de 14 °C, y es legítimo cuestionar el significado y la relevancia de este valor. (...) Por tanto, en sentido estricto, es un abuso del lenguaje hablar de temperatura global de la

Tierra, puesto que ningún termómetro la mide. En rigor, se debería hablar del índice de temperatura global” (Hannart, 2014).

Los datos de temperaturas que se brindan a escala global permiten a los investigadores conocer el comportamiento que posee el mundo en general, aunque dichos datos por separado revelan un comportamiento mucho más crítico. Desde la década de los años setenta las regiones terrestres del planeta se han calentado a una velocidad superior que la media global. Esto indica que existen muchas regiones donde la temperatura sobrepasa los 1.5 °C en comparación con los niveles preindustriales. Aproximadamente una quinta parte de la población mundial vive en zonas donde al menos en un año se ha sobrepasado dicho límite (Meriño, 2022).

En el último año, fuertes olas de calor se sintieron en el oeste de América del Norte varias veces en junio y julio, las temperaturas alcanzaron en Lytton, en el centro-sur de la Columbia Británica el 29 de junio los 49.6 °C rompiendo el récord canadiense anterior en 4.6 °C provocando 569 muertes. El Valle de la Muerte, ubicado al suroeste de California en Estados Unidos alcanzó el 9 de julio los 54.4 °C muy similar al valor más alto registrado en el mundo que pertenece a este mismo lugar que es de 56.7 °C en el año 1913.

La región mediterránea de forma general estuvo afectada por calores extremos varias veces durante la segunda mitad del verano en el hemisferio norte donde se reportó un valor de 48.8 °C el 11 de agosto en una estación de Siracusa en Sicilia, Italia (WMO, 2021).

La tendencia al ascenso de la temperatura ha traído consigo cambios drásticos en las regiones polares del hemisferio norte. En las últimas décadas se percibe una sensibilidad mayor ante las alteraciones térmicas comparado con otras regiones del planeta, reflejado en la reducción de la extensión de hielo marino, principalmente en verano (Iglesias, 2019).

Al fenómeno que provoca mayores temperaturas cerca del Ártico en comparación con el promedio mundial debido a una combinación de procesos de retroalimentación se le denomina “amplificación ártica”. En la época de verano el hielo marino se derrite impidiendo que refleje el 70 % de la luz que recibe del sol, abriendo zonas oscuras de agua que absorben hasta un 90 % de la luz que reciben, provocando que más hielo marino se derrita. Durante la época de invierno las aguas liberan el calor hacia la atmósfera contribuyendo así a este bucle que se le suman el derretimiento de la nieve y el deshielo del permafrost (Dai et al., 2019).

Además del factor luz solar, la presencia de tormentas es otro mecanismo que fomenta esta retroalimentación. En los trópicos, el aire caliente de la superficie se eleva a altitudes superiores gracias a las tormentas de lluvia fuertes, por tal razón en la superficie el calentamiento no resulta ser elevado, a diferencia del Ártico donde el aire caliente se mantiene en la superficie debido a la ausencia de este tipo de tormentas (Schoolmeester et al., 2019).

En los últimos 50 años el Ártico ha presentado temperaturas que superan al doble de la media mundial, siendo la estación fría la que ha manifestado mayor incremento.

Según estudios realizados durante la década 2010-2019, en el trimestre de agosto a octubre el área promedio mensual de hielo marino ha disminuido en un 25 % aproximadamente con respecto a la década de 1979-1988 (SR1.5; IPCC, 2018).

1.4. El nuevo AR6, importancia del cambio climático regional

En el año 1988 se funda como iniciativa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (mejor conocido por sus siglas en inglés, IPCC) como entidad científica encargada de evaluar a nivel mundial el inminente impacto del cambio climático, proporcionando información actualizada sobre el mismo a sectores interesados y responsables políticos.

Esta entidad científica se conforma por expertos de diversas partes del mundo con amplios conocimientos sobre cambio climático, distribuidos en tres grupos de trabajo fundamentales (la base de la ciencia física; impactos, adaptación y vulnerabilidad; mitigación del cambio climático). Entre sus principales tareas, se encuentra la redacción periódica de Informes de evaluación, donde se plantean las causas, consecuencias y posibles soluciones a desarrollar para mitigar el cambio climático, a partir de análisis, estudios y metodologías que sirven como guías de aplicación para combatir dichos impactos (Hulme y Mahony, 2010).

El IPCC ha publicado durante todos estos años desde su creación, cinco informes divididos en tres volúmenes cada uno, correspondientes con los tres grupos de trabajo donde se evalúan los impactos que causa el cambio climático en el planeta.

Sus antecesores han abordado de forma explícita todo lo relacionado con el cambio climático como fenómeno global, pero se ha demostrado que dichos cambios se manifiestan y provocan diferentes consecuencias en cada región por separado, por ello, las evaluaciones de impacto y riesgo deben ser consideradas de igual forma.

En el Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC del 2022, casi un tercio está dedicado a los cambios climáticos regionales y proporciona nueva información regional que contribuye a la toma de decisiones en todos los niveles. Posee un análisis detallado a escala regional, de cómo el cambio climático afecta y afectará a varias partes del mundo, unas en mayor medida que otras. La información se basa en las principales variables a tener en cuenta cuando hablamos de cambio climático como son la temperatura media, precipitaciones extremas, sequías, ciclones tropicales, inundaciones costeras, etc. (Masson-Delmotte et al., 2021).

Los resultados muestran que aumentos en los niveles de calentamiento global de 1.5 grados a 2 grados o más provocará sequías más fuertes y eventos de precipitación más intensos. Estos eventos se sentirán en más regiones del mundo, y es a nivel regional, que esta información es importante para desarrollar respuestas de adaptación y políticas en varios sectores (Doblas-Reyes et al., 2021).

El cambio climático regional, se refiere a un cambio en el clima en una región determinada y en un momento dado que se mantiene en el tiempo durante algunas décadas o más y que puede identificarse a partir de las variaciones medias o

superiores que experimenta una variable climática. Puede referirse también a un cambio en la persistencia y la frecuencia con que ocurren los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. La interacción de procesos en el espacio está presente en todas partes, esto manifiesta el hecho de que escalas espaciales menores en ocasiones influyan en escalas mayores (AR6; IPCC, 2022). De la importancia que requiere este tema se deriva nuestra investigación, haciendo énfasis en la variable temperatura y su impacto en la región.

En España existen evidencias relevantes de los impactos del cambio climático en las últimas décadas, recogida en la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) donde se evidencia que más de 32 millones de personas son afectadas por sus consecuencias. La expansión de los climas semiáridos, la extensión de los veranos hasta casi 5 semanas más extensos que en la época de los ochenta, aumento de las olas de calor y de la temperatura del Mediterráneo en unos 0.34 °C por década son algunos de los escenarios que se observan actualmente y que manifiestan el efecto del cambio climático (MITECO, 2020).

En el último resumen del IPCC, se ha considerado a la península Ibérica por la alta posibilidad que existe de que ocurran fenómenos extremos, como la disminución de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas, como una zona de especial vulnerabilidad frente al cambio climático (Iglesias, 2019).

La actual sociedad se enfrenta a un desafío sin precedentes, en el que detener el calentamiento global a través de una respuesta urgente ante los impactos ya visibles de un clima cada vez más cálido e incierto donde la temperatura como variable climatológica juega un papel importante en los cambios que se producen a escala global.

En este contexto, se propone este Trabajo de Investigación Fin de Máster (TFM), el cual se centrará en conocer cómo ha evolucionado la temperatura en superficie en las últimas décadas en una región altamente sensible al cambio climático, como es la parte suroccidental de la península Ibérica.

1.5. Objetivos

El objetivo general de este trabajo de investigación es conocer la evolución y tendencia de la temperatura en el suroeste de la península Ibérica en el último siglo, utilizando para ello series históricas de observaciones experimentales y datos de reanálisis de alta resolución procedentes de un modelo global meteorológico.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la evolución mensual promedio de la temperatura a partir de la serie de AEMET de Huelva.
- Comparar las observaciones experimentales de las series de AEMET de Huelva y del observatorio atmosférico de El Arenosillo.

- Comparar los datos experimentales de las series de Huelva y El Arenosillo con los datos de la colección de reanálisis de ERA5-Land del modelo ECMWF.
- Obtener las anomalías mensuales y su evolución con respecto a dos períodos de referencia 1951-1980 y 1991-2020, para las series de Huelva, El Arenosillo y el reanálisis de ERA5-Land.
- Analizar la tendencia de la temperatura a partir de las medias mensuales para las series de Huelva, El Arenosillo y los datos de reanálisis de ERA5-Land.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el capítulo 2 se describe la zona de estudio, los materiales y métodos utilizados para el desarrollo de este trabajo de investigación. En la primera sección se detalla la ubicación de la zona geográfica a analizar y sus características climáticas con respecto al resto de la península Ibérica. Se exponen, en un segundo apartado, los materiales de estudio (series de observaciones experimentales de temperaturas aportadas por AEMET de Huelva y el observatorio atmosférico de El Arenosillo); además de los datos de reanálisis ERA5-Land como fuentes de extracción de la información y las herramientas usadas para su análisis. Por último, se explica la metodología desarrollada para la obtención de los resultados.

2.1 Descripción de la zona de estudio.

La zona de estudio se ubica en la península Ibérica en el continente europeo, afectada por el flujo constante de las masas de aire que inciden sobre esta y del encuentro con el océano Atlántico y el mar Mediterráneo de aguas relativamente cálidas. El clima peninsular es variable, hacia el norte se desarrollan inviernos ligeros, veranos frescos, nubosidad, aire húmedo y abundantes precipitaciones durante todo el año. Mientras que, para el resto del territorio se observa un entorno con condiciones distintas, veranos más cálidos y secos, abundante insolación y escasas lluvias durante todas las estaciones, característico de un clima mediterráneo (Hernández, 2012).

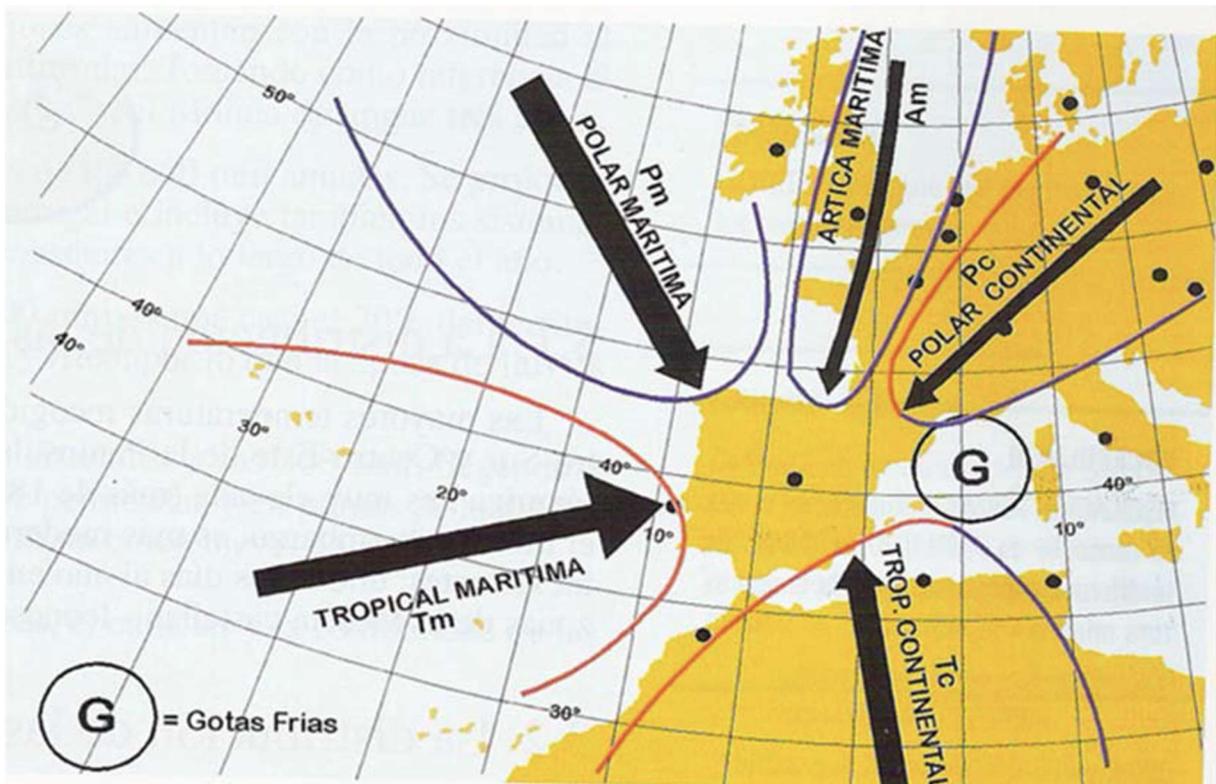


Figura 1: Tipos y procedencia de las masas de aire más frecuentes sobre la Península Ibérica, (Hernández, 2012)

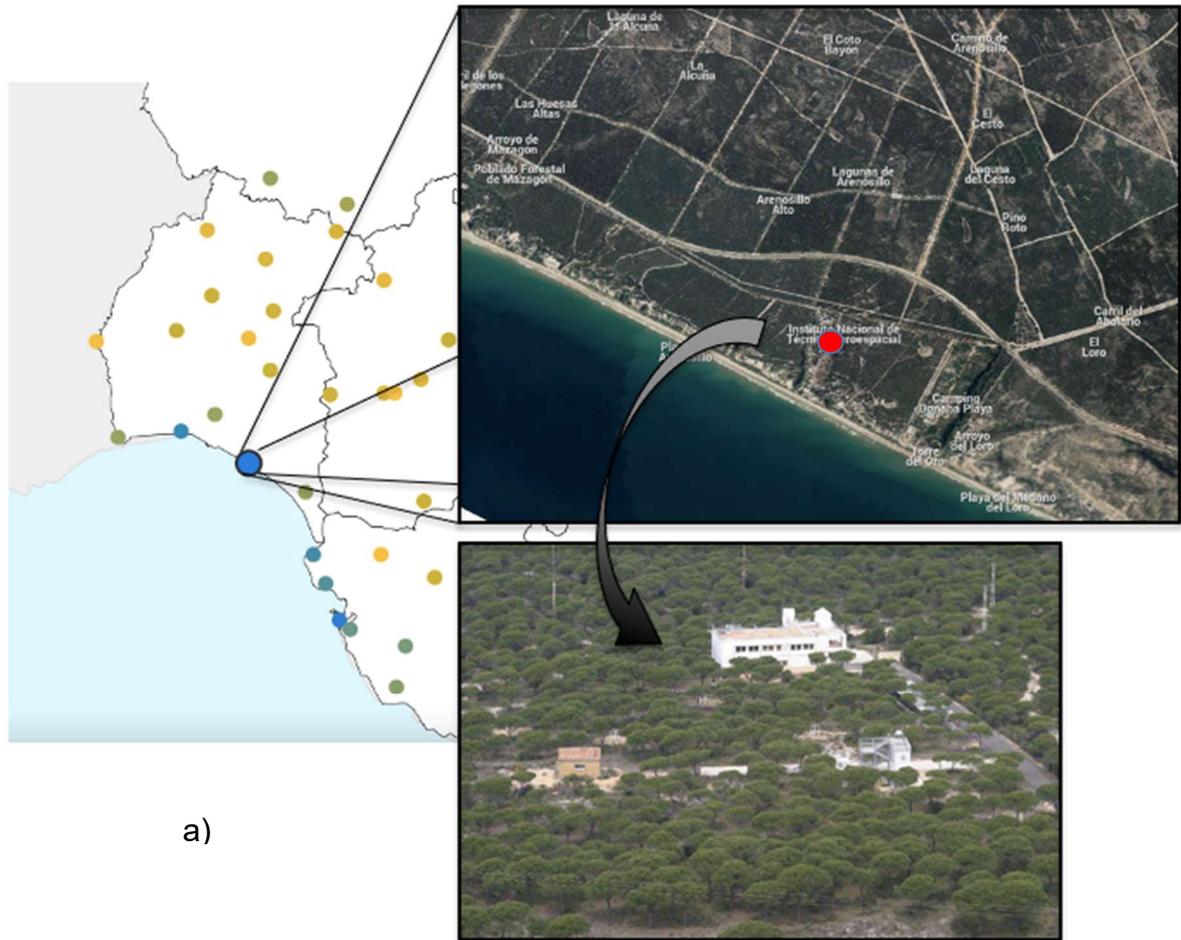
La región de estudio se encuentra en la Comunidad Autónoma de Andalucía, en la provincia de Huelva. Esta limita al sur con el Océano Atlántico, con una larga costa

que se extiende por todo el territorio, al norte con la provincia de Badajoz y a su vez la sierra de Aracena, al oeste con Portugal y al este con las provincias de Sevilla y Cádiz.

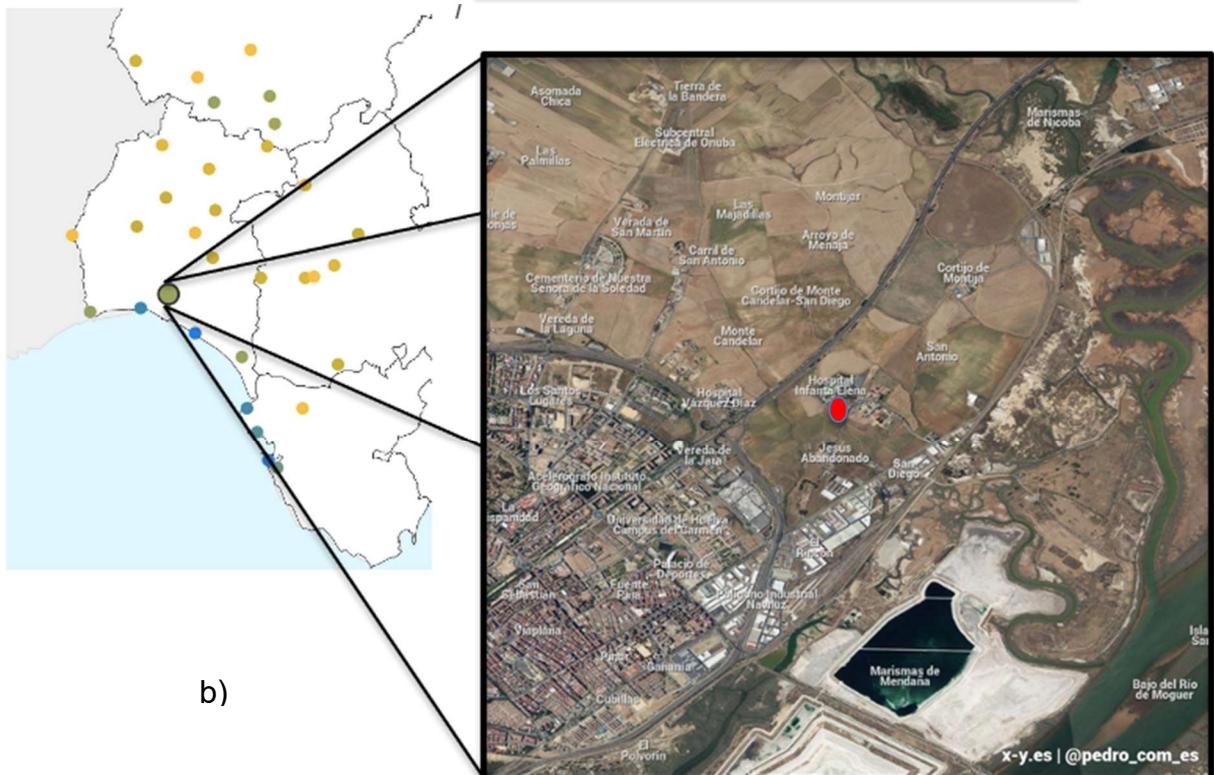
Son parte de la geografía de la provincia de Huelva los ríos Tinto y Odiel, así como, abundantes marismas, caños, lagunas, esteros, junto a zonas de arenas. El río Guadiana sirve de frontera con Portugal, en el norte la Sierra Morena y hacia el este el Valle del Guadalquivir (Adame, 2002).

Justo al suroeste, analizamos dos lugares que a pesar de su cercanía presentan condiciones de temperaturas variables entre ellos. El primero de ellos, el observatorio Atmosférico de El Arenosillo ubicado en los 37° 5' 53" de latitud norte; 6° 44' 17" de longitud oeste a 41 metros sobre el nivel del mar (Figura 2a), perteneciente al Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) próximo al municipio de Moguer cerca de Arroyo Arenosillo, Playa del Arenosillo y Arroyo del Loro, a solo 35 km de la ciudad de Huelva en dirección sudeste. Allí en el interior del Parque Nacional de Doñana a unos 500 metros de la costa se emplaza este observatorio rodeado de una extensa área de vegetación que abunda en la zona (Adame, 2012).

El segundo punto se encuentra a una distancia de 27,74 km de El Arenosillo, el observatorio meteorológico de la ciudad de Huelva, en la ronda este en los 37° 16' 42" de latitud norte; 6° 54' 42" de longitud oeste a 19 metros sobre el nivel del mar (Figura 2b), en la zona urbana donde se emplaza la ciudad capital de la provincia de Huelva (AEMET, 2022).



a)



b)

Figura 2: a) Ubicación del observatorio atmosférico, Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo (INTA) b) Ubicación de la estación meteorológica de Huelva.

2.2. Observaciones experimentales. Series de AEMET y El Arenosillo.

La observación meteorológica se utiliza para conocer el estado en que se encuentra la atmósfera, pronostica sucesos meteorológicos y mantiene una vigilancia constante sobre las condiciones climáticas, a partir de la determinación de variables y parámetros físicos.

La comunidad internacional se encuentra estrechamente vinculada e inmersa en las tareas de observación meteorológica, a partir de un sistema global de observación que data del siglo XIX, compuesto por un componente espacial y otro terrestre. La información recogida es procesada y difundida por cada territorio, de forma tal que podemos tener acceso a la información desde cualquier parte del mundo (AEMET, 2022).

Para el caso de España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), funciona como organismo público anejo al Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente con sede en Madrid. Con presencia en cada una de las 17 comunidades autónomas del estado español y con más de 3000 estaciones con fines principalmente climatológicos, integrando la red climatológica ordinaria, cuya función es la recogida a nivel de superficie de las observaciones de temperaturas extremas diarias, la precipitación acumulada en un día, entre otras variables meteorológicas.

Con búsqueda a la mejor captación de datos, AEMET se encuentra en constante remodelación de su infraestructura tecnológica instalando nuevos equipos automáticos que recogen la información varias veces al día de forma centralizada. Dispone de una red de estaciones de alta densidad espacial que realizan la medición de más parámetros que la ordinaria y brindan los datos en tiempo real. También posee una red de observaciones meteorológicas en altura que proporciona dos veces al día los perfiles verticales de los parámetros meteorológicos con el uso de radiosondeos.



Figura 3: Estación meteorológica automática de la red meteorológica ordinaria (izquierda), Estación automática para el lanzamiento de radiosondeos (derecha), (Fuente; web de AEMET).

Sus archivos cuentan con toda la información climatológica arrojada por las instituciones que le precedieron en el Banco Nacional de Datos Climatológicos, donde se almacenan largas series de datos realizadas en España, de ellas, algunas con más de 150 años de antigüedad.

La Agencia representa a España a nivel internacional en materia de meteorología en la Organización Meteorológica Mundial (OMM), en el centro europeo de predicción del tiempo a plazo medio (ECMWF), en la organización europea de satélites meteorológicos (EUMETSAT), entre otros.

Para el caso de la provincia de Huelva, AEMET cuenta con 14 estaciones de observación meteorológica de donde se ha obtenido la información de las series de datos diarios de temperatura máxima, media y mínima del municipio del mismo nombre desde 1903 hasta el 2021 que será utilizada en este trabajo de investigación. Por su parte, el Instituto de Técnica Aeroespacial (INTA) es el Organismo Público de Investigación (OPI) perteneciente al Ministerio de Defensa, creado en España para la realización de investigaciones, con sede principal en Torrejón de Ardoz, Madrid y distribuido por toda la geografía nacional en sus 15 centros de investigación. El Centro de Experimentación de El Arenosillo (CEDEA) fundado en 1966 en Mazagón, Huelva, perteneciente al INTA, en su momento fue un campo de lanzamientos de cohetes internacionales para diversos estudios sobre las distintas capas de la atmósfera. Actualmente el centro dedica fundamentalmente sus esfuerzos a estudios atmosféricos y ensayos de aeronaves no tripuladas, además cuenta con una infraestructura tecnológica avanzada que permite obtener una amplia información sobre el estado de la atmósfera. Del observatorio atmosférico que allí radica ha sido extraída la serie de temperaturas medias mensuales desde el año 2000 hasta 2021 para la realización de este trabajo.

2.3. Datos de reanálisis: ERA5-Land. Consideraciones generales.

El Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas de Medio Alcance (por sus siglas en inglés ECMWF European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) produce datos de reanálisis que muestran la evolución de múltiples parámetros y variables meteorológicas, recogidos durante varias décadas, utilizando la combinación de datos observacionales a nivel mundial desde 1950 hasta la actualidad. Desarrollado dentro del marco del Servicio de Cambio Climático de Copérnico (C3S) de la Comisión Europea, a partir de la mejora del componente terrestre de la quinta generación del Reanálisis Europeo (ERA5), denominado por su actual nombre ERA5-Land (Muñoz-Sabater, 2019).

Para mostrar el comportamiento de los campos estáticos y climatológicos a nivel global, ERA5-Land utiliza 50 variables invariantes en el tiempo, como son los ciclos del agua, la energía en tierra, la cubierta y profundidad de un lago, el tipo de vegetación y la cubierta vegetal; arrojando datos en cada hora, además permite calcular las medias mensuales.

El forzamiento atmosférico del ERA5-Land proviene de los campos de estado meteorológico cercanos a la superficie y los campos de flujo ERA5 (10 metros por encima de la superficie) donde se incluyen parámetros como la presión superficial, la humedad específica, la velocidad del viento y la temperatura del aire con una resolución espacial de 0.1 x 0.1 (9 km) mejor que los modelos antecesores. Ello es posible, mediante la interpolación lineal basada en una malla triangular de los campos del ERA5 de unos 31 km de resolución a 9 km (red operativa triangular-cúbica-octaédrica (TCO1279) del ECMWF). Los valores obtenidos son corregidos teniendo en cuenta la diferencia de altitud que existe entre las rejillas del ERA5 y el ERA5-Land (Muñoz et al., 2021).

Toda la información producida por el ERA5-Land se encuentra disponible en la base de datos climáticos (CDS) del C3S de la Comisión Europea, con un retraso de unos tres meses relativamente a la fecha real de donde fueron extraídos los datos para esta investigación.

2.4. Análisis de la tendencia: valores medios y anomalías.

En este estudio será usada la variable temperatura con respecto a un período de años, por tanto, hablamos de una variable cuantitativa dependiente respecto a una variable independiente. A partir de los valores medios diarios/horarios se obtendrán las medias mensuales con los que se calcularán las anomalías y las tendencias, así se conocerá la función lineal que se ajusta a la relación entre la variable temperatura y el tiempo, es decir la regresión lineal.

La anomalía de temperatura se define como la diferencia que existe entre los valores medios mensuales en las zonas de estudio con respecto al promedio de los valores medios mensuales de los períodos de referencia (30 años). El signo positivo o negativo obtenido de esta diferencia representa cuanto varía en comparación con la temperatura promedio mensual de los períodos. Esta por sí sola no es suficiente para caracterizar dicha variabilidad, por tanto, se calcula la desviación estándar de las anomalías.

Las normales climatológicas han sido usadas desde la primera mitad del siglo XX. Permiten aportar información basadas en las anomalías de las temperaturas medias mensuales con las cuales se puede evaluar las observaciones actuales, además ofrecen la oportunidad de predecir las condiciones que muy probablemente pudieran ocurrir en una zona determinada.

La OMM recomienda períodos de 30 años como referencia para este tipo de estudios, donde se define como la normal climatológica estándar al período de 30 años más reciente que concluye en un año acabado en 0, en este caso ese período sería 1991-2020. Además de este período, el intervalo que comprende los años desde 1961 hasta 1990 se usa como período de referencia reglamentario para los estudios del cambio climático a largo plazo en todo el mundo.

Independientemente de estos ejemplos se pueden usar otros períodos de referencia, según la finalidad del estudio que se realice. En este trabajo se han calculado las

anomalías y sus tendencias con respecto a los períodos de referencia 1991-2020 y 1951-1980.

2.5. Tratamiento de datos.

En el caso de Huelva, la información fue obtenida de la base de datos climatológicos de AEMET de donde se extrajeron las series de valores diarios de temperaturas máximas, medias y mínimas para el período 1903-2021 y para el caso de El Arenosillo se trabajó con la serie de temperaturas medias del período 2000-2021 del observatorio atmosférico.

Otros datos utilizados en el análisis y que han sido de gran interés para conocer y comparar la evolución de las temperaturas de las observaciones experimentales con los modelos climatológicos desarrollados ha sido la colección de ERA5-Land. La información se ha descargado de la página web del C3S de la Comisión Europea (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) con una resolución espacial de 9 km, seleccionada la variable temperatura y todos los valores mensuales promediados desde 1950 hasta 2021 para las regiones seleccionadas en formato NetCDF, para posteriormente con la ayuda del programa Matlab y la aplicación de un código de programación los datos pasarlos a formato de lectura txt, para luego ser convertidos en formato xlsx Excel.

La metodología en la cual se basa este trabajo investigativo es cuantitativa, ya que se realizan análisis estadísticos y comparativos de los datos, con el objetivo de estudiar los anomalías y tendencia de las temperaturas a lo largo del tiempo.

En la estación de Huelva, con el objetivo de obtener resultados lo suficientemente fiables, en el tratamiento de los datos se ha considerado como punto de partida trabajar con series lo suficientemente largas, en este caso Huelva tiene una amplia información meteorológica almacenada desde el año 1903, sometidos al estudio 119 años. Al considerarse un período tan extenso existen huecos que pudieran afectar los resultados, por tanto, a la hora de llevar los datos diarios a mensuales no se considerarán para el análisis aquellos meses que no contengan más del 85% de los datos.

Estos valores se hallan a partir del promedio de las temperaturas diarias para el mes de enero de 1903, el promedio de las temperaturas diarias para el mes de febrero de 1903 y así sucesivamente hasta el mes de diciembre del 2021.

Posteriormente, se calcula el promedio de las temperaturas mensuales mínimas, medias y máximas a partir del promedio de los valores de temperatura de todos los enero desde 1903 hasta 2021, de igual forma para todos los febreros de cada año y así con todos los meses.

Con la ayuda de la hoja de cálculo de Excel para el tratamiento de los datos se evaluará la evolución mensual de la temperatura para los valores medios, máximos y mínimos mediante el análisis de su comportamiento, el cálculo de su desviación estándar y su coeficiente de correlación para todos los períodos.

Posteriormente, a partir del período 2000-2021 se compararán los valores mensuales de ambas series experimentales para hallar la media de las diferencias entre ellas y

su desviación estándar. También serán sometidas a la comparación la colección de datos de ERA5-Land para dichas localizaciones.

Además, se calcularán las anomalías de los datos con respecto a períodos de referencia de 30 años establecidos por la Organización Meteorológica Mundial y otras entidades como el IPCC que realizan estudios de este tipo. En esta ocasión las series de temperaturas se evaluarán teniendo como referencia los intervalos de 1951-1980 y 1991-2020 para finalmente conocer su comportamiento a partir de las líneas de tendencia mediante su representación gráfica y obtención de la ecuación y el tipo de función de regresión.

Con la ayuda de las hojas de cálculo de Excel se realizarán las siguientes funciones matemáticas: media aritmética, coeficiente de correlación, desviación estándar, anomalía y tendencia, las que permitirán arribar a los resultados y conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En el capítulo 3 se exponen los resultados obtenidos en el procesamiento de las series de temperaturas, donde se evaluará la evolución de dichas series en los períodos seleccionados, se compararán los datos experimentales de las series entre ellas y con los valores arrojados por el ERA5-Land y se calcularán las anomalías y las tendencias que experimentan las series. El análisis llevado a cabo será representado gráficamente.

3.1. Evolución mensual promedio de la temperatura.

A partir de la serie histórica de temperatura de AEMET de Huelva desde 1903 al 2021 se realiza un análisis de su comportamiento en todo el período. Se dispone de los datos diarios de temperaturas mínimas, medios y máximos de estos 119 años. Con la ayuda de la hoja de cálculo de Excel se han calculado los valores de temperaturas medias mensuales para cada año de la serie experimental.

La evolución de la serie experimental de Huelva (Figura 4) experimenta en el mes de enero una temperatura promedio mínima de 5.8 ± 1.6 °C, una media de 10.7 ± 1.1 °C y una máxima de 15.8 ± 1.1 °C, siendo el mes más frío del año. A medida que avanza el año, los valores de temperatura tienden al incremento, alcanzándose para el mes de agosto sus valores más elevados, reportando como temperatura promedio mínima 18.4 ± 1.1 °C, media de 25.2 ± 1.1 °C y máxima de 32.0 ± 1.4 °C. Posteriormente, desciende nuevamente hasta alcanzar 7.0 ± 1.8 °C, 11.6 ± 1.2 °C, 16.4 ± 1.1 °C en el mes de diciembre los valores mínimos, medios y máximos respectivamente.

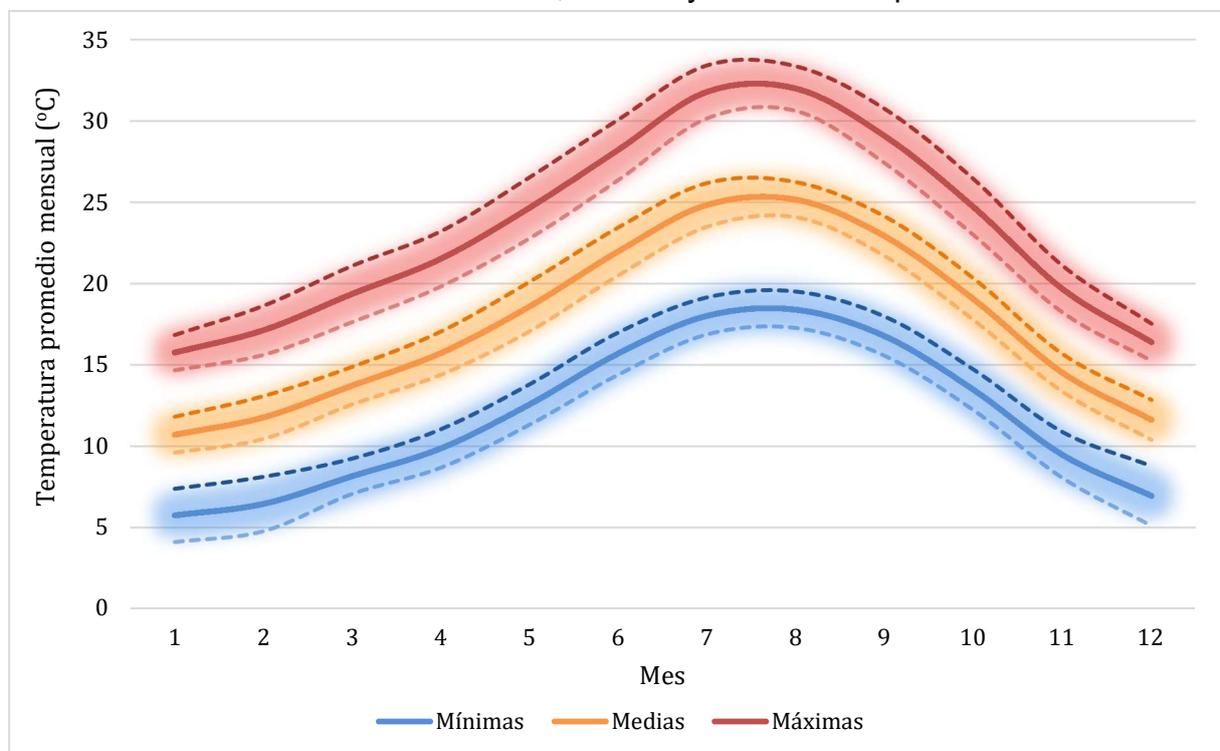


Figura 4: Valores mensuales y desviación estándar de las temperaturas mínimas, medias y máximas del observatorio de Huelva (AEMET) durante el período 1903-2021.

Por ello, la ciudad de Huelva se caracteriza por un clima mediterráneo debido a su posición geográfica, cercana al océano Atlántico, provocando la presencia durante el año de temperaturas muy altas en los meses de verano y suaves durante el invierno.

3.2. Análisis comparativo de las series históricas de temperatura: observaciones vs reanálisis.

En esta sección realizaremos un análisis comparativo de las observaciones experimentales de temperatura de la ciudad de Huelva y El Arenosillo, de igual forma compararemos dichas observaciones con los datos de reanálisis de la colección ERA5-Land (ECMWF) para estos dos puntos del suroeste de la península Ibérica.

3.2.1. Comparativa de observaciones experimentales.

Se ha considerado el intervalo de años desde el 2000 hasta el 2021, correspondiente al presente siglo, y se ha realizado un análisis comparativo de las medias mensuales de temperatura de Huelva y El Arenosillo.

En la Figura 5, se muestra en el eje de las abscisas los valores medios mensuales de las temperaturas del 2000-2021 para la estación meteorológica de Huelva y en el eje de las ordenadas las de El Arenosillo, calculándose para ambas series el coeficiente de correlación de Pearson. El resultado ha sido de $\rho = 0.977$, el cual indica una correlación positiva muy cercana a la unidad. Este resultado, aunque pudiera ser esperable, indica la similitud de las series en cuanto a su variación mensual debido a la cercanía de ambos emplazamientos de medida, a unos 33 km y a pesar de encontrarse en entornos muy diferentes (rural y urbano).

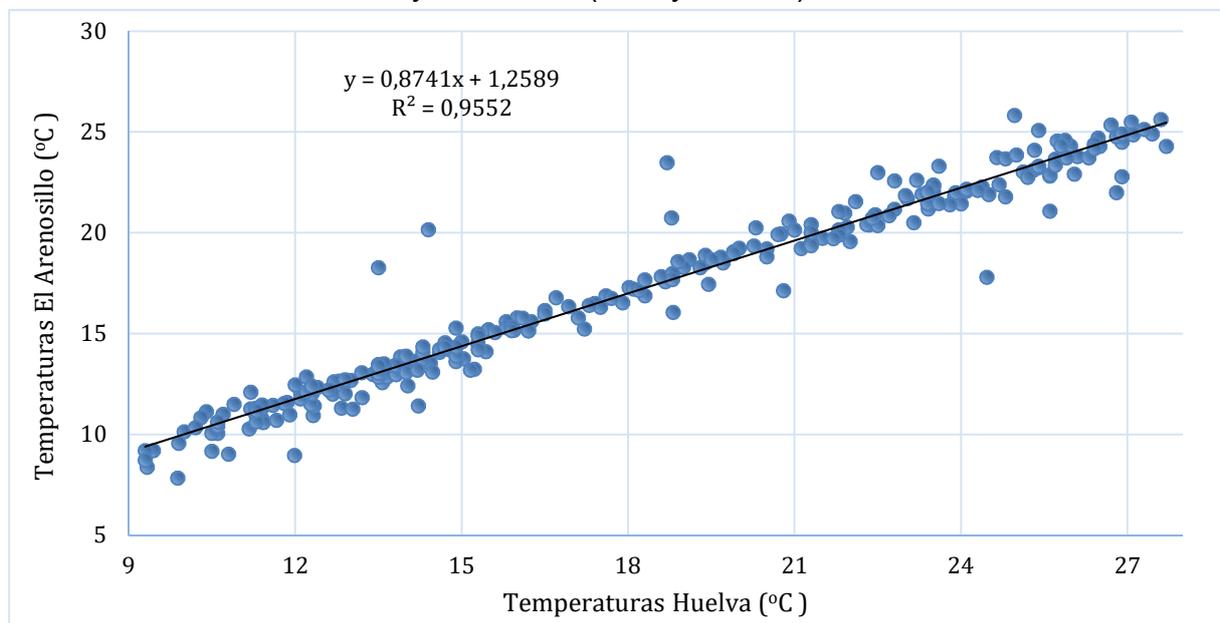


Figura 5: Comparativa entre las observaciones de temperaturas medias de Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021.

La Figura 6a muestra la evolución mensual de la temperatura en el período de estudio, obteniéndose que las temperaturas de Huelva son más elevadas que las de El Arenosillo. Este resultado está asociado a su posición, siendo una estación urbana que se encuentra más alejada de la costa.

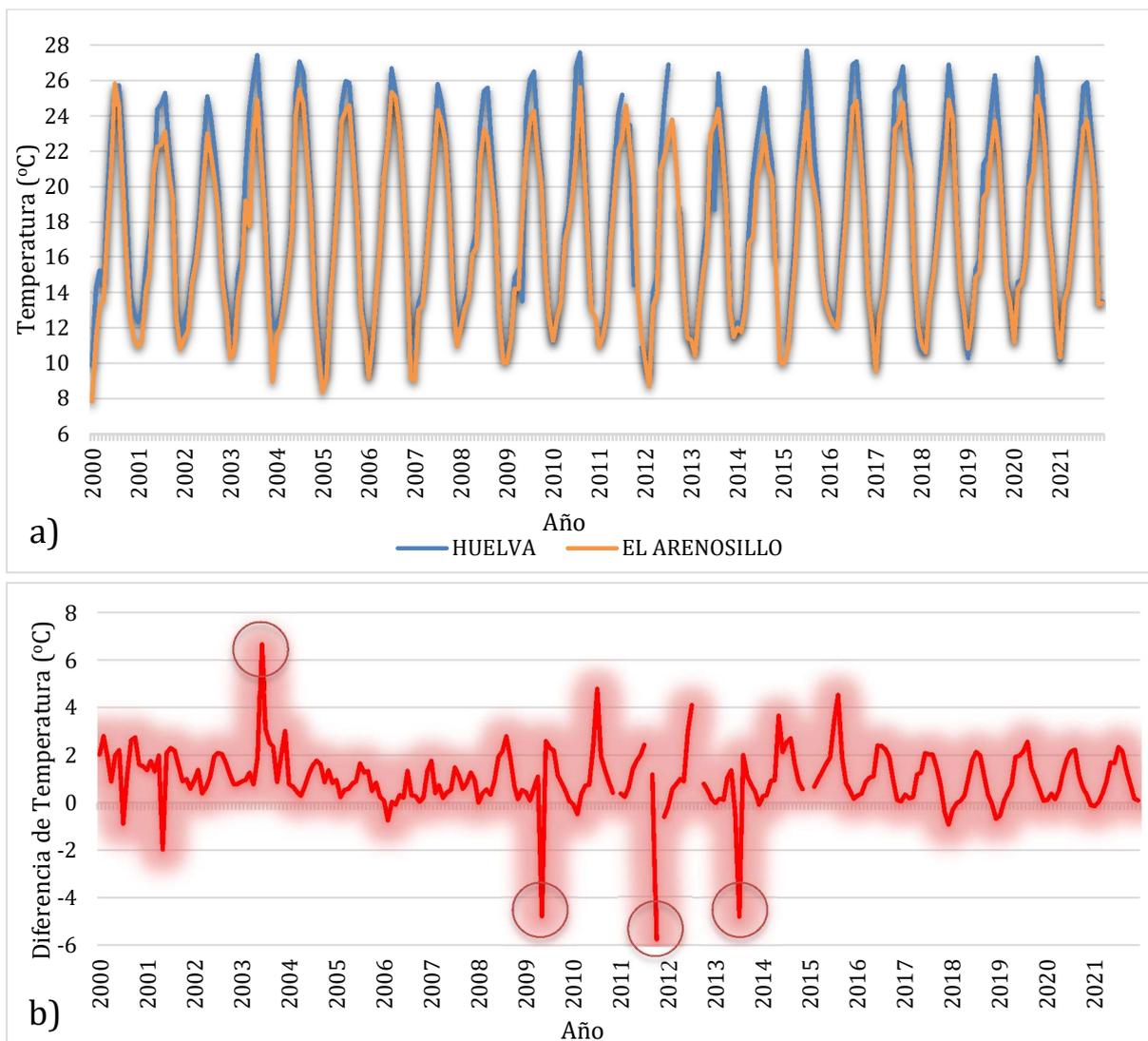


Figura 6: a) Evolución de la temperatura media mensual de Huelva y El Arenosillo, 2000-2021. b) Evolución mensual de las diferencias de temperaturas entre Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021. El círculo señala los valores atípicos extremos.

Las diferencias de las temperaturas medias mensuales que existen entre Huelva y El Arenosillo se muestran en la Figura 6b. De forma general su comportamiento es estable, en el período 2000-2021 la diferencia de temperatura tiene como promedio 1.0 ± 1.2 °C.

El rango de las diferencias oscila entre 0 y 2.2 grados, se observan valores extremos de las diferencias en meses concretos como el valor positivo de diferencia de 6.7 °C en junio de 2003 y valores negativos de diferencia como -4.8 °C en mayo de 2009 y julio de 2013 y -5.8 °C en octubre de 2011, los cuales habría que investigar en un futuro sus causas.

3.2.2. Comparativa de observaciones experimentales vs ERA5-Land.

Aplicando la misma metodología que en la sección anterior, se han extraído los datos de reanálisis de las temperaturas medias mensuales en el período 2000-2021 para Huelva y El Arenosillo a partir de la colección de ERA5-Land y se han comparado con las observaciones experimentales de ambos emplazamientos.

En la Figura 7a se muestra la comparativa entre los datos extraídos de ERA5-Land y las observaciones para el caso de Huelva. En la misma se obtiene una pendiente positiva, con un coeficiente de correlación es de 0.987, indicando el grado de similitud de los valores. Solo se observan tres puntos alejados, correspondientes a los meses de mayo de 2009, octubre de 2011 y julio de 2013 donde los valores de las temperaturas medias mensuales son muy variables.

En la Figura 7b se muestra la comparación del modelo con los datos del observatorio de El Arenosillo, la pendiente también es positiva con un coeficiente de correlación de 0.986. En los meses de mayo 2001, junio de 2003, julio de 2010, mayo de 2014 y agosto de 2015 los valores de las temperaturas medias mensuales también son muy variables.

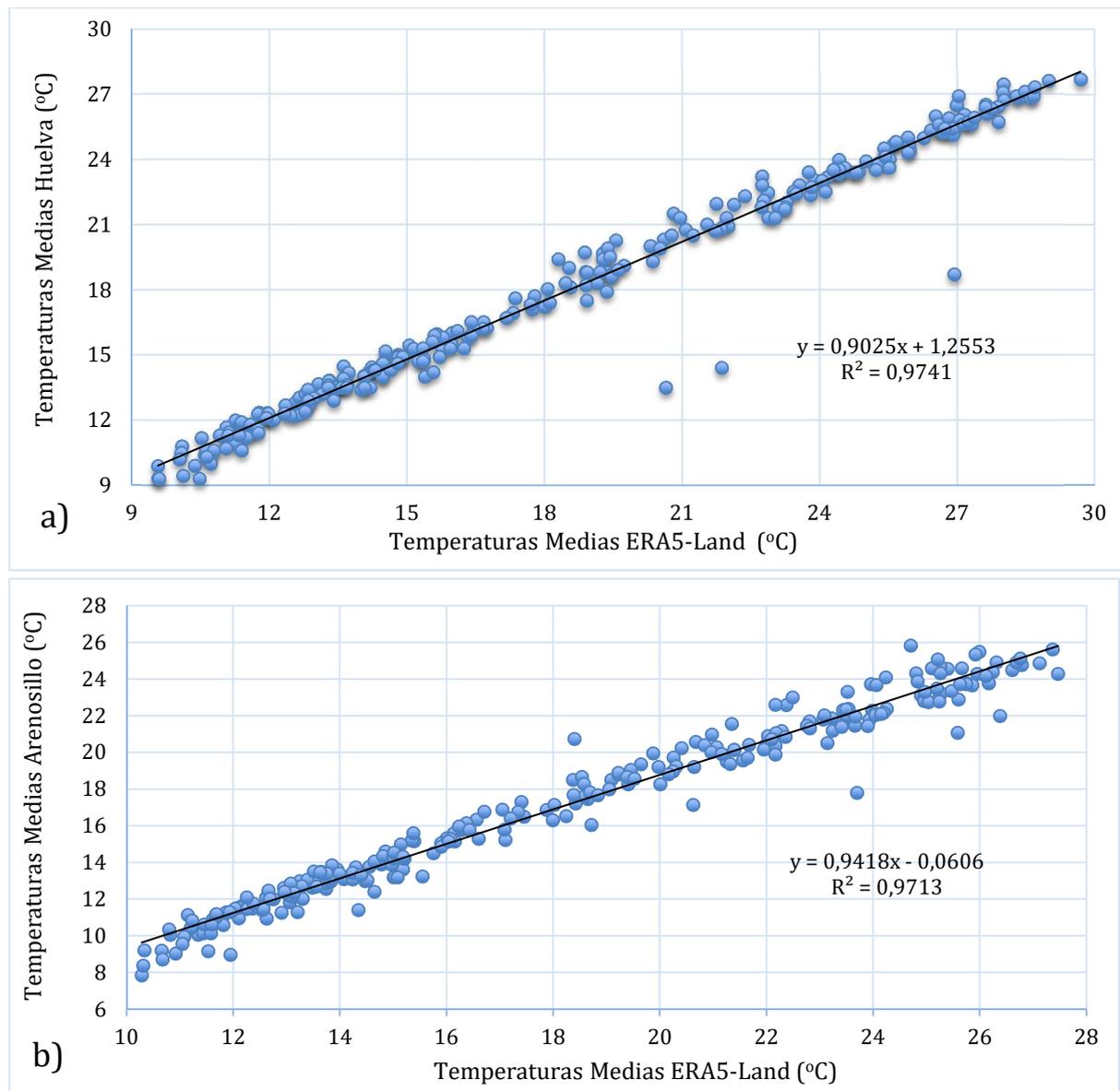


Figura 7: a) Comparativa de la serie de temperaturas medias mensuales experimentales y extraídos de ERA5-Land en el periodo 2000-2021 para Huelva (a) y para El Arenosillo (b).

Se puede indicar que la variabilidad que existe entre los valores obtenidos a partir de ERA5-Land y las observaciones experimentales es muy similar, con coeficientes de correlación en ambos casos superior a los 0.9.

En la Figura 8, se muestra la comparativa entre los datos extraídos del ERA5-Land para Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021. El coeficiente de correlación es de 0.998 que indica una correlación positiva muy cercana a la unidad.

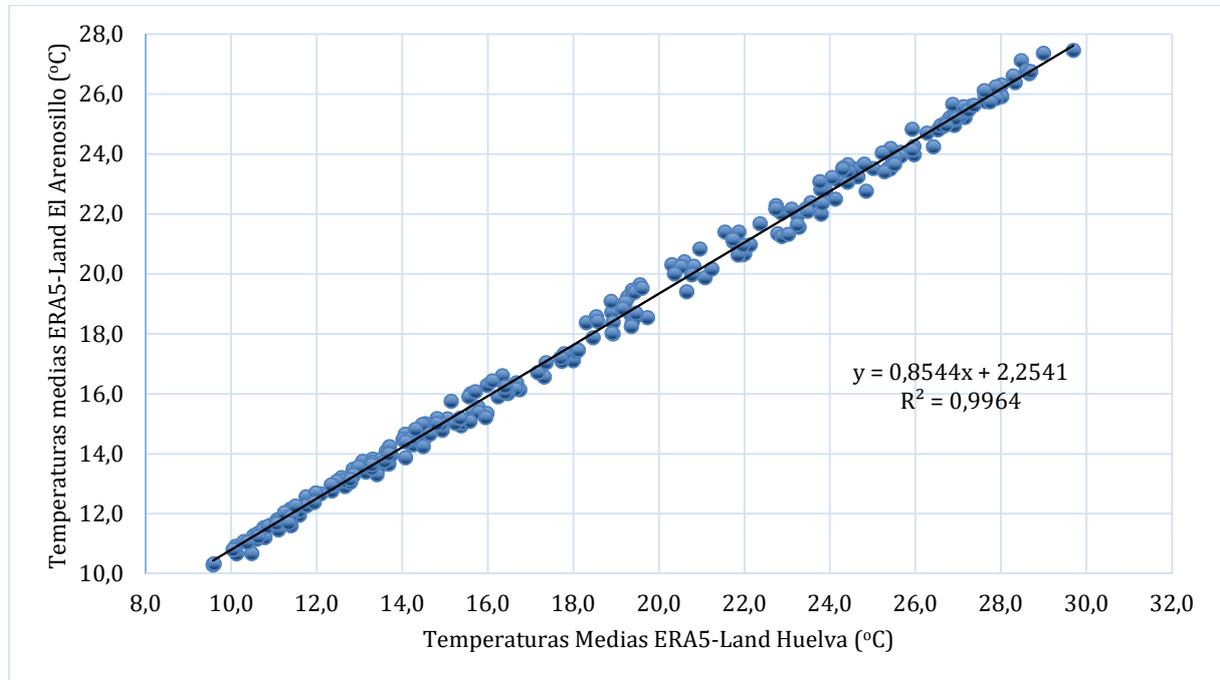


Figura 8: Comparativa entre las series de temperaturas medias mensuales extraídos de ERA5-Land para Huelva y El Arenosillo en el período 2000-2021

En la Figura 9, se muestran las diferencias de temperaturas de los dos emplazamientos analizados. En Huelva el promedio de las diferencias es de 0.6 ± 1.0 °C, mientras que, en El Arenosillo es de 1.1 ± 0.9 °C. Se han obtenido las mayores desviaciones, de forma general en los meses de mayo, junio y julio.

Se observa, además, en la evolución temporal de las diferencias de Huelva, tres valores anómalos positivos que corresponden con los valores atípicos extremos de los meses mencionados anteriormente. De igual forma la línea que define el comportamiento de las diferencias de las temperaturas para El Arenosillo presenta un valor anómalo negativo y cuatro positivos que representan los valores atípicos extremos para este caso.

Estos valores extremos, en ambos emplazamientos, habría que analizarlos con más detalle en el futuro, pero pudieran estar causando la elevada desviación obtenida para Huelva.

Los resultados obtenidos de este análisis comparativo indica que los datos de reanálisis de ERA5-Land están sobrestimando la temperatura, en media mensual, y que esta diferencia es mayor en Huelva que en El Arenosillo.

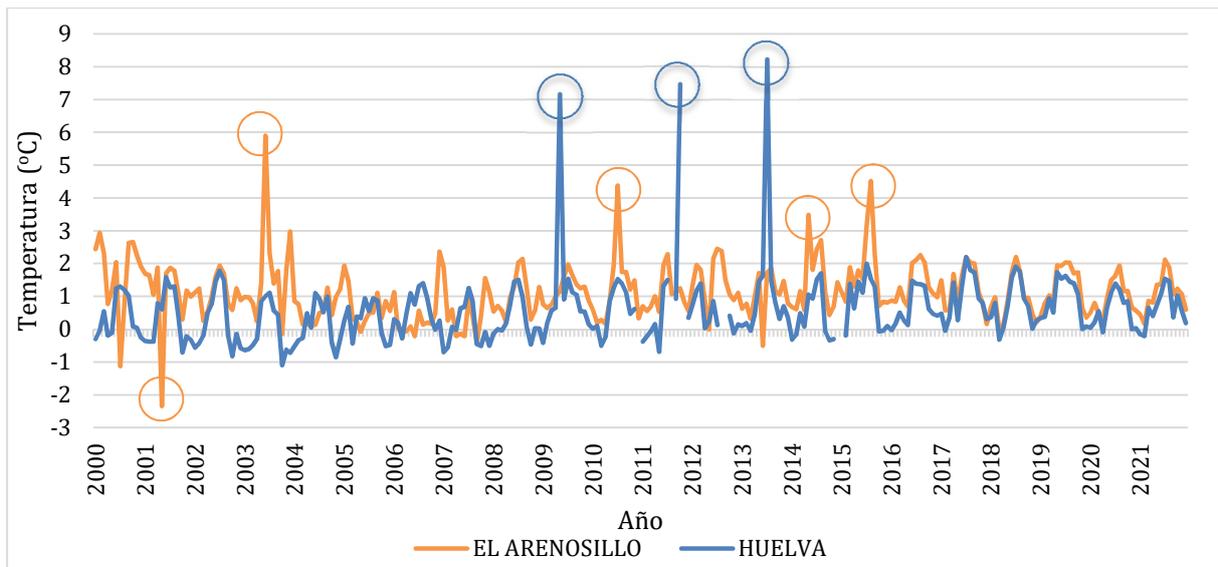


Figura 9: Diferencias de temperaturas de los observatorios de Huelva y El Arenosillo con respecto al ERA5-Land en el período 2000-2021. El círculo señala los valores atípicos extremos.

3.3. Tendencia de las temperaturas medias.

En esta sección se presenta la evolución temporal que experimentan los registros de temperatura en cada una de las zonas sujetas al análisis con respecto a los períodos de referencia para el cálculo de las anomalías de 1951-1980 y 1991-2020 (OMM, 2017), así como la tendencia tanto para los datos experimentales como para el modelo ERA5-Land. El estudio se realiza con las anomalías pues de esta forma la variabilidad interanual no influye en los resultados.

En la Figura 10a se muestra el comportamiento de las anomalías con respecto al período de referencia 1951-1980, representado en color azul la serie experimental y en color naranja el ERA5-Land, ambos para Huelva.

En el período 1903-2021 la tendencia de las anomalías de Huelva con respecto al período de referencia 1951-1980 es 0.11 ± 0.01 °C por década. La media de las anomalías es de 0.2 ± 1.3 °C siendo mayor que cero, indicando meses más cálidos con respecto al período 1951-1980, lo que representa el 56.1 % de los valores, de los cuales el 8.7 % del total son superiores o iguales a los 2 °C de diferencia.

Los años desde 1945 a 1955, la década de los años ochenta y en el presente siglo desde el año 2014 al 2020 son los años más calurosos. El año 2021 también tiene incrementos, pero menor que sus predecesores.

La tendencia de las anomalías obtenidas a partir de los datos extraídos del ERA5-Land (1950-2021) para el período de referencia 1951-1980 es de 0.16 ± 0.02 °C por década. Este resultado es similar al obtenido a partir de las observaciones experimentales lo que demuestra que tan certero es el modelo en comparación con los análisis reales.

La media de las anomalías es de 0.4 ± 1.3 °C, siendo el 62.2 % de los valores superiores a cero, de los cuales el 12.2 % superan los 2 °C de diferencia. Los años ochenta, noventa y la última década del presente siglo coinciden con las mayores anomalías.

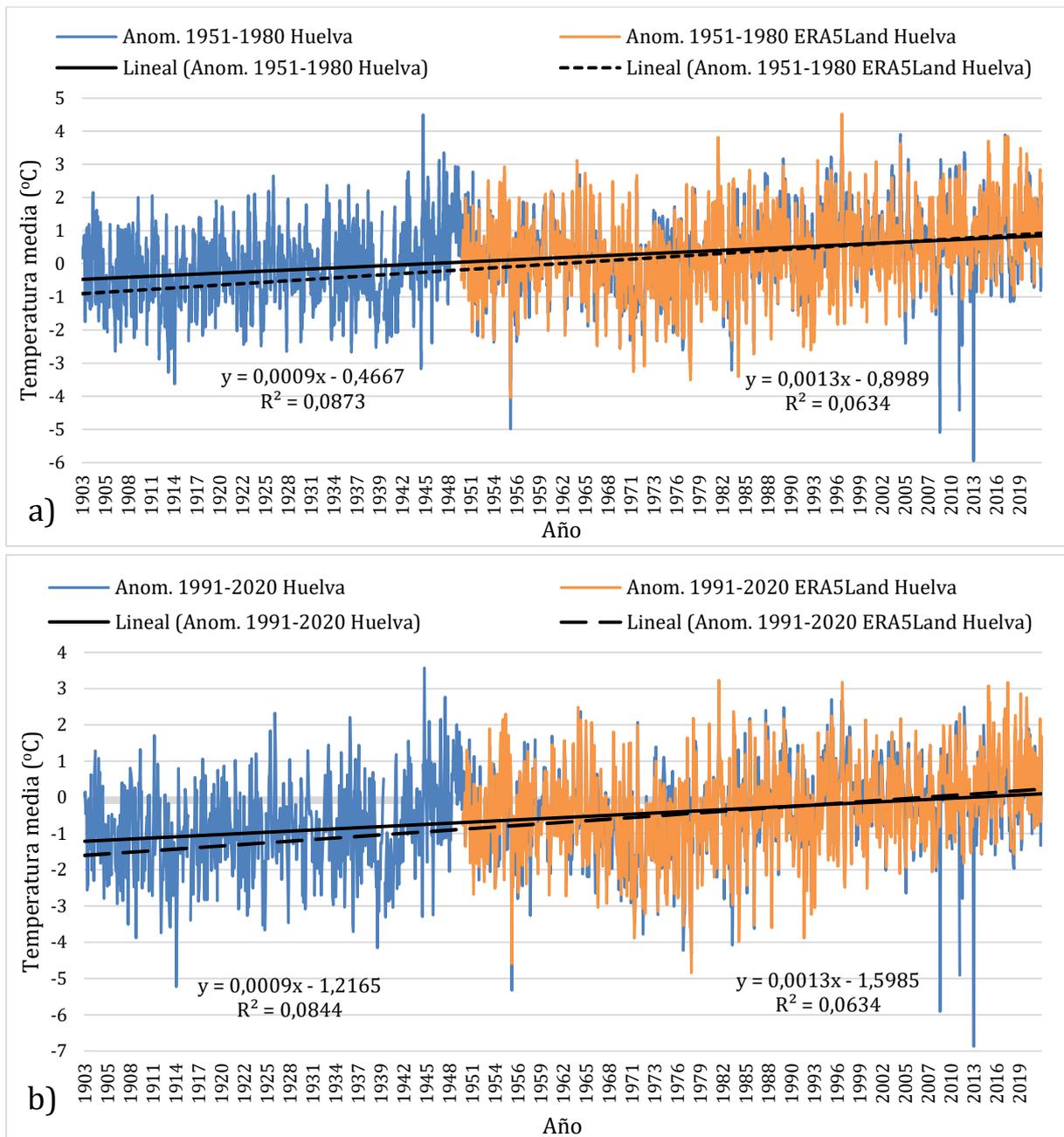


Figura 10: Evolución de las anomalías de las temperaturas medias y de las tendencias para Huelva de 1903-2021 y ERA5-Land Huelva de 1950-2021 con respecto (a) al período de referencia 1951-1980 y (b) al período de referencia 1991-2020.

En la figura 10b se muestra la evolución de las anomalías con respecto al período de referencia 1991-2020. La tendencia de las anomalías de Huelva con respecto a este período de referencia es de 0.11 ± 0.01 °C por década al igual que sucede con el período de referencia analizado anteriormente (1951-1980), lo que indica un comportamiento igual, pues sus pendientes son coincidentes.

Al calcular la media de las anomalías se obtiene -0.6 ± 1.3 °C con respecto al período de referencia 1991-2020, lo que indica que los valores medios para cada mes de dicho intervalo son superiores a las medias del período 1951-1980, por ello el 64.8 % de los valores de anomalías se encuentran por debajo de cero, de los cuales el 14.1

% del total poseen anomalías inferiores a $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los años 2014, 2015, 2016, 2017 y 2020 también superan las anomalías de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ con respecto a este período.

La tendencia de la anomalía para los datos extraídos del ERA5-Land es de $0.16 \pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década con respecto al período de referencia 1991-2020, lo que demuestra la similitud del modelo con los valores de temperaturas obtenidos de las estaciones sometidas al estudio. El 39.2 % de las anomalías son positivas y la media de las anomalías es de $-0.3 \pm 1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ que, aunque es negativa sigue siendo creciente a pesar de que sus valores sean inferiores con respecto al período 1951-1980.

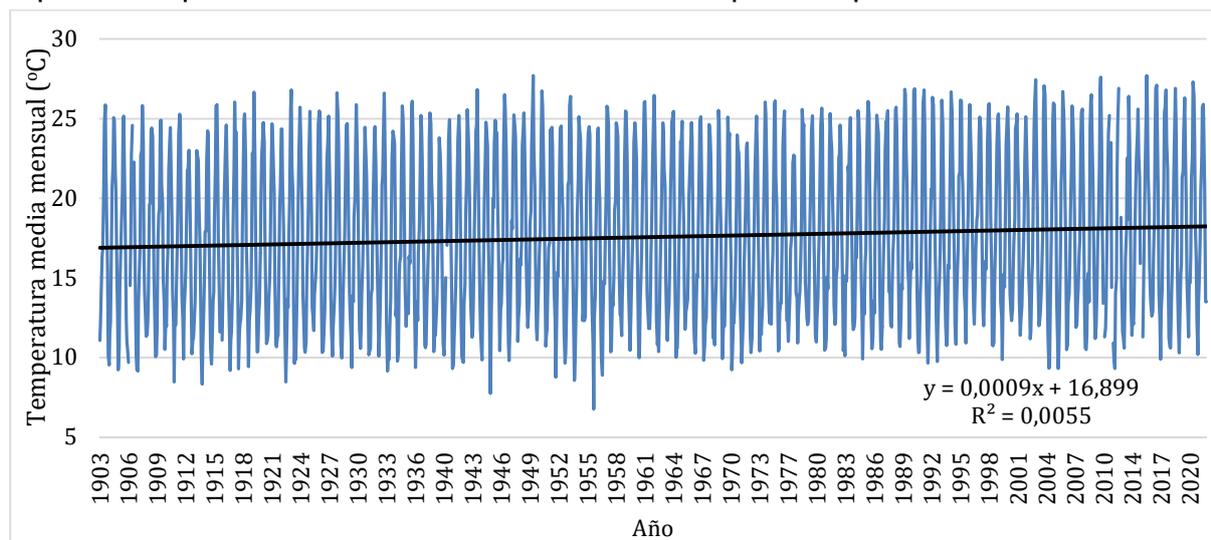


Figura 11: Evolución de la temperatura media mensual de Huelva, 1903-2021.

En la Figura 11 se calcula la tendencia de las medias mensuales de la serie experimental de Huelva para el período 1903-2021, obteniéndose $0.11 \pm 0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década, al igual que la tendencia obtenida de las anomalías.

A continuación, se realiza el análisis del comportamiento de las anomalías para el observatorio de El Arenosillo, a partir de los datos extraídos de ERA5-Land que corresponden al período 1950-2021 (Figura 12).

En la Figura 12a se calculan las anomalías con respecto al período de referencia 1951-1980 donde la media de las anomalías es de $0.4 \pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo el 63.1 % de las anomalías positivas, de las cuales el 8 % del total superó la anomalía de $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La tendencia de las anomalías con respecto al período de referencia 1951-1980 resultó ser de $0.14 \pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década.

Por su parte, en la Figura 12b se muestran las anomalías con respecto al período de referencia 1991-2020 donde la media de las anomalías es de $-0.3 \pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el 62.4 % de los datos negativos, por eso la línea de tendencia de la temperatura se encuentra casi en su totalidad por debajo del eje cero. La tendencia de las anomalías con respecto al período 1991-2020 resulta ser de $0.14 \pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ por década.

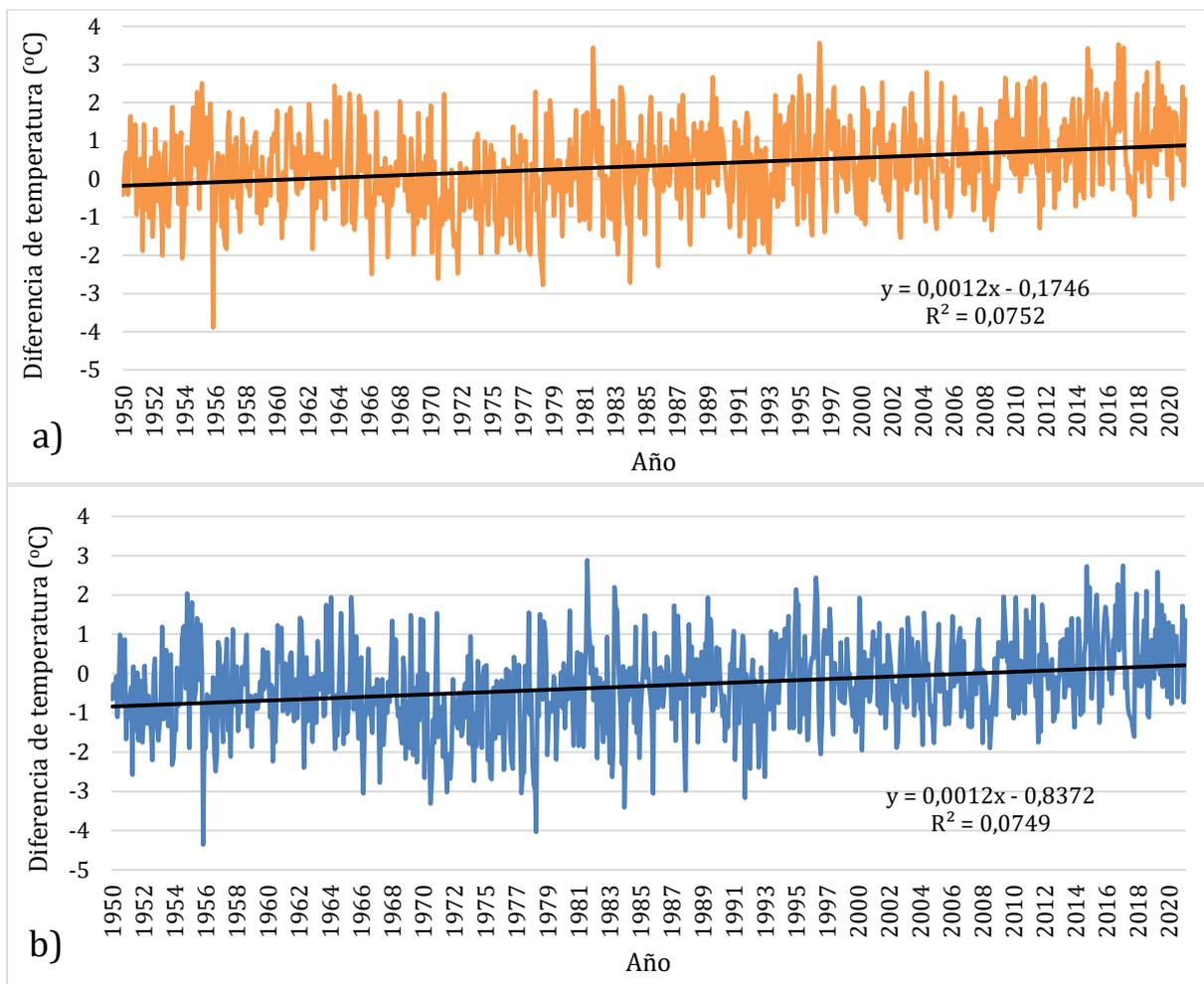


Figura 12: Evolución de las anomalías de las temperaturas medias y de las tendencias para ERA5-Land El Arenosillo de 1950-2021 con respecto al período de referencia 1951-1980 (a) y con respecto al período de referencia 1991-2020 (b).

Ha sido calculada en la Figura 13 la tendencia de las medias mensuales de los datos extraídos del ERA5-Land correspondiente a El Arenosillo, resultando ser de 0.16 ± 0.08 °C por década muy similar a la tendencia obtenida de las anomalías.

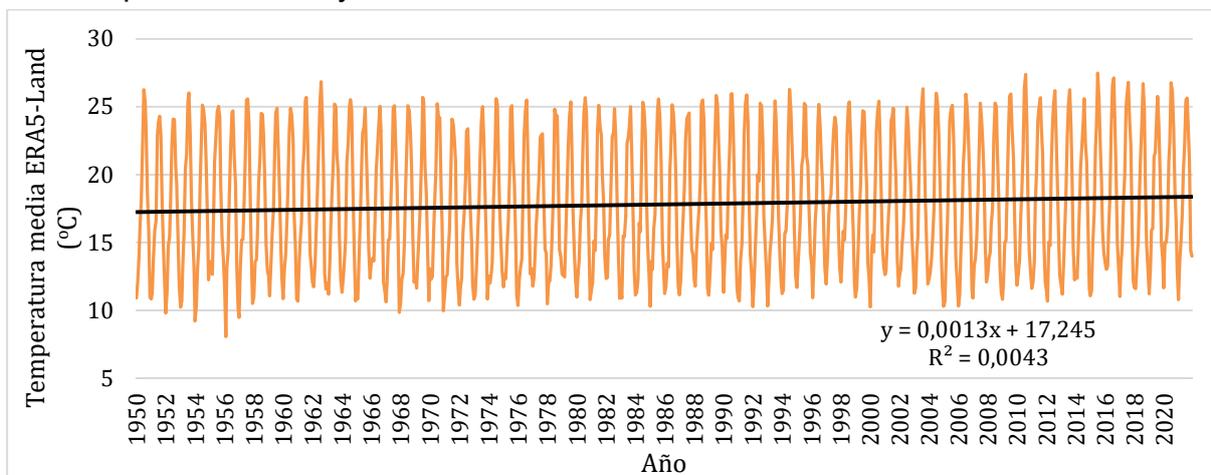


Figura 13: Evolución de la temperatura media mensual a partir de los datos extraídos de ERA5-Land, 1950-2021

Luego de analizar las series de Huelva y El Arenosillo, tanto para las medias mensuales de los datos experimentales como para las obtenidas a través del ERA5-Land con respecto a dos períodos de referencia importantes. El intervalo de años desde 1951-1980, período con el que se realizan los estudios que abordan el cambio climático en el planeta con respecto al pasado y el período 1991-2020, más usado en la actualidad para conocer dichos cambios con respecto al presente siglo.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las tendencias analizadas:

Tabla 1: Tendencia de la temperatura ($^{\circ}\text{C dec}^{-1}$) para las anomalías mensuales obtenidas con las observaciones de Huelva (Obs Hue) considerando como referencia los períodos 1951-1980 (Ref: 51-80) y 1991-2020 (Ref: 91-20), similar para los datos de reanálisis de ERA-Land extraídos para Huelva (ERA5 Hue) y El Arenosillo (ERA5 ARE).

Tendencias	1903-2021	1950-2021
Obs Hue Ref: 51-80	0.11 ± 0.01	-
Obs Hue Ref: 91-20	0.11 ± 0.01	-
ERA5 Hue Ref: 51-80	-	0.16 ± 0.02
ERA5 Hue Ref: 91-20	-	0.16 ± 0.02
ERA5 ARE Ref: 51-80	-	0.14 ± 0.02
ERA5 ARE Ref: 91-20	-	0.14 ± 0.02

Las tendencias de las anomalías presentan una evolución creciente, señal de que la temperatura en los dos puntos analizados está aumentando por década y con igual pendiente para ambos períodos de referencia que se analiza 1951-1980 y 1991-2020. Además, los datos extraídos de ERA5-Land para estos dos puntos resultaron ser similares a los obtenidos a partir de los datos de las estaciones con una pequeña sobrestimación en la temperatura media mensual.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

Este Trabajo de Fin de Máster inició dándole tratamiento a uno de los principales problemas que afronta la humanidad actualmente que es el cambio climático y su influencia en el desarrollo de la vida en el planeta. La variable temperatura es uno de los principales factores en los que se reflejan las variaciones en el medio ambiente. De forma general, el planeta se está calentando, pero no en igual medida en todas las regiones. En el Acuerdo de París del año 2015 se estableció que el calentamiento global no debía superar los 2 °C. Nuestro estudio se sincronizó en esta temática con el objetivo de conocer cuánto ha ascendido la temperatura en el suroeste de la península Ibérica.

El objetivo principal de este estudio consistía en conocer el comportamiento y evolución de las temperaturas en la región del suroeste de España, usando datos de Huelva y El Arenosillo. A partir de los valores de temperaturas mensuales mínimas, medias y máximas para Huelva de 1903 a 2021, proporcionados por AEMET y los valores medios mensuales de temperatura para El Arenosillo de 2000 a 2021, proporcionados por el INTA, y los descargados del modelo de reanálisis ERA5-Land. Estos datos corroboran la hipótesis de que la temperatura está aumentando en la región, si bien no tan rápido como en otras regiones del planeta.

Para ello fue necesario ir dando respuesta a los objetivos específicos que fueron planteados en un inicio al analizar la evolución mensual promedio de la temperatura en el período de 119 años estudiados (1903-2021). La ciudad de Huelva presentó una curva habitual, donde los primeros y los últimos meses de los años la temperatura fue menor y de forma inversa para el resto de los meses con una media de 17.6 °C, típica de un clima Mediterráneo. En promedio, los meses de verano alcanzaron temperaturas máximas de unos 32 °C, mínimas de 18 °C. La temperatura media fue de aproximadamente 25 °C. Por otro lado, los meses invernales presentaron valores máximos alrededor de 16 °C, mínimos de 6 °C y un promedio de 11 °C.

La comparativa entre la evolución de los valores medios mensuales de temperatura de la serie de Huelva y El Arenosillo desde el 2000 hasta el 2021 mostró un coeficiente de correlación positivo de 0.977 lo que indica un comportamiento general similar entre ambas a pesar de la diferencia entre sus entornos. La diferencia promedio entre Huelva y El Arenosillo fue de 1.0 ± 1.2 °C, oscilando entre 0 y 2.2 grados, indicando que la ciudad de Huelva presenta temperaturas más elevadas asociado a su posición en una zona urbana.

Por otra parte, la colección de reanálisis ERA5-Land mostró un coeficiente de correlación de casi 0.99 muy cercano a la unidad, al compararse con ambas series en igual período de estudio. Los resultados indicaron que los datos de reanálisis de ERA5-Land están sobrestimando la temperatura, en media mensual, siendo la diferencia mayor en Huelva que en El Arenosillo.

Las tendencias de las anomalías de las temperaturas medias para Huelva demostraron el aumento gradual por década. A partir del análisis de los valores experimentales y los datos extraídos de ERA5-Land con respecto a los períodos de

referencia 1951-1980 y 1991-2020 se obtuvo un incremento de 0.11 ± 0.01 °C y 0.16 ± 0.02 °C por década, para las anomalías de las temperaturas medias de la estación de Huelva y las del ERA5-Land respectivamente, para ambos períodos de referencia. En El Arenosillo la tendencia de las anomalías del ERA5-Land dieron como resultado un aumento en 0.14 ± 0.02 °C por década con respecto a ambos períodos de referencia 1951-1980 y 1991-2020.

La investigación que se ha realizado queda abierta para futuras líneas de trabajo donde se pudiera analizar más en profundidad los picos de los valores atípicos extremos que se obtuvieron, comenzando con un análisis a partir de los valores horarios. En el mismo se ha trabajado con la estación de Huelva y el observatorio atmosférico de El Arenosillo, pero sería interesante realizar comparativas con otras estaciones o con varios puntos donde se muestrea a diario la temperatura dentro de la ciudad de Huelva. Además, con la realización de este estudio se amplía la información de la región para la consulta de científicos e investigadores y sirve de ejemplo para la realización de trabajos similares que busquen conocer cuánto ha aumentado la temperatura en otras regiones del planeta. Con los resultados obtenidos cada región podrá adoptar medidas de adaptación y mitigación al cambio climático en mayor o menor rigor dependiendo de sus resultados específicos.

REFERENCIAS

- Adame, J.A. (2002) *Estudio meteorológico de la ciudad de Huelva y su entorno durante el año 2000*. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Huelva.
- Adame, J.A. et. Al (2012) *Capa superficial atmosférica en un entorno costero: medidas en una torre de 100 m (El Arenosillo)*. Tethys Revista de meteorología y climatología mediterránea. Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva.
- AMAP (2017) *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA)*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.
- Caro Poza, B. (2018) Trabajo de Fin de Máster: *Análisis de las variaciones el clima en la España Peninsular*. Facultad de Estudios Estadísticos. Universidad Complutense de Madrid.
- Casana, S.G. (2015) *Estudio de tendencias de parámetros atmosféricos en el Parque Nacional Doñana*. Universidad Internacional de Andalucía – Universidad de Huelva.
- Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.A., Vicente Serrano, S.M., Lanjeri, S., de Luis Arrillaga, S. M., González-Hidalgo, J.C. (2006). *Clima, sociedad y medio ambiente*. Zaragoza: Asociación Española de Climatología, 1-9
- Dai, A., Lua, D., Song, M. and Liu, J. (2019) *Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO₂*. Nature Communications, 10: 121.
- De Castro, M. (2016) *Sobre las bases científicas del cambio climático antropogénico*. Universidad de Castilla-La Mancha. Revista Ambienta 114, 44-53
- Doblas-Reyes, F.J., Sörensson, A.A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W.J., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W.-T., Lamptey, B.L., Maraun, D., Stephenson, T.S., Takayabu, I., Terray, L., Turner, A., Zuo, Z. (2021): vinculación del cambio climático global con el regional. *El Cambio Climático 2021: La Base de la Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L. Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EE. UU., 1363–1512, doi:10.1017/9781009157896.012.
- Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Bousssetta, S., Komori, T., Hirahara, S., Balsamo, G. (2020) *Environmental Lapse Rate for High-Resolution Land Surface Downscaling: An Application to ERA5*, Earth Space Sci., 7, e2019EA000984.
- Equihua Zamora, M., Hernández Huerta, A., Pérez Maqueo, O., Benítez Badillo, G., Ibáñez Bernal, S. (2016) *Cambio Global. El Antropoceno*. Universidad Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. Ciencia ergo-sum, ISSN 1405-0269, 23(1), 67-75

- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ECMWF (2019). *ERA5-Land hourly data*
<https://data.opendatascience.eu/geonetwork/srv/api/records/601ea08c-0768-4af3-a8fa-7da25fb9125b>
- Fernández-Reyes, R. (2016) *El Acuerdo de París y el cambio transformacional*. Revista Papeles de relaciones ecosociales y cambio global 132, 101-114
- Hannart, A. (2014) *Une température globale a-t-elle un sens? Peut-on la calculer?*
<http://www.climat-en-questions.fr/reponse/evolution-actuelle/temperature-globale-par-alexis-hannart>.
- Hernández, M.A. (2012) *Caracterización meteorológica y modelización de Andalucía Occidental*. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Huelva.
- Hulme, M. & Mahony, M. (2010) *Climate change: What do we know about the IPCC?* Progress in Physical Geography: Earth and Environment 34(5), 705-718
doi: 10.1177/0309133310373719
- Iglesias González, M. (2019) *Variabilidad Climática del Noroeste de la Península Ibérica durante los últimos 1500 años, descrita por espeleotemas de diversas cuevas del Principado de Asturias*. Departamento de Geología. Universidad de Oviedo.
- IPCC (2018) *Informe Especial sobre el Calentamiento Global de 1,5°C*.
- Lieberman, B. (2021) *1.5 or 2 degrees Celsius of additional global warming: Does it make a difference?* Yale Climate Connections
- Lobato-Sánchez, R., & Altamirano-del-Carmen, M.A. (2017). *Detección de la tendencia local del cambio de la temperatura en México*. Tecnología y ciencias del agua, 8(6), 101-116. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-07>.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., et al., eds. (2021). *Summary for policymakers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 1–41.
- Meriño, A. (2022) *La evolución de la temperatura global desde 1950*. Revista Digital <https://elordenmundial.com/mapas-y-graficos/evolucion-temperatura-global/>
- Ming, A., Rowell, I., Lewin, S., Rouse, R., Aubry, T., & Boland, E. (2021). *Key messages from the IPCC AR6 climate science report*. Cambridge Open Engage. doi:10.33774/coe-2021-fj53b
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico MITECO. (2020) *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030*.
- Muñoz-Sabater, J., (2019) *Datos por hora de ERA5-Land desde 1981 hasta la actualidad*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:10.24381/cds.e2161bac
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., Thépaut, J.-N. (2021) *ERA5-Land: un conjunto de datos de reanálisis global de última*

generación para aplicaciones terrestres, Earth Syst. Sci. Data, 13, 4349–4383, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.

- OMM (2017) *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas*.
- Ortega, M.T., Mora, C.G., Labajo, J.L. & Labajo, A.L. & Piorno, A., Martín, Q. (2001) *Tendencias recientes de las frecuencias de los valores extremos de temperatura en la región Castilla y León*. Departamento de Geografía. Universidad de Valladolid; Departamento de Física General y de la Atmósfera. Universidad de Salamanca; Departamento de Estadística. Universidad de Salamanca.
- Pérez Burgos, S. (2019) *Análisis comparativo sobre la adaptación al cambio climático en Europa y España*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
- Quereda Sala, J., & Montón Chiva, E. (2022). *Las tendencias actuales de la temperatura en las regiones de Valencia y Murcia entre 1950 y 2020*. Investigaciones Geográficas. <https://doi.org/10.14198/INGEO.20670>.
- Rull, V. (2018) *El Antropoceno*. Madrid: CSIC, Consejo Superior de Investigaciones Científicas <http://digital.casalini.it/9788400103156>
- Sánchez-Laulhé Ollero, J.M., Mora García, M.A., Roa Alonso, A., Botey Fullat, R., Rey Vidaurrázaga, J., Núñez Mora, J.A., Franco Manzano, F., del Campo Hernández, R., Sanz Barajas, R. (2020) *Informe del Estado del Clima en España 2019*. Agencia Estatal de Meteorología.
- Schoolmeester, T., Gjerdi, H.L., Crump, J., Alfthan, B., Fabres, J., Johnsen, K., Puikkonen, L., Kurvits, T. and Baker, E. (2019) *Global Linkages – A graphic look at the changing Arctic* (rev.1). UN Environment and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal. www.grida.no
- Sigró, J., Brunet, M., Aguilar, E., (2007) *Evolución de la temperatura máxima estival en España. Parte I: Tendencias y Patrones espaciales*. Grupo de Investigación del Cambio Climático, Universitat Rovira i Virgili, Climate Research Unit, university of East Anglia.
- SROCC; IPCC (2019) *Informe especial sobre el océano y la criosfera en un clima cambiante*.
- World Meteorological Organization (2021) *State of Global Climate 2021*

ANEXOS

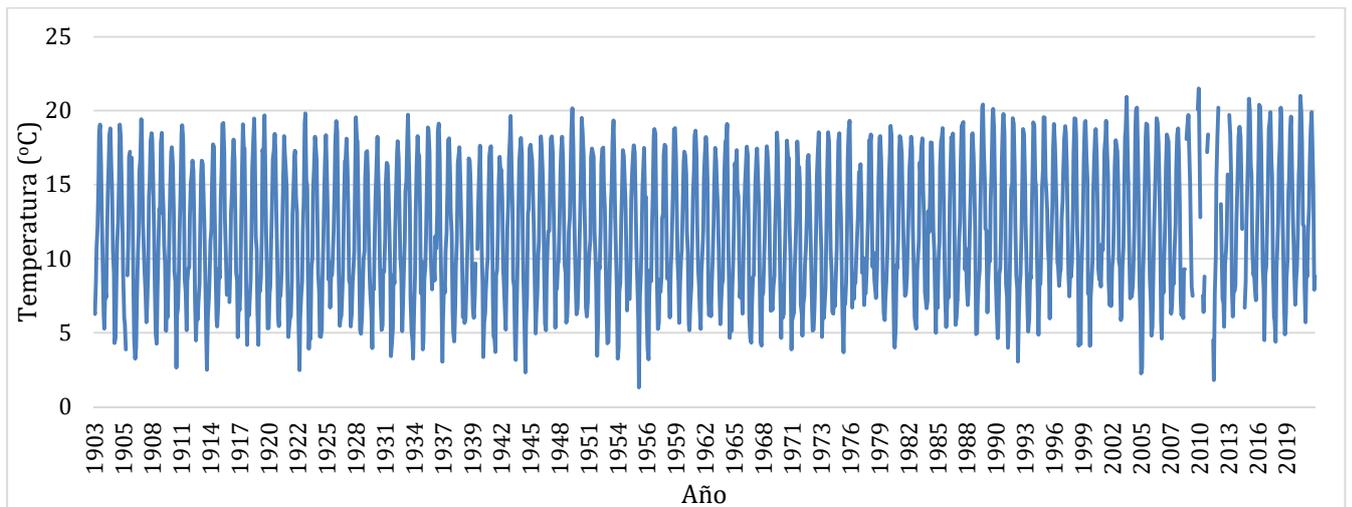


Figura 1: Evolución de las temperaturas mínimas mensuales en Huelva 1903-2021

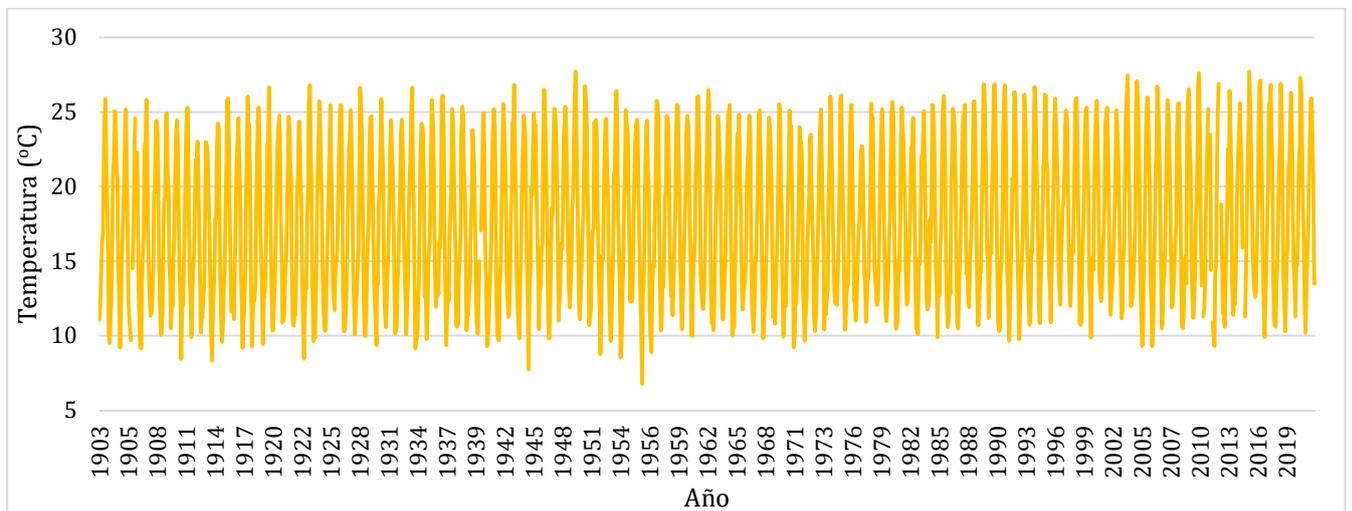


Figura 2: Evolución de las temperaturas medias mensuales en Huelva 1903-2021

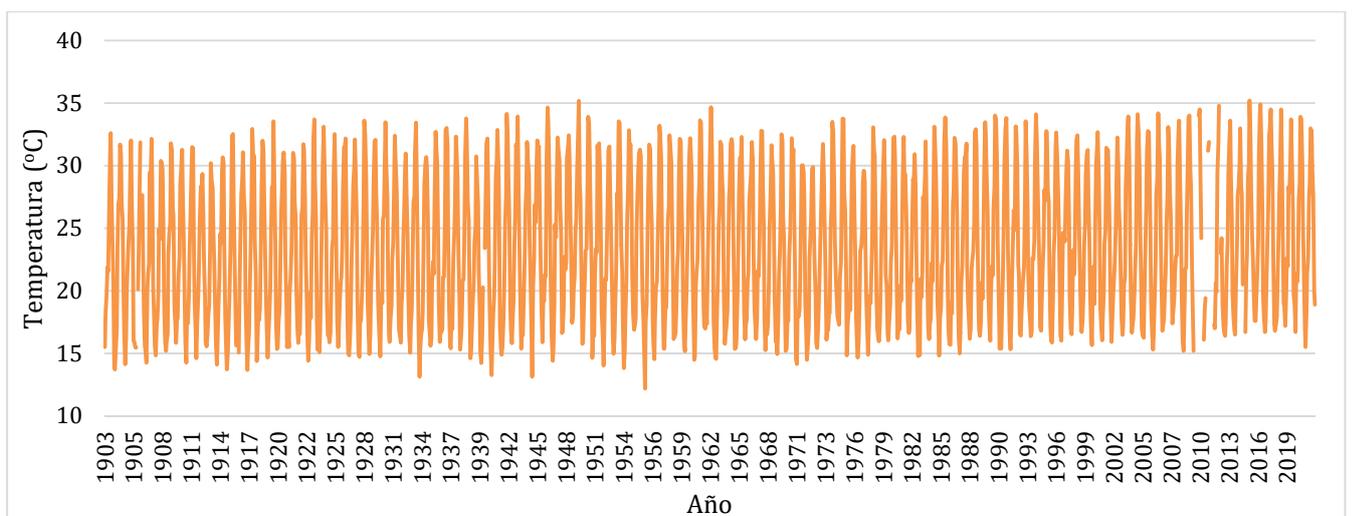


Figura 3: Evolución de las temperaturas máximas mensuales en Huelva 1903-2021

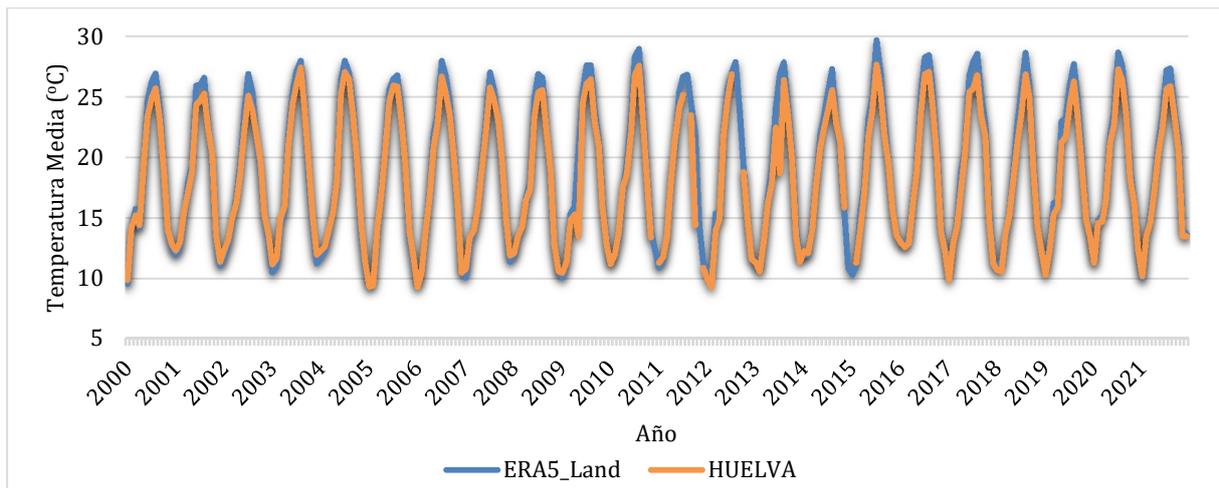


Figura 4: Comparativa de la serie de temperaturas medias de Huelva y ERA5-Land, 2000-2021

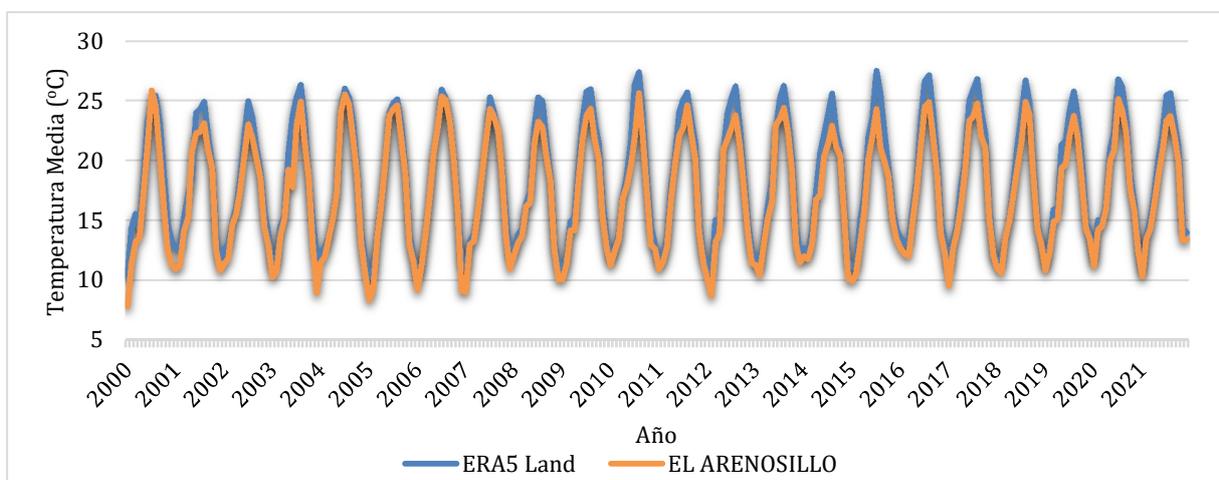


Figura 5: Comparativa de la serie de temperaturas medias de El Arenosillo y ERA5-Land, 2000-2021