



Tesis doctoral

**El clima del suroeste de Iberia en los
últimos siglos: nuevas aportaciones**

Nieves Bravo Paredes

Programa de Doctorado en Modelización y Experimentación
en Ciencia y Tecnología (R007)

Conformidad de los directores

José Manuel Vaquero Martínez

María Cruz Gallego Herrezuelo

Esta tesis cuenta con la autorización de los directores de la misma y de la Comisión Académica del programa. Dichas autorizaciones constan en el Servicio de la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Extremadura.

2023

- ¿Qué quieres ser de mayor?

La niña pensó concienzudamente durante unos segundos.

- Maestra – soltó con una gran sonrisa.

Con tan solo 5 años, aquello resultaba un juego para esa niña. Cada año que pasaba la respuesta cambiaba: quiero ser periodista, arqueóloga, delineante, estudiar historia... Y, al final, resultó ser algo que no estaba en esa lista: física.

Se sobreentiende que esa pregunta implica dar una respuesta sobre qué profesión te gustaría ejercer en un futuro, pero puede ser contestada de otras formas posibles. Por ejemplo, si a esa niña de 5 años le volvieran a hacer esa pregunta, hoy contestaría:

“De mayor quiero ser como María Antonia y Abdón, los mejores padres que cualquiera podría desear. Gracias a ellos soy la persona en la que me he convertido y ellos han hecho posible todo lo que tengo. Y, por supuesto, también me gustaría ser como mis hermanos, Antonio y Juan Fernando, porque ellos me enseñaron a soñar, a jugar, a reír, a disfrutar con ellos. Me enseñaron que siempre estarían ahí cuando los necesitase. Y, aunque no he vivido 29 años con Vanesa, sé que es una persona maravillosa y podré contar con ella y Beatriz lo será también.”

A ellos, simplemente, gracias.

Agradecimientos

Me gustaría poder agradecer a todas las personas que me han acompañado en este camino, pero me vais a perdonar por no nombraros a todos. Me supondría rellenar toda esta tesis solo con vosotros, lo que me alaga enormemente y me siento afortunada por tener a tantas personas cerca de mí. Pero sí me gustaría mencionar a alguno de vosotros.

Me gustaría agradecer a José y Maricruz, mis directores, por ofrecerme la posibilidad de hacer esta tesis. Por toda la ayuda y consejos que me han brindado durante todos estos años y por su disponibilidad, por los ánimos y la motivación proporcionada para llevar a cabo esta investigación. Por supuesto, este trabajo ha salido adelante gracias a vosotros.

A todos los miembros del antiguo grupo AIRE por la acogida, por la ayuda prestada y las innumerables preguntas que les he ido formulando a lo largo del tiempo. Por las interminables e inolvidables cuchipandas prepandemia y las incalculables charlas de la vida, en general, de apoyo, consejos y ánimos. Y al nuevo grupo incipiente SpES por seguir en la misma línea.

A todos los coautores de los artículos producidos durante esta tesis por sus aportaciones, sus distintos puntos de vista y por ayudar a hacerlo posible. A la Agencia Estatal de Meteorología por la ayuda prestada, disponibilidad y facilidad para la consulta de los cuadernos de observación de los que se han extraído algunas series meteorológicas usadas en esta tesis. Y a la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades) por financiar esta tesis con el contrato predoctoral PRE2018-084897 del proyecto CGL2017-87917-P y a la Junta de Extremadura con el proyecto IB20080 y las ayudas a grupo GR18097 y GR21080.

Tener dos hermanos académicos como vosotros, Víctor y Alejandro, ha sido una de las mejores cosas de toda esta etapa, incluso antes de ella. Las interminables charlas, risas y mil historias han sido un soplo de aire fresco. La prima académica Nines también nos ha acompañado en muchas de estas anécdotas, y a mí personalmente en las pequeñas conversaciones de cada día, que suponían un descanso necesario. También a los compañeros de despacho y a la sección joven del grupo SPhinX por los buenos ratos entre horas y durante las celebraciones.

Y, por último, pero no menos importante, me gustaría agradecer a Juanjo el haber estado y el haberme prestado su ayuda durante todo este tiempo. A Isa, que 800 km para nosotras no son nada, y siempre que la he necesitado ha estado para mí y más. A Lidia, Pilar y Fran por suponer un respiro de todo esto. Una parte de esta tesis ha salido adelante gracias a vosotros, por haberme mantenido cuerda.

Lo que no se da, se pierde

Proverbio indio

Índice

Resumen	13
Capítulo 1 El clima del suroeste de la Península Ibérica	15
1. Introducción	17
2. El clima actual del suroeste de la Península Ibérica y los factores que lo determinan	20
2.1. Principales modos de variabilidad climática	23
2.1.1. La Oscilación del Atlántico Norte	23
2.1.2. El patrón del Atlántico Este	25
Capítulo 2 Fuentes documentales y datos meteorológicos encontrados	27
1. Introducción	29
2. Antecedentes en el rescate de datos a partir de fuentes documentales en la PI.....	29
3. Tipos de fuentes documentales usadas	31
3.1. Anales científicos.....	31
3.2. Informes técnicos.....	32
3.3. Monografías.....	34
3.4. Manuscritos.....	35
3.5. Periódicos.....	36
3.6. Revistas.....	39
3.7. Libros.....	40
3.8. Archivos eclesiásticos.....	40
Capítulo 3 Datos <i>proxy</i>	43
1. Rogativas.....	45
1.1. Introducción	45
1.2. Anomalías en el índice NAO.....	48
1.3. Tablas de contingencia	49
1.4. Base de datos de rogativas <i>pro-pluvia</i>	54
2. Precio del cereal	54
2.1. Introducción	54

2.2. Precio del cereal en el suroeste de la PI	55
Capítulo 4 Datos de eventos extremos. Riadas	59
1. Introducción.....	61
2. Clasificación de las riadas.....	63
3. Estimación del caudal	65
4. Distribución temporal de los eventos de riadas.....	69
5. Condiciones de la circulación atmosférica a gran escala.....	70
Capítulo 5 Datos meteorológicos.....	73
1. Introducción.....	75
1.1. Control de calidad	75
2. Base de datos de Extremadura.....	77
2.1. Introducción.....	77
2.2. Control de calidad	77
2.3. Acceso a la base de datos.....	78
2.4. Descripción del conjunto de datos.....	78
3. Medidas actinométricas	81
3.1. Introducción.....	81
3.2. Tendencia de los datos actinométricos	83
4. Datos de San Fernando (Cádiz)	85
4.1. Introducción.....	85
4.1. Acceso al conjunto de datos.....	86
4.2. Descripción del conjunto de datos SF1799-1813	86
4.3. Control de calidad	89
4.4. Cambio de unidades.....	90
4.4.1. Temperatura.....	90
4.4.2. Presión	90
4.5. Análisis de los datos de presión.....	92
4.6. Análisis de los datos de temperatura.....	94
4.7. Análisis de los datos de viento y del estado del cielo.....	95
4.8. Análisis de los datos de precipitación.....	97

5. Datos de Almada (Portugal).....	98
5.1. Introducción.....	98
5.2. Acceso al conjunto de datos	99
5.3. Descripción del conjunto de datos de Almada	99
5.4. Control de calidad.....	100
5.5. Análisis de las distintas variables	100
Capítulo 6 La huella de grandes eventos en el clima y en el tiempo	107
1. Erupciones volcánicas.....	109
1.1. Introducción.....	109
1.2. Las grandes erupciones desde que existen registros de temperatura.....	110
1.3. La señal de erupciones volcánicas en los datos recuperados	112
1.3.1. Erupción del volcán desconocido de 1809	112
1.3.2. Erupción del Krakatoa	115
1.3.3. Erupción del Katmai.....	116
2. El tiempo durante las guerras.....	116
2.1. Introducción.....	116
2.2. La borrasca durante la batalla de Trafalgar	116
Conclusiones	121
Bibliografía	127
Publicaciones	147
Apéndice A : Tablas del Capítulo 5	149
Apéndice B : Figuras del Capítulo 5	155

Resumen

Conocer el clima del presente y del futuro requiere estudiar el clima del pasado. Para ello se necesitan series largas de observaciones meteorológicas que permitan analizar la variabilidad climática en los siglos anteriores. Aunque, en general, series de temperatura, presión a nivel del mar, precipitación o viento solo están disponibles desde mediados del siglo XIX, se están llevando a cabo muchas iniciativas para recuperar datos meteorológicos preservados en archivos y bibliotecas. La importancia de recuperar estas observaciones yace en extender las series meteorológicas disponibles y ampliar el conocimiento del clima en siglos anteriores. Además de los datos meteorológicos, también son importantes los datos *proxy* documentales, puesto que son indicadores del clima. Por todo esto, en la presente tesis se han recuperado distintas series meteorológicas y datos *proxy* del suroeste de la Península Ibérica. Para llevar a cabo esta tarea se han consultado numerosas fuentes documentales.

Se han recuperado más de 750000 observaciones meteorológicas registradas en distintas poblaciones de la comunidad autónoma de Extremadura y de la localidad portuguesa de Campo Maior. Las observaciones más antiguas recuperadas datan del año 1826. Se ha creado una base de datos llamada CliPastExtrem (v1.0) para recoger todas estas observaciones y ponerlas a disposición de la sociedad y de la comunidad científica. Se han recuperado otras series de datos meteorológicos: una serie actinométrica registrada en Cáceres durante el periodo 1913-1920, una serie meteorológica registrada en distintas variables en el Observatorio de San Fernando para el periodo 1789-1813 y una serie de distintas variables meteorológicas registradas en Almada (Portugal) en 1788-1813.

Respecto a los datos *proxy* documentales, se han recuperado rogativas *pro-pluvia* para estudiar su relación con el índice NAO. Las rogativas recuperadas se celebraron en Extremadura durante el periodo 1824-1931 en distintas poblaciones. Además, se ha recuperado el precio del trigo y de la cebada anotados durante el periodo 1792-1798 en Sevilla, Cádiz, Badajoz y Córdoba para analizar su relación con el clima de esas poblaciones.

Además, se han recuperado eventos extremos, como riadas, y se han analizado las condiciones meteorológicas que podrían haber dado lugar a ellas. Las riadas recuperadas ocurrieron en la población de Badajoz, y la más antigua tuvo lugar en el año 1500.

Finalmente, a partir de los datos meteorológicos recuperados se ha analizado la huella de volcanes y de la borrasca que jugó un papel importante en la Batalla de Trafalgar.

Capítulo 1

El clima del suroeste de la Península Ibérica

1. Introducción

¿Qué es el clima? Esta pregunta podría parecer obvia y, probablemente, cada persona tenga una idea general sobre su respuesta; pero no resulta fácil dar una definición sencilla. Se trata de un concepto complejo puesto que de él dependen muchos factores: uno podría referirse al clima de un punto geográfico en particular o de un área mayor, podría preguntarse sobre el periodo de tiempo a utilizar, si influye el relieve o la distancia al mar, los elementos meteorológicos que quiere caracterizar u otros componentes que podrían tenerse en cuenta. Todas estas consideraciones pueden desembarcar en diferentes ramas de la climatología: la microclimatología, la paleoclimatología, la estadística, la regional, la sinóptica, etc. Por todo ello, para el propósito de esta tesis, se va a dar una definición general del clima de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) que lo define como el conjunto de condiciones medias y la variabilidad de ciertas variables (como la temperatura, la precipitación o el viento) durante un período de tiempo que va desde meses hasta miles o millones de años, siendo el período clásico de 30 años (OMM, 2018).

El clima es el resultado de muchas interacciones entre los distintos elementos de la Tierra. Estos pueden englobarse en cinco componentes que constituyen el sistema climático: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera. El sistema climático está continuamente cambiando debido a las interacciones entre ellos y, también, a factores externos como la variación de la constante solar, las erupciones volcánicas o la acción del ser humano. Por tanto, el clima de la Tierra presenta variaciones. La OMM define la variabilidad climática como las variaciones en el estado medio (y otros momentos estadísticos) del clima en todas las escalas temporales y espaciales (OMM, 2018).

Por todo esto, se necesitan series largas de las variables meteorológicas para poder estudiar la variabilidad climática de la Tierra. Aunque existen referencias al tiempo en escrituras hindúes (1800 a.C.), en poemas de la antigua Grecia (1200 a.C.) o, incluso, escritos específicos sobre meteorología y climatología (*Sobre los aires, aguas y lugares* de Hipócrates (400 a.C.) o *Acerca del cielo: Meteorológicos* de Aristóteles (350 a.C.)), los primeros instrumentos meteorológicos no aparecen hasta el siglo XVII de forma general (Lamb, 1977). Sin embargo, los datos de temperatura en superficie, de la presión a nivel del mar (SLP, del inglés *Sea Level Pressure*), de precipitación o de viento solo están disponibles, en general, desde 1850 (Brönnimann, 2015; Jones y Mann, 2004). No hay inconveniente alguno si se quiere estudiar la variación del clima desde esta fecha. El problema surge cuando se quieren ampliar los conocimientos sobre el clima de miles de años atrás. La razón es que es muy importante conocer el pasado para entender el presente y el futuro. Por esta razón, en la década de 1970 aparece el concepto “*proxy* climático” o “indicador climático o paleoclimático” (Lamarche, 1975) para cubrir la ausencia de registros instrumentales meteorológicos y poder extender los registros climáticos más atrás en el tiempo. Los *proxies*, también llamados “datos *proxy*”, datos indirectos o los mencionados anteriormente, son

indicadores climáticos indirectos, es decir, registros cuya interpretación se basa en principios físicos y biofísicos, que permiten relacionarlos con el clima del pasado. Ejemplos de estos datos indirectos son los anillos de los árboles, los análisis del polen o los núcleos de hielo.

Sin embargo, los registros instrumentales son, de largo, los más fiables de todos los datos climáticos. Están fechados con precisión, y algunos instrumentos meteorológicos no precisan de calibraciones, aunque otros, basados en conceptos físicos, sí (Jones y Mann, 2004). Por esto hay un gran interés en el rescate de datos a nivel global. Hay regiones en todo el mundo donde la recuperación de series de datos meteorológicos de periodos largos ha aumentado significativamente, aunque Brönnimann et al. (2018) destacó la necesidad de agrupar los esfuerzos y coordinarlos. A nivel internacional, se pueden encontrar varias iniciativas para recuperar datos climáticos, como, por ejemplo, Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth (ACRE, <http://www.metacre.org/>) (Allan et al., 2011, 2016), International Data Rescue (I-DARE) (<https://www.idare-portal.org/>) o Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Rescue Service (<https://datarescue.climate.copernicus.eu/>). Además, por supuesto, hay muchas iniciativas a escala regional por todo el mundo. Por ejemplo, Domínguez-Castro et al. (2017) recuperaron más de 300000 datos meteorológicos de América Latina y el Caribe pertenecientes a los siglos XVIII y XIX, Brugnara et al. (2020) recuperaron datos meteorológicos de 40 estaciones de Suiza para el periodo 1708-1873 y Ashcroft et al. (2018) recuperaron alrededor de 8 millones de observaciones por toda Europa y el sur del Mediterráneo para el periodo 1877-2002.

Gracias a todos estos esfuerzos por recuperar series meteorológicas, se ha podido estudiar cómo varía el clima en los últimos siglos a partir de datos instrumentales de todo el planeta. Han sido varias las instituciones que, independientemente unas de otras, han usado diferentes métodos para recoger y procesar datos de temperatura en superficie de todo el mundo para calcular su temperatura media global. Estas instituciones son, por ejemplo, la Met Office en colaboración con Climate Research Unit (CRU), Goddard Institute for Space Studies (GISS) (que forma parte de la NASA) o National Climatic Data Center (NCDC) (perteneciente a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)). Para calcular la temperatura media global del planeta, estas instituciones han usado decenas de miles de observaciones de temperatura de los últimos 160 años. En la Figura 1.1 se pueden ver los cálculos de anomalías de temperatura global para el periodo 1850-2015 por parte de las tres instituciones nombradas. Las anomalías se calculan teniendo en cuenta la media del periodo 1961-1990. Se puede ver cómo el comportamiento de la temperatura del planeta es similar en las tres series representadas. Además, las tres curvas muestran un aumento desde el siglo pasado, que es más pronunciado a partir de la década de 1970.

Por otra parte, combinando datos instrumentales meteorológicos y datos *proxy*, se puede estudiar cómo varía el clima en milenios anteriores reconstruyendo, por ejemplo, la temperatura en superficie del planeta. Así lo han hecho Neukom et al. (2019) calculando las

anomalías de temperatura respecto al periodo 1961-1990 utilizando distintos métodos (líneas de colores) con filtros de paso bajo de 30 años (Figura 1.2). La forma de estas líneas recuerda a un palo de hockey y esta analogía se ha hecho famosa. Así, la Figura 1.2 muestra un lento enfriamiento hasta, aproximadamente, el 1800 para luego producirse un gran calentamiento durante el siglo XX.

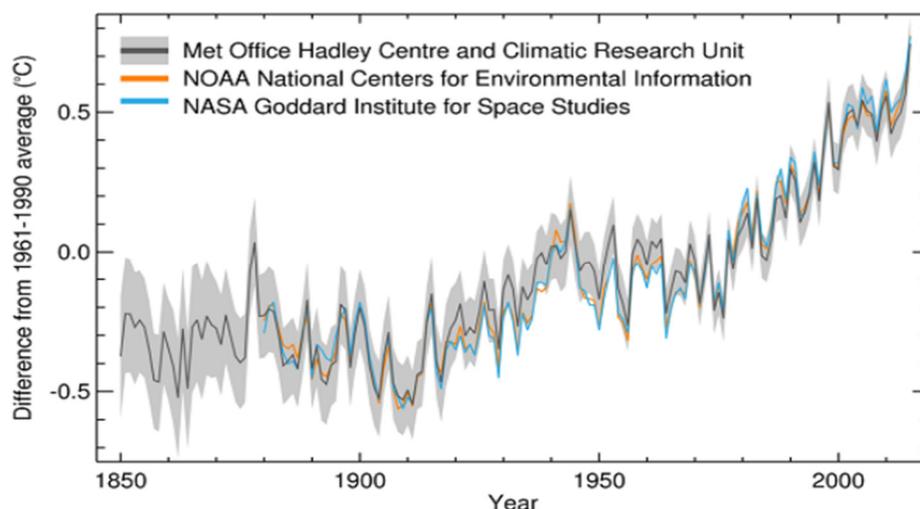


Figura 1.1. Anomalías de temperatura global del planeta para el periodo 1850-2015 de las instituciones Met Office, NOAA y NASA. Las anomalías se calculan a partir de la media del periodo 1961-1990. Imagen extraída de <https://www.metoffice.gov.uk/>.

En la Península Ibérica (PI), el rescate de datos meteorológicos comenzó después de que proyectos similares tuvieran lugar en otros países de Europa. Hubo trabajos de investigación enfocados en digitalizar los datos de principios del siglo XXI que aún no lo estuvieran, por ejemplo (Alcoforado et al., 2012; Brunet y Jones, 2011; Domínguez-Castro et al., 2014a, 2014b). Las investigaciones que se han llevado a cabo en la PI en las dos últimas décadas han hecho que el número de series de largo periodo aumenten considerablemente, sobre todo

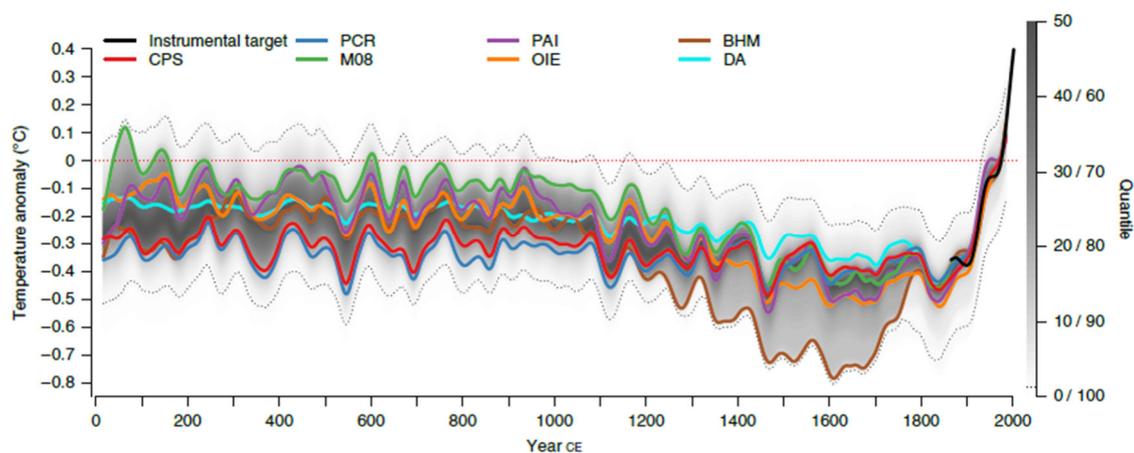


Figura 1.2. Anomalías de temperatura respecto al periodo 1961-1990 utilizando distintos métodos (líneas de colores) con filtros de paso bajo de 30 años. Gráfica extraída de la Figura 1 de Neukom et al. (2019).

de temperatura y precipitación. Pueden citarse algunos ejemplos (Brunet et al., 2006; Domínguez-Castro et al., 2014a; Fragoso et al., 2010; Trigo et al., 2009). En España, hay tres poblaciones con el registro de datos continuo más antiguo: San Fernando (Cádiz), Madrid y Barcelona. La tarea de registrar observaciones meteorológicas en San Fernando comenzó en 1789 (Barriendos et al., 2002; Rodrigo, 2002; Wheeler, 1995). En Madrid, también se pueden encontrar datos desde 1780 (Barriendos et al., 1997) y, por último, en Barcelona comenzaron en 1780 (Barriendos et al., 1997; Rodríguez et al., 2001). En Portugal, las primeras medidas meteorológicas conocidas datan del 1 de noviembre de 1724; fueron tomadas por Diogo Nunes Ribeiro en Lisboa, y este continuó con el registro hasta el 11 de enero de 1725 (Domínguez-Castro et al., 2013). Por otro lado, no solo se han recuperado datos instrumentales meteorológicos, sino que también se han podido recuperar eventos meteorológicos en los últimos siglos (como riadas o sequías) y datos *proxy* (documentales y climáticos). Por ejemplo, Schröder et al. (2018) analizaron los sedimentos del lago Medina (Cádiz) para reconstruir la variabilidad climática desde principios del Holoceno. Estos *proxies* climáticos indicaron un clima árido y cálido a principios del Holoceno (9.5-7.8 cal ka BP (del inglés *calibrated kiloanni before the present*)), con un evento de desecación del lago alrededor de 8.8 cal ka BP y un clima árido y frío en 8.2 cal ka BP. Entre 7.8 y 5.5 cal ka BP, el clima del Holoceno se caracteriza por ser húmedo y registrar el nivel máximo de agua en el lago. Desde mediados hasta el final de Holoceno, se observan eventos secos y una aridificación progresiva.

Para terminar y resumir, hay que decir que, aunque no es posible enumerar, siquiera, todos los esfuerzos que se llevan a cabo en el mundo para recuperar y reconstruir el clima del pasado, se ha intentado dar una visión global de todo el trabajo realizado por la comunidad científica. La importancia y trascendencia de todos estos empeños se pueden hallar en el marco del grave cambio climático. Sin todas estas reconstrucciones del clima del pasado no se sabría si el aumento de temperaturas de las últimas décadas está dentro de las condiciones normales del clima o no. Por tanto, es crucial seguir investigando la variabilidad del clima del pasado para poder conocer mejor los cambios climáticos presentes y futuros.

2. El clima actual del suroeste de la Península Ibérica y los factores que lo determinan

Estudiar el clima del pasado también ha servido para conocer las variables y los factores que determinan el clima de un lugar o una región. Como se ha visto anteriormente, el clima se puede caracterizar y clasificar de distintas maneras dependiendo de los parámetros que se escojan. Vladimir Peter Köppen, en 1884, formuló una clasificación climática mundial basándose en la relación clima-vegetación; los parámetros que usó para establecer las distintas categorías de climas fueron la temperatura y la precipitación. Aunque han pasado

El clima actual del suroeste de la Península Ibérica y los factores que lo determinan

más de 100 años desde la primera formulación de esta clasificación, es una de las clasificaciones climáticas más usadas para caracterizar el clima de las distintas zonas de la Tierra. Esta clasificación ha experimentado sucesivas modificaciones a lo largo de los años, pero, normalmente, se suele utilizar la llamada clasificación Köppen-Geiger (con pequeños cambios), que fue la última revisión del propio Köppen en 1936. Concretamente, se suele utilizar la clasificación actualizada por Peel et al. (2007).

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España y el Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) de Portugal han elaborado conjuntamente el atlas climático de la PI atendiendo a la clasificación Köppen-Geiger para el periodo 1971-2000. En la Figura 1.3 se puede ver el resultado de la elaboración mostrando los distintos climas de la PI. La región de estudio de esta tesis es el suroeste de la PI (aproximadamente la delimitación azul de la Figura 1.3). Esta región engloba a la comunidad autónoma de Extremadura y las provincias andaluzas de Huelva, Sevilla, Córdoba y Cádiz del territorio español; y los distritos de Lisboa, Évora, Beja, Faro, Portalegre y Santarém en Portugal.

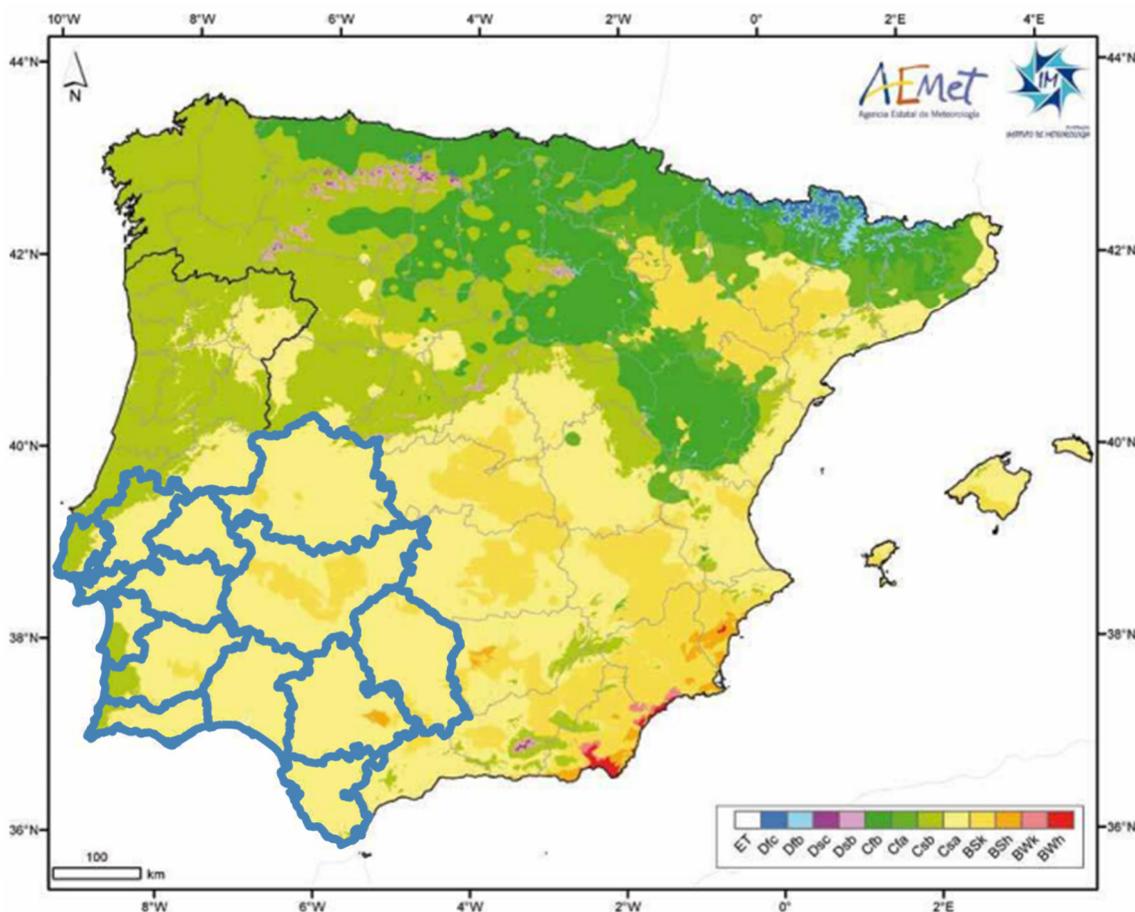


Figura 1.3. Climas de la PI según la clasificación Köppen-Geiger para el periodo 1971-2000. Mapa extraído de <https://www.aemet.es/> y modificado a partir de datos de <https://www.ign.es/>.

Se puede apreciar cómo en el suroeste de la Península se dan, en general, las mismas condiciones climáticas, siendo el clima mediterráneo el más extendido en esta región. El tipo de clima BSh (ver leyenda de la Figura 1.3) es el semiárido cálido y se da en una pequeña región de la provincia de Sevilla; este tipo de clima se caracteriza por tener una temperatura media anual por encima de los 18 °C y predomina el clima seco. El BSk es el clima semiárido frío (o estepario) y se da, mayormente, en la provincia de Badajoz; se caracteriza por tener una temperatura media anual por debajo de los 18 °C y una precipitación anual acumulada entre los 200 y 500 mm. El Csa es el clima mediterráneo típico, y se encuentra por toda la región del suroeste de la Península; se caracteriza por tener una temperatura media por encima de los 22 °C en el mes más cálido y por tener lluvias estacionales. Por último, el Csb es el clima mediterráneo oceánico y se encuentra, sobre todo, en las costas portuguesas de la región de estudio; la temperatura media del mes más cálido no supera los 22 °C, pero sí supera los 10 °C por cuatro o más meses al año, y los meses más cálidos presentan una estación seca.

En la Figura 1.4 se han representado los valores climatológicos normales de las principales ciudades del suroeste de la PI para el periodo 1981-2010¹. La línea negra muestra la temperatura media mensual y las barras grises la precipitación media acumulada mensual. Como se puede ver en esta figura, las climatologías de las ciudades de interior (Badajoz, Cáceres, Córdoba y Sevilla) son muy similares entre sí y las de costa (Cádiz, Huelva y Lisboa), por otra parte, también lo son entre ellas. Las de interior tienen una amplitud térmica más pronunciada que las de costa: los valores del mínimo y máximo de temperatura

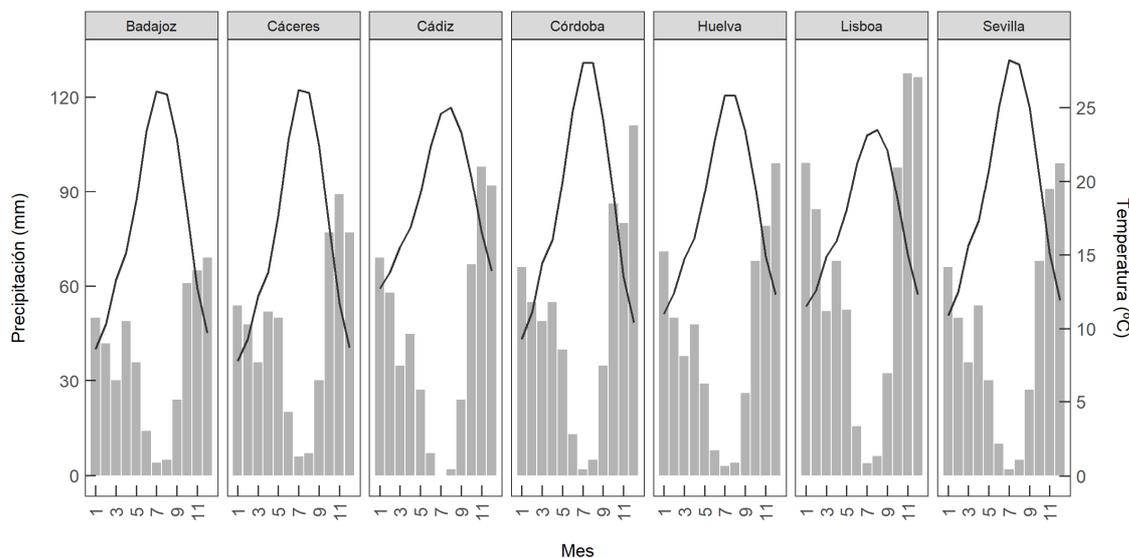


Figura 1.4. Valores climatológicos normales de las principales ciudades del suroeste de la PI para el periodo 1981-2010. La línea negra muestra la temperatura media mensual y las barras grises la precipitación media acumulada mensual.

¹ Datos obtenidos de la AEMET y del IPMA.

son más extremos que los de costa, entre los que no hay tanta diferencia. Además, todas ellas presentan el mismo comportamiento térmico, siendo la estación de verano la más calurosa y la de invierno la más fría. Por otra parte, Badajoz y Cáceres son las ciudades en las que menos precipitación acumulada se registra y Lisboa en la que más. Igual que ocurre con la temperatura, también hay una marcada estacionalidad para la precipitación, que es común a todas las ciudades; el verano es una estación seca y el invierno es la época en la que más precipitación se registra.

2.1. Principales modos de variabilidad climática

Los factores que determinan el clima de un lugar son astronómicos, geográficos y meteorológicos. Entre los factores astronómicos se encuentran la latitud, longitud y los distintos movimientos de la Tierra. Entre los geográficos se encuentran el relieve y el efecto de la continentalidad. Por último, entre los meteorológicos se encuentran factores como los distintos centros de acción, los frentes, la circulación general de la atmósfera o el *jet-stream*. Concretamente, los centros de acción que influyen, principalmente, en el clima del suroeste de la Península son dos: la baja de Islandia y el anticiclón de las Azores. El centro de acción de la baja de Islandia se encuentra en el Atlántico cercano a Islandia, como su propio nombre indica. En invierno se desplaza hacia el Sur y transporta vientos fríos y precipitaciones hacia la Península. Por otra parte, el anticiclón de las Azores se sitúa sobre estas islas y conlleva un tiempo muy estable y seco. En verano se encuentra a la altura de la PI y en invierno se desplaza al Sur permitiendo la entrada de borrascas en esta región.

Estos dos centros de acción mencionados juegan un papel importante en el clima formando patrones, conocidos como modos de variabilidad climática. Un modo de variabilidad climática es un patrón determinado en el espacio y una determinada variabilidad temporal, como consecuencia de las interacciones entre la superficie terrestre y los océanos y la circulación general de la atmósfera. Para estudiar cómo afectan estos modos se han construido distintos índices para evaluar las situaciones meteorológicas asociadas a ellos. A continuación, se van a describir los principales modos de variabilidad climática que influyen en el clima del suroeste de la PI.

2.1.1. La Oscilación del Atlántico Norte

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO, del inglés *North Atlantic Oscillation*) es el principal modo de variabilidad climática en el invierno del Atlántico Norte, y desempeña un papel importante en las variaciones del tiempo y el clima sobre el litoral del Este de América del Norte, el Atlántico Norte y el continente de Eurasia (Hurrell, 1995), siendo su influencia muy importante en el clima europeo (Gouveia et al., 2008; Trigo et al., 2002, 2008). Han sido muchos autores los que han mostrado esta influencia en la PI (Gallego et al., 2005; Goodess y Jones, 2002; Queralt et al., 2009; Rodríguez-Puebla et al., 1998; Trigo et al., 2004; Zorita et al., 1992).

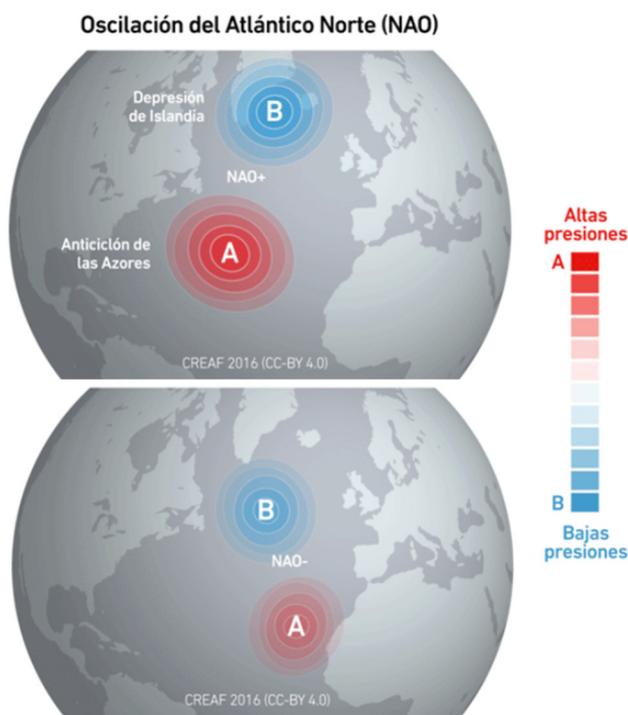


Figura 1.5. Situación de la NAO cuando el índice es positivo (imagen superior) y negativo (imagen inferior). Imagen extraída de <https://blog.creaf.cat/>.

La NAO es la oscilación Norte-Sur del campo de presiones en superficie entre los centros de acción de la baja subpolar de Islandia y la alta subtropical de las Azores; de esta manera, puede ser una medida de la intensidad de los flujos de viento a través del océano Atlántico en el cinturón definido entre 40° N-60° N (Gimeno et al., 2004). Para cuantificarla se ha definido el índice NAO como la diferencia de presiones a nivel del mar entre un punto de Islandia y otro cercano a las Azores. Cuando el índice NAO es positivo, ambos centros están reforzados y desplazados al norte (imagen superior de la Figura 1.5); esta situación se da cuando la presión de superficie es más alta al sur del paralelo de 55° N,

combinada con una amplia región de presión anormalmente baja a través del Ártico. Esta fase lleva asociada fuertes vientos del Oeste en latitudes medias del Atlántico y a través del Noroeste de Europa, con flujos anómalos del Sur sobre el Este de los EEUU y flujos anómalos del Norte a través de Groenlandia, el Ártico de Canadá y el Mediterráneo (Gimeno et al., 2004). Por otro lado, cuando el índice NAO es negativo (imagen inferior de la Figura 1.5), ambos centros están debilitados y desplazados al sur. En este caso, los vientos son menos intensos.

Además, los cambios en los modelos de circulación sobre el océano Atlántico están acompañados por cambios en la intensidad y en el número de borrascas, en sus trayectorias y en el tiempo asociado. La NAO tiene una gran influencia en la variabilidad de las trayectorias de las borrascas. Los inviernos con índice NAO positivo están asociados a un cambio hacia el norte en la actividad de las borrascas en el Atlántico, con un realce de la actividad desde el sur de Groenlandia hacia Islandia y en el Norte de Europa, y un ligero decrecimiento en la actividad en el Sur. En este caso, las borrascas son más intensas y más frecuentes en las proximidades de Islandia y mar de Noruega (Gimeno et al., 2004).

Por tanto, cuando el índice NAO es positivo, aparecen condiciones secas en el clima de la PI debido a que el anticiclón de las Azores bloquea la entrada de borrascas en esta región. Por el contrario, cuando el índice NAO es negativo indica que hay condiciones húmedas en

el clima de la PI. Existe una asociación entre el índice NAO positivo (negativo) y los eventos de sequía (humedad) en la PI, sobre todo en invierno (Gallego et al., 2005; Goodess y Jones, 2002; López-Moreno y Vicente-Serrano, 2008; Pozo-Vazquez et al., 2011; Rodríguez-Puebla et al., 1998).

Una realización de las más utilizadas del índice NAO es la calculada por Jones et al. (1997). Se trata de un índice mensual calculado a partir de la diferencia de datos instrumentales de presión a nivel del mar entre Gibraltar y Reykjavik desde el año 1821. En la Figura 1.6 se representa este índice con los valores medios anuales para el periodo 1821-2017, y se puede ver la gran variabilidad que presenta a lo largo de los años.

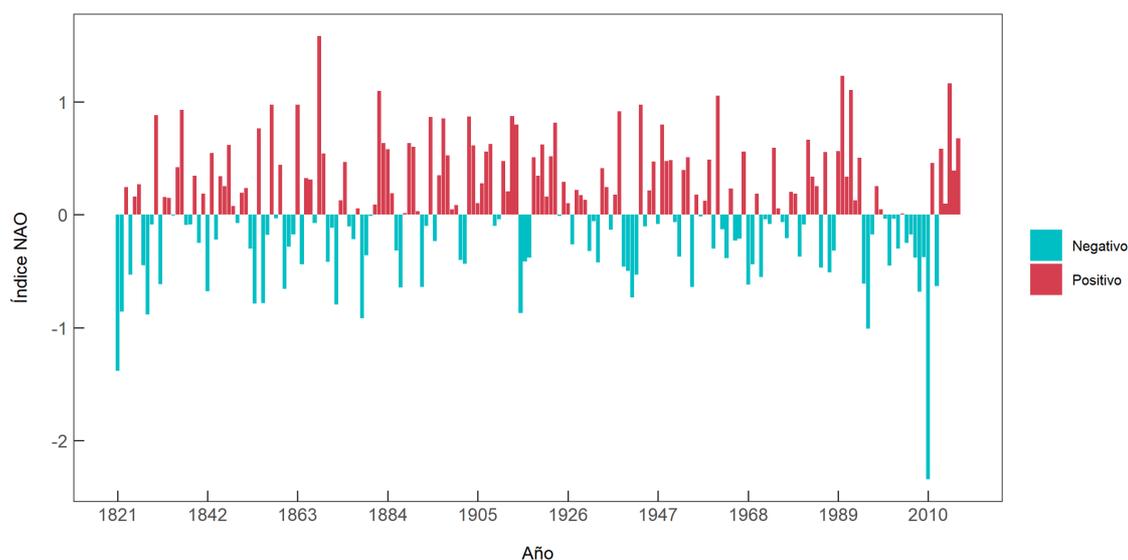


Figura 1.6. Índice NAO medio anual de Jones et al. (1997) para el periodo 1821-2017.

2.1.2. El patrón del Atlántico Este

Después de la NAO, el patrón del Atlántico Este (EA, del inglés *East Atlantic*) es el segundo patrón más importante en el sector del Atlántico Norte, y también juega un papel importante en la determinación del clima de la PI (Jerez y Trigo, 2013; Trigo et al., 2008).

El EA se identificó por primera vez en 1987 (Barnston y Livezey, 1987). Algunos autores describen el EA como un dipolo Norte-Sur en el campo de presiones del Atlántico Norte (Bastos et al., 2016; Chafik et al., 2017); otros autores lo caracterizan como un monopolio bien definido en el campo de presiones en superficie (SLP) entre el sur de Islandia y el oeste de Irlanda, cerca del punto geográfico 52.5° N, 22.5° O (Comas-Bru y Hernández, 2018; Comas-Bru y McDermott, 2014; Moore y Renfrew, 2012; Zubiate et al., 2017). En cualquier caso, la localización del principal centro de acción se encuentra, en todos los casos, a lo largo de la línea nodal de la NAO. Esto puede llevar al desplazamiento de la NAO hacia el sur (Woollings et al., 2010), lo que conlleva condiciones húmedas en el Atlántico Norte.

Al igual que para la NAO, también existen diferentes versiones para cuantificar el índice EA. Una de estas realizaciones del índice EA es el calculado por Comas-Bru y Hernández (2018); se trata de un índice mensual calculado a partir de datos instrumentales de presión a nivel del mar del Observatorio de Valentia (Irlanda, 51.93°N, 10.23°O) desde el año 1866. Para calcular este índice, Comas-Bru y Hernández (2018) han usado la fase positiva del EA como un fuerte centro de anomalías de SLP positivas en la costa de Irlanda; esto está asociado con temperaturas en superficie más bajas en el sur de Europa, condiciones más secas en Europa occidental y más húmedas en el este (Moore y Renfrew, 2012). En la Figura 1.7 se representa este índice con los valores medios anuales para el periodo 1866-2008.

Además de estos dos modos de variabilidad climática del Atlántico Norte también existen otros, como el *East Atlantic/Western Russia pattern* (EA/WR) o el *Scandinavian pattern* (SCA), aunque ya se ha visto que los dos modos principales son la NAO y el EA. Estos dos últimos patrones (EA/WR y SCA) afectan, en mayor medida, a la zona de Eurasia (Barnston y Livezey, 1987; Steirou et al., 2017).

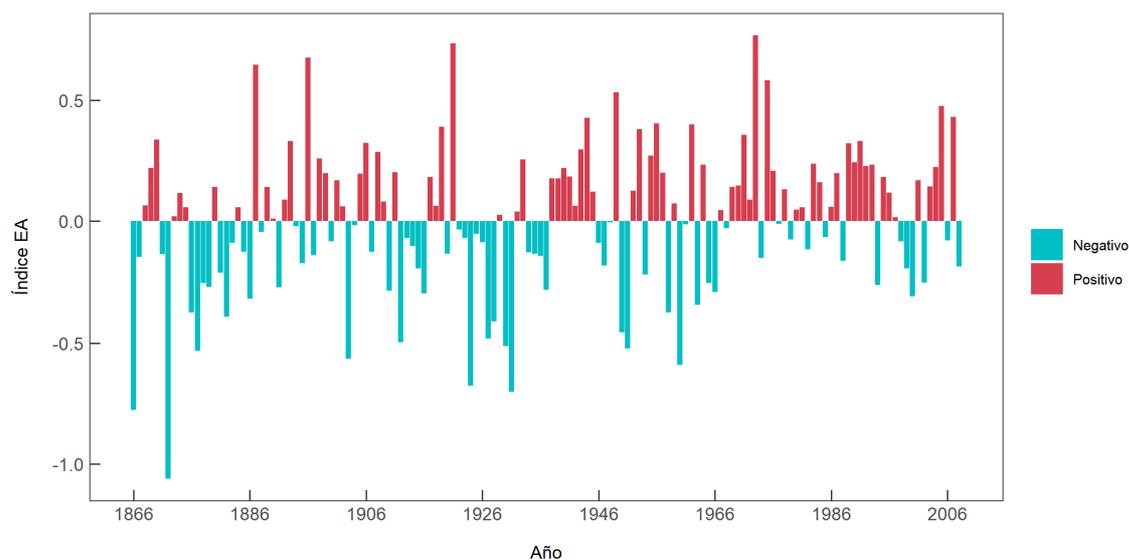


Figura 1.7. Índice EA medio anual de Comas-Bru y Hernández (2018) para el periodo 1866-2008.

Capítulo 2

Fuentes documentales y datos meteorológicos encontrados

1. Introducción

Las fuentes documentales están constituidas por el conjunto de soportes materiales o testimonios que contienen información sobre diferentes temas. Se acude a las fuentes documentales con el fin de consultar las anotaciones que se requieran. Estas consultas pueden realizarse para obtener datos de cualquier índole del pasado, ampliar el conocimiento sobre algo que se esté investigando o por otras razones. Las fuentes documentales se pueden clasificar según su forma de expresión; en este caso, solo se hará referencia a las fuentes documentales escritas.

Es apropiado usar fuentes documentales escritas cuando se quiere recabar información del pasado puesto que, en la medida de lo posible, siempre se ha intentado dejar constancia de los sucesos ocurridos. Esto se traduce en que se puede extraer información acerca de un tema desde mucho tiempo atrás. Sin embargo, hay que prestar atención cuando se está haciendo uso de ellas debido a que, en ocasiones, pueden presentar una serie de problemas. Al tratar con documentos de años o siglos anteriores, es posible que parte de la información se haya extraviado o haya desaparecido por deteriorarse el papel, que no haya suficiente información sobre la calidad de esta, que los datos recogidos estén registrados de distinta forma dependiendo del país o de la época, entre otros. Por estas razones, hay que someter a los datos extraídos de las fuentes a un control de calidad para comprobar la existencia de posibles errores; pero este aspecto se comentará en los siguientes capítulos.

Es importante detallar una forma de clasificar las fuentes documentales escritas puesto que será relevante para valorar la veracidad de la información recabada. Esta clasificación hace referencia al origen de la información y puede ser:

- * Fuente primaria: el contenido de estas fuentes es original.
- * Fuente secundaria: se basa en fuentes primarias. Son útiles para comprobar o para completar la posible pérdida de información de las fuentes primarias.
- * Fuente terciaria: recopila la información de las fuentes primarias y secundarias.

A su vez, dentro de las fuentes documentales escritas hay una gran variedad de tipos atendiendo a las características que posean en común. En la sección 3 se mostrará cada uno de los distintos tipos de fuentes documentales escritas que se han usado.

2. Antecedentes en el rescate de datos a partir de fuentes documentales en la PI

El ser humano se ha visto influenciado, de una u otra manera, por el clima a lo largo de la historia. Por eso, cuando ha vivido algún evento meteorológico fuera de lo normal, lo ha

dejado por escrito, y algunos de estos documentos se han preservado hasta nuestros días. Muchos otros siguen almacenados en bibliotecas y archivos sin que se conozca aún lo que guardan en su interior. Estos textos pueden proporcionar información complementaria para la reconstrucción del clima en épocas pasadas cuando no hay datos instrumentales disponibles o los *proxies* climáticos no tienen una suficiente resolución temporal (por ejemplo, diaria) (Domínguez-Castro y García-Herrera, 2016). Por tanto, las fuentes documentales que se conservan en archivos y bibliotecas son un medio muy importante de información para recuperar hechos meteorológicos del pasado.

El estudio del clima en la PI a partir de fuentes documentales es reciente. En España, esta tarea comenzó en los últimos años del siglo XX. Por ejemplo, Barriendos (1994) basó su tesis doctoral en el estudio del clima histórico de Cataluña, para el cual usó fuentes documentales para extraer información sobre el clima; Rodrigo et al. (1995) construyeron un índice numérico para caracterizar la precipitación anual en Andalucía (sur de España) durante los siglos XVI y XVII, y García et al. (2003) en las Islas Canarias para el periodo 1595-1836; y Llasat et al. (1999) analizaron las inundaciones en Cataluña en los últimos 500 años. En Portugal, Alcoforado et al. (2000) estudiaron la temperatura y precipitación durante el periodo 1675-1715 a partir de evidencias documentales. Estos trabajos hicieron que aumentara el interés en la reconstrucción del clima a partir de fuentes documentales en la PI. En estos escritos se pueden encontrar datos instrumentales meteorológicos, descripciones de eventos meteorológicos o datos *proxy*.

Han sido varios los proyectos llevados a cabo en la PI, en los que han participado distintos grupos de investigación, para recuperar datos del pasado a partir de fuentes documentales. Por ejemplo, RECLIDO (REd para la reconstrucción del CLIma a partir de fuentes DOcumentales) (<http://stream-ucm.es/RECLIDO/es/home-es.htm>) es una red creada en 2004 para fomentar este tipo de estudios a partir de fuentes documentales; y el proyecto Salvá-Sinobas (2008-2011) (<http://salva-sinobas.uvigo.es/index.php/>) analizó la variabilidad climática de la PI para el periodo 1750-1850. En estas iniciativas se han recuperado numerosas series instrumentales meteorológicas. Así, Domínguez-Castro et al., (2014b) expusieron todo el trabajo llevado a cabo en el proyecto Salvá-Sinobas en el que se recuperaron más de 100000 observaciones meteorológicas en España. Además, también se han llevado a cabo estudios particulares: Fragoso et al. (2015) identificaron eventos extremos climáticos en la década de 1780 en Portugal a partir de registros instrumentales y fuentes documentales; Domínguez-Castro et al. (2013) recuperaron los primeros registros meteorológicos de la PI tomados en Lisboa en 1724 (como ya se ha mencionado en el Capítulo 1); Montero-Martín et al. (2021) han recuperado datos de horas de sol y de cobertura nubosa en Coimbra (Portugal) para el periodo 1891-1950; y Gallego et al. (2007) recuperaron datos meteorológicos de viento en Cádiz para el periodo 1806-1852 y de presión y temperatura para el periodo 1825-1852. Por otra parte, también se han calculado índices numéricos a partir de registros no instrumentales, es decir, basados en los escritos de los

documentos (Fernández-Fernández et al., 2015; García-Herrera et al., 2018; Rodrigo et al., 1999; Rodrigo y Barriendos, 2008).

Respecto a los eventos meteorológicos y climáticos pueden encontrarse trabajos como los siguientes: Vaquero et al. (2008) analizaron la llegada de una tormenta tropical en el suroeste de la PI en octubre de 1842; Llasat et al. (2005) y Balasch et al. (2019) han recuperado eventos de riadas en Cataluña y en distintas localizaciones a lo largo de la cuenca del Ebro, respectivamente; Trigo et al. (2009) estudiaron el clima de la PI para el periodo 1816-1818 para analizar la influencia de la erupción del volcán Tambora en abril de 1815, que causó el conocido “año sin verano” en 1816; Domínguez-Castro et al. (2015) analizaron valores extremos de la precipitación en 1855-1856 y el impacto causado.

Con relación a los datos *proxy* documentales, se pueden encontrar trabajos relacionados, por ejemplo, con eventos extremos. Varios estudios han identificado eventos de sequías y de inundaciones en la PI a partir de datos *proxy* como las rogativas (actos religiosos por los que se pide a Dios intenciones concretas). Algunos ejemplos son los trabajos de Alcoforado et al. (2021), Domínguez-Castro et al. (2008, 2012, 2014a), Fragoso et al. (2018). Las rogativas pueden ser tomadas como un *proxy* del clima cuando se celebran pidiendo a Dios por la lluvia (rogativas *pro-pluvia*) o para que amaine el temporal (rogativas *pro-serenitate*). Otros *proxies* climáticos obtenidos a partir de fuentes documentales son aquellos que están relacionados directamente con la agricultura, como el precio del grano, la fecha de las cosechas o la falta de alimentos. Aunque en la PI estos últimos *proxies* no han sido muy estudiados, su uso ha generado interesantes resultados en otras partes de Europa (Kiss et al., 2011; Ljungqvist et al., 2022; Meier et al., 2007; Moreno et al., 2020; Pfister y Brázdil, 2006).

Después de este pequeño resumen del estudio del clima a partir de las fuentes documentales en la PI se puede apreciar el potencial de ellas para conocer el clima del pasado. Es por esto que se debe seguir indagando en los distintos documentos para conocer mejor la variabilidad climática de los siglos pasados.

3. Tipos de fuentes documentales usadas

A continuación, se van a mostrar todas las fuentes documentales consultadas en la presente tesis y la información climática que se ha obtenido de ellas.

3.1. Anales científicos

Normalmente, los anales científicos se producían en academias, universidades u otras instituciones científicas. Estos documentos pueden contener medidas registradas por instrumentos meteorológicos y/o astronómicos, efemérides, posición de los astros y otros datos. En general, la información que contienen es muy extensa y detallada e incluye los metadatos de las observaciones llevadas a cabo. Usualmente, los datos presentados en estas

fuentes documentales son mensuales debido a que suelen ser resúmenes de los registros diarios originales. Aun así, estas fuentes documentales son primarias puesto que los publican las propias instituciones generadoras de los datos y no se basan en otras informaciones.

En esta tesis, la información que se ha extraído de este tipo de fuentes está relacionada con distintas series meteorológicas de variables como la temperatura, presión o humedad. A continuación, se mostrará la lista de los documentos consultados y una breve descripción de los datos meteorológicos que se han rescatado a partir de ellos.

✱ *Anuario del Servicio Meteorológico Español*

En la Figura 2.1 se puede ver un ejemplo de una página de dicho anuario. Se han recuperado diferentes series meteorológicas de varias localizaciones de Extremadura para el periodo 1911-1936. Las distintas series recogen datos meteorológicos medidos por instrumentos tales como barómetros, barógrafos o anemómetros.

✱ *Resumen de las observaciones meteorológicas efectuadas en la Península y algunas de sus islas adyacentes*

Se han analizado varias series meteorológicas mensuales de diferentes poblaciones de Extremadura recogidas en los resúmenes de las observaciones meteorológicas publicadas por el Observatorio de Madrid. Las poblaciones (y el periodo que abarcan las observaciones) son: Badajoz (1876-1901), Cáceres (1882-1888), Don Benito (1890) y Valde Sevilla (1881-1889).

✱ **Estación meteorológica del Colegio de San José (Villafranca de los Barros - Badajoz)**

Se han digitalizado datos diarios de temperatura, humedad, presión, viento, nubes y lluvia de la estación meteorológica del Colegio de San José de Villafranca de los Barros (Badajoz) para el periodo 08/1905-12/1906.

✱ *Annaes do Observatório do Infante Dom Luiz (Lisboa)*

Se han analizado datos diarios, mensuales y anuales de diversas variables meteorológicas registradas en Campo Maior (Portugal) para el periodo 1860-1939.

3.2. Informes técnicos

Un informe técnico es un documento en el que se recogen los resultados de un análisis o un estudio determinado. El documento consultado referente a este tipo de fuente documental ha sido el elaborado por la Comisión Técnica de Emergencias por Inundaciones en 1985, en relación con el estudio de las inundaciones históricas de las distintas cuencas de España. Concretamente, se ha consultado el informe titulado *Estudio de Inundaciones*

*Históricas y mapa de riesgos potenciales en la Cuenca del Guadiana*² (CTEI, 1985). En este documento se recogen todas las riadas que se han producido desde que se tienen registros documentales a lo largo de toda la cuenca. También se anota la fecha de la riada, la altura alcanzada por el agua, el caudal o las zonas y las vidas afectadas. En este caso, se trata de una fuente documental secundaria, puesto que para elaborar su investigación se han examinado otros documentos.

A continuación, se transcribe un fragmento de la descripción de la gran riada del Guadiana en diciembre de 1876 a modo de ejemplo:

“[...] En Badajoz, las aguas alcanzaron 2.30 m en la puerta de entrada al parque de la Legión detrás de la muralla, por la referencia existente actualmente la inundación fue catastrófica, numerosas casas de la calle San Agustín se derrumbaron, también en las calles de las Peñas y de la Trinidad, por la Puerta de Las Palmas se podía ir en barca, siete de los ojos del Puente de las Palmas quedaron destruidos, la Calle del Río quedó prácticamente destrozada. Alcanzó el día 7 de diciembre un caudal máximo de 10000 m³/s [...]” (CTEI, 1985).

En esta parte de la descripción se pueden ver datos sobre la altura del agua, los daños causados o el caudal.

A continuación, se presentan las fechas de los eventos de riadas recuperados a partir de este documento: 01/1545, 12/1596, 19-26/12/1603, 05-06/01/1758, 05-06/12/1766, 08-11/02/1823, 06-07/12/1876, 25/01/1911, 06-09/02/1912, 15/02/1917, 03-04/02/1926, 22/02/1936, 06/01/1940, 01/02/1941, 06/03/1947, 15/03/1951, 01/01/1962, 27/02/1964, 15/03/1969, 13/01/1970 y 13/02/1979.

3.3. Monografías

Una gran variedad de instituciones recogían sus estudios en monografías. Algunas de estas instituciones incorporaban en sus monografías datos relevantes para sus investigaciones como datos meteorológicos. Este tipo de fuente documental es una fuente primaria.

En concreto, se han encontrado datos meteorológicos en monografías médicas. La información encontrada en este tipo de documentos puede ser un poco escueta en comparación con otras fuentes documentales. Aun así, solían presentar, normalmente, una breve descripción de los instrumentos y los datos registrados, que se pueden encontrar tanto diaria como mensualmente. Las variables meteorológicas que se recogen en las monografías suelen ser las más comunes: temperatura, presión y humedad.

² Se puede consultar en http://www.proteccioncivil.es/catalogo/naturales/cnih/cnih2014/B6_Document.html

Los documentos de este tipo de fuente documental que se han consultado son las *Monografías de las aguas y baños minerales*³ (Catálogo Cisne - UCM). En ellos se han encontrado datos meteorológicos de los baños de Alange (Badajoz) (en la Figura 2.2 se puede ver un ejemplo de las observaciones tomadas en el balneario de Alange en el año 1877) y de los Baños de Montemayor (Cáceres). La información se presentaba de manera estacional, es decir, en la época de baño, que es de julio a septiembre.

3.4. Manuscritos

Los manuscritos incluyen información escrita a mano por un autor. Este autor puede ser cualquier persona y no necesariamente tiene que estar ligado a ninguna institución. La información que se recoge en los manuscritos es muy variada, abarcando todas las temáticas de las demás fuentes documentales. La diferencia entre esta y las otras es que la información presentada en los manuscritos es la original escrita a mano. Por tanto, se trata de una fuente primaria.

Se han consultado distintos documentos de este tipo. Uno de ellos son los *Cuadernos de Observaciones Meteorológicas*, preservados en la Biblioteca de la Sede Territorial de la AEMET en Badajoz. De estos escritos se han recuperado medidas actinométricas (medidas de la radiación solar) y de cobertura nubosa registradas en Cáceres en el periodo 1913-1923. En estos cuadernos, además de los datos meteorológicos, también se encuentra una detallada descripción de los instrumentos utilizados y de cómo realizar las observaciones. En la Figura 2.3 se puede ver un ejemplo de una hoja de observaciones junto con la descripción detallada de los instrumentos usados y las pautas para realizar las observaciones. El segundo de los documentos consultados de este tipo de fuente pertenece a una serie meteorológica tomada en el Observatorio de San Fernando (San Fernando, Cádiz) durante el periodo 1799-1813. Concretamente, pertenece a la Cuarta Clase del plan de observaciones llevadas a cabo por

Establecimiento de aguas minerales de Alange
Variaciones Barométricas y Termométricas
1877.

Días.	Julio		Agosto		Septiembre	
	Barómetro	Termómetro	Barómetro	Termómetro	Barómetro	Termómetro
1.	747,1a	23,8	748,25	27,2	747,00	26,0
2.	750,00	23,5	746,55	28,5	745,00	25,1
3.	748,80	23,5	746,25	27,6	745,10	25,4
4.	747,50	24,0	747,10	26,6	745,20	25,3
5.	747,35	24,5	748,35	26,0	745,35	25,4
6.	747,60	25,0	749,00	25,9	744,00	24,5
7.	746,90	25,2	747,00	26,0	743,25	23,4
8.	749,00	25,5	746,50	26,0	742,00	21,4
9.	747,10	25,8	748,50	25,2	750,00	21,4
10.	747,40	24,8	749,25	25,8	749,00	21,5
11.	747,40	24,5	749,50	25,6	748,50	21,2
12.	746,40	27,0	748,50	26,8	747,25	21,5
13.	746,00	26,0	746,10	25,5	747,00	22,0
14.	748,00	24,6	747,80	24,8	750,00	22,2
15.	746,10	24,4	747,60	25,5	749,10	23,5
16.	746,52	29,5	747,10	26,0	747,25	24,6
17.	748,00	22,6	747,20	26,0	746,00	25,0
18.	747,00	24,20	746,60	27,0	742,10	25,5
19.	748,50	25,3	747,75	27,0	742,50	25,5
20.	747,50	26,4	747,40	27,8	743,10	24,0
21.	748,00	25,0	748,15	27,2	744,50	24,8
22.	748,25	26,6	748,00	26,2	740,00	24,2
23.	747,20	25,6	748,25	26,4	740,65	20,0
24.	748,30	24,6	748,25	26,2	743,20	19,0
25.	747,50	24,6	748,25	27,3	746,10	20,0
26.	748,55	25,0	751,00	26,2	746,20	20,8
27.	748,20	26,0	750,05	26,8	746,40	19,4
28.	748,35	25,1	748,50	27,4	747,20	19,4
29.	748,24	27,1	747,05	27,5	748,50	19,8
30.	748,45	28,2	746,20	26,4	748,00	18,5
31.	748,20	28,4	748,00	26,4		

Figura 2.2. Observaciones de la temporada de baño del balneario de Alange en 1877.

³ Se pueden consultar en <http://cisne.sim.ucm.es>

Fuentes documentales y datos meteorológicos encontrados

Rodrigo Armesto (director del Observatorio durante 1798-1804) en 1798. En el caso de la serie meteorológica de San Fernando, la información acerca de los instrumentos y de cómo se realizaban las observaciones es muy escasa. El tercero de estos documentos son los *Livros de observações médicas e meteorológicas*⁴ (Archivo Municipal de Almada, Lisboa) y se han recuperado observaciones meteorológicas registradas por el médico de Almada. La información que aparece en los documentos acerca de las observaciones y de los instrumentos utilizados es inexistente.

Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico

OBSERVATORIO CENTRAL METEOROLÓGICO

Las Cuentas, encargadas de las Estaciones Meteorológicas que dependen de la Dirección General del Instituto Geográfico y Estadístico son responsables de la exactitud de todos los datos consignados en estos cuadros: personal de la estación de donde se toman las lecturas, el instrumento empleado y el estado del mismo. Deben asegurarse especialmente de que el instrumento empleado sea el que se especifica, y de que las lecturas sean tomadas en el momento y en el lugar que se indica en las tablas de corrección al nivel del mar y gravidad normal y por último no se variará de sitio el instrumento sin previo aviso al Observatorio Central Meteorológico.

Las presiones atmosféricas que se consignan en este cuadro ventero expresadas en milímetros y décimas de milímetros sólo corregidas de capilaridad y reducidas a la temperatura de 0°, utilizando para ello las tablas hasta hoy en uso en el servicio regular.

La observación de temperaturas a la sombra y humedades se realizará colocando los aparatos dentro de alambres meteorológicos, con doble techo y débiles persianas que dificulten el calentamiento del aire interior: por radiación de la parte exterior expuesta a los rayos directos del sol, sea que por otra parte dificulte la renovación del aire. Entre algunos puntos de observación por debajo y por fuera, se colocará si es posible en pedregales de aire circular libremente, sobre un piso de césped y a una altura tal, que los termómetros queden por lo menos a 1 metro del suelo. Si no es posible en tales condiciones, el alambre se colocará en una terraza, se colocará a bastante altura sobre el piso para evitar el calor que se produce al caminar, y se colocará en el punto de la terraza que se considere más conveniente para evitar el calor que se produce al caminar, y se colocará en el punto de la terraza que se considere más conveniente para evitar el calor que se produce al caminar.

Los termómetros de máxima y mínima se leerán todos los días a las 8 h. Si las máximas se apuntan en el día, de la fecha de la lectura, pero las mínimas se toman de 0° o inferior al día siguiente precedente. (1) Hechas las lecturas, cada día de corrección los índices de todos los termómetros. Excepcionalmente se toman de alcohol de los termómetros de máxima y si se advierte alguna irregularidad en ellas, cualquier de aquellas instrumentadas, se le avisa al jefe de la estación por la parte superior y con la bola hacia abajo un movimiento circular y rápido, regulado en cuanto sea necesario hasta que toda la columna se mueva.

Los termómetros de máxima y mínima deben compararse con frecuencia con el instrumento más del generador de la estación que se ajuste en el estado, deben estar corregidos del error instrumental, que se hace comparación con el de la estación principal del instrumento.

Se cuidará con especial la limpieza que envuelve el depósito del aparato, y se cuidará con especial la limpieza que envuelve el depósito del aparato, y se cuidará con especial la limpieza que envuelve el depósito del aparato.

Los valores de la humedad relativa del aire, o fracción de saturación, se reducen al 10° como índice de la saturación, y los de la tensión en milímetros y décimas partes de milímetros del mismo vapor acuosos atmosférico, se reducen en las columnas correspondientes multiplicadas por 100.

Se fabrica auxiliar.

Observaciones Meteorológicas (Voluntarias)

DÍAS	TEMPERATURAS			ACTINÓMETRO			Humedad	BARÓMETRO		BÓBES A 12'	OBSERVACIONES
	A las 8 h. del día (T)	EN EL SOMBRO, A las 8 h. del día (T)	EN EL SOMBRO, A las 8 h. del día (T)	T	I	Bar		Méj.	Méj.		
1	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				Las observaciones en el día...
2	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				Las 16 horas.
3	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
4	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
5	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
6	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
7	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
8	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
9	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
10	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
11	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
12	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
13	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
14	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
15	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
16	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
17	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
18	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
19	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
20	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
21	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
22	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
23	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
24	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
25	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
26	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
27	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
28	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
29	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
30	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
31	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
32	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
33	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
34	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
35	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
36	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
37	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
38	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
39	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
40	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
41	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
42	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
43	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
44	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
45	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
46	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
47	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
48	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
49	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
50	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
51	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
52	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
53	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
54	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
55	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
56	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
57	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
58	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
59	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
60	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
61	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
62	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
63	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
64	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
65	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
66	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
67	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
68	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
69	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
70	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
71	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
72	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
73	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
74	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
75	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
76	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
77	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
78	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
79	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
80	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
81	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
82	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
83	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
84	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
85	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
86	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
87	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
88	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
89	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
90	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
91	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
92	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
93	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
94	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
95	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
96	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
97	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
98	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
99	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				
100	17.0	17.0	17.0	4.6	2.5	1.0	5.7				

INSTRUCCIONES

El instrumento a que se refiere en esta columna se refiere con brevedad a la columna de la izquierda, y se indica el modo de observación que se debe hacer en cada caso.

Los instrumentos de máxima y mínima se leerán todos los días a las 8 h. Si las máximas se apuntan en el día, de la fecha de la lectura, pero las mínimas se toman de 0° o inferior al día siguiente precedente. (1) Hechas las lecturas, cada día de corrección los índices de todos los termómetros. Excepcionalmente se toman de alcohol de los termómetros de máxima y si se advierte alguna irregularidad en ellas, cualquier de aquellas instrumentadas, se le avisa al jefe de la estación por la parte superior y con la bola hacia abajo un movimiento circular y rápido, regulado en cuanto sea necesario hasta que toda la columna se mueva.

Los termómetros de máxima y mínima deben compararse con frecuencia con el instrumento más del generador de la estación que se ajuste en el estado, deben estar corregidos del error instrumental, que se hace comparación con el de la estación principal del instrumento.

Se cuidará con especial la limpieza que envuelve el depósito del aparato, y se cuidará con especial la limpieza que envuelve el depósito del aparato.

Los valores de la humedad relativa del aire, o fracción de saturación, se reducen al 10° como índice de la saturación, y los de la tensión en milímetros y décimas partes de milímetros del mismo vapor acuosos atmosférico, se reducen en las columnas correspondientes multiplicadas por 100.

Se fabrica auxiliar.

Figura 2.3. Ejemplo de una hoja de observaciones de los *Cuadernos de Observaciones Meteorológicas* de la AEMET y de las instrucciones detalladas a seguir para realizar las observaciones.

3.5. Periódicos

Los periódicos publican los eventos más importantes que ocurren en los pueblos y ciudades desde el siglo XVIII. La temática de las noticias que aparecen en ellos respecto al clima es muy variada, incluyendo eventos meteorológicos o el registro de las variables meteorológicas. Además, también pueden incluir datos *proxy* relacionados con el clima, como, por ejemplo, las rogativas o el precio del trigo. Un aspecto negativo de esta fuente documental es la pérdida de páginas o números, lo que hace más complicado reconstruir

⁴ Se pueden consultar en <https://apps.cm-almada.pt/arquivohistorico/>

series largas meteorológicas. Dependiendo de qué tipo de noticias se consulte, esta fuente documental puede ser primaria o secundaria. Los datos que se han extraído de los distintos periódicos consultados son de tres tipos: medidas instrumentales meteorológicas, eventos meteorológicos y datos *proxy*.

Respecto a los datos meteorológicos, en los periódicos se registra, normalmente, información diaria, pero también se pueden encontrar datos mensuales o anuales en algunos casos. Las variables meteorológicas que presentan los periódicos suelen ser temperatura, presión, dirección del viento, precipitación, días de precipitación y el estado de la atmósfera. La información acerca de los instrumentos o de cómo se realizaban las medidas no aparece. En este caso, la fuente documental es secundaria puesto que los datos publicados son reproducciones o copia de los datos originales. Son tres los periódicos consultados para el rescate de datos meteorológicos: *La Gaceta de Madrid*, el *Diario de Badajoz* y el *Boletín de la Agencia de Cáceres*. En *La Gaceta* se han rescatado datos diarios de Badajoz y Cáceres para el periodo 1880-1889 y de Valde Sevilla (Badajoz) para el periodo 1880-1883. En el *Diario de Badajoz* se han recuperado datos diarios de Badajoz para el periodo 1830-1833. En el *Boletín de la Agencia de Cáceres* se han encontrado datos diarios de Cáceres para el mes de julio de 1844. Las variables que se han encontrado en estos documentos son presión, temperatura, estado de la atmósfera, viento y días de lluvia. En la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de una página de *La Gaceta*, la cual contiene una tabla con datos meteorológicos correspondientes al día 15 de enero de 1887 de distintas ciudades de España (recuadrada en rojo), entre ellas Badajoz y Cáceres. Como se puede ver en esta figura, no hay información sobre los instrumentos o cómo se registraban las medidas, solo se presentaban los datos.

Con relación a los eventos meteorológicos, los apuntes que se han recuperado han sido las grandes riadas del río Guadiana a su paso por la ciudad de Badajoz, concretamente, en el puente de Palmas. En estos documentos se puede encontrar información acerca de la altura alcanzada por el agua, la fecha concreta en la que se produjo la subida del río, los daños causados en la ciudad y alrededores, si hubo fuertes precipitaciones o si la riada causó muertes. La fuente documental es primaria para el caso de las riadas, puesto que los reporteros solían describir estos fenómenos de primera mano. En la Tabla 2.1 se muestran los eventos de riadas recuperados junto con el nombre de los periódicos a los que corresponden, además de la fecha.

Respecto a los datos *proxy* documentales, la información que se ha extraído de ellos es acerca de la celebración de rogativas y el precio de distintos granos. El precio del grano está relacionado con la variabilidad del clima puesto que depende directamente de él; por ejemplo, si hay un temporal generalizado en una región y acaba con los cultivos, el precio se verá aumentado por no haber tanta disponibilidad del grano específico (Esper et al., 2017; Kiss et al., 2011). Para las rogativas, en el texto de estas noticias suele aparecer la fecha en la que se celebraron, una pequeña descripción del evento y el motivo por el que se realiza.

Tabla 2.1. Información de los eventos de riadas recuperados a partir de los distintos periódicos junto con la fecha.

Periódico	Fecha de la riada
<i>La Correspondencia de España: diario universal de noticias</i>	28/01/1881
<i>El isleño: periódico científico, industrial, comercial y literario</i>	13/03/1892
<i>La lid católica</i>	15-16/01/1895
<i>El popular: diario republicano</i>	06-09/02/1912
<i>El pueblo: diario republicano de Valencia</i>	05/01/1915, 03-04/02/1926
<i>El liberal</i>	14/03/1916
<i>El norte: diario católico-monárquico</i>	15/02/1917
<i>La libertad</i>	27/03/1924
<i>Correo extremeño</i>	27/12/1927
<i>El Progreso: diario liberal</i>	06/01/1940
<i>Diario de Burgos: de avisos y noticias</i>	06/03/1947, 15/03/1951, 01/01/1962

Tabla 2.2. Información de las rogativas y la fecha y lugar de celebración de estas encontradas en periódicos.

Periódico	Fecha y lugar de la rogativa
<i>La región extremeña: diario republicano</i>	04/1896 (Badajoz)
<i>Correo de la mañana</i>	05/1925 (Coria, Reina, Fuente del Arco)
<i>Correo extremeño</i>	04/1929 (Magacela, La Albuera, Arroyo de San Serván, Coria, Alcántara)
<i>Nuevo diario de Badajoz: periódico político y de intereses generales</i>	03/1905 (Azuaga), 04/1905 (La Haba, Fregenal de la Sierra)
<i>Nuevo día: diario de la provincia de Cáceres</i>	04/1927 (Cilleros, Coria), 04/1929 (Magacela, La Albuera, Arroyo de San Serván, Coria, Alcántara), 03/1931 (Miajadas)
<i>Crónica de Badajoz: periódico de intereses morales y materiales, de literatura, artes, modas y anuncios</i>	05/1867 (Badajoz)
<i>La montaña: diario de Cáceres</i>	05/1925 (Coria, Reina, Fuente del Arco)
<i>Boletín oficial de la provincia de Cáceres</i>	03/1835 (Cáceres), 04/1869 (Talaván)
<i>El adarve: periódico político, literario y de noticias</i>	03/1907 (Diferentes poblaciones, no específica)

3.6. Revistas

Las revistas son también publicaciones periódicas y, por lo tanto, similares en algunos aspectos a los periódicos, tanto en formato como en contenido. De ellas, se han recuperado datos meteorológicos y rogativas.

Respecto a las series meteorológicas, solo se ha extraído una serie mensual registrada por Torcuato Jusué en el periodo 1898-1902. Las variables registradas son temperatura, presión y días de lluvia. Estos datos se han consultado en la *Revista de Extremadura*. Respecto a las rogativas, en la Tabla 2.3 se muestran los documentos consultados y la fecha y población donde se realizaron.

Tabla 2.3. Información acerca de las rogativas y la fecha y lugar de celebración de estas encontradas en revistas.

Documento	Fecha y lugar de la rogativa
<i>Blanco y negro</i>	04/1903 (Cáceres)
<i>Revista de estudios extremeños</i>	03/1859 (Olivenza)

3.7. Libros

Se han consultado libros en los que se recoge la historia de diferentes pueblos y ciudades de Extremadura. En todos ellos, los autores recuperan la historia del pueblo o ciudad desde siglos anteriores. Para escribir estos libros, los autores se basan en otras fuentes documentales, por lo que esta es una fuente secundaria.

En estos documentos se ha encontrado información acerca de la celebración de rogativas y de las riadas de Badajoz. En la Tabla 2.4 se recogen los diferentes libros consultados acerca de las rogativas, y en la Tabla 2.5 se presentan los libros de los que se ha recuperado información acerca de los grandes eventos de riadas en el puente de Palmas de Badajoz.

Tabla 2.4. Información acerca de las rogativas y la fecha y lugar de celebración de estas encontradas en libros.

Libro	Fecha y lugar de la rogativa
Caso Amador (2004)	03/1849 (Fregenal de la Sierra)
	04/1859 (Fregenal de la Sierra)
	03/1868 (Cabeza del Buey)
Serrano Naharro y Serrano González de Murillo (1992)	05/1891 (Fregenal de la Sierra)
	05/1896 (Fregenal de la Sierra)
	04/1905 (Fregenal de la Sierra)

Tabla 2.5. Información de los eventos de riadas en Badajoz extraídos de los libros y la fecha en la que se dio el evento.

Libro	Fecha de la riada	
Cruz Franco et al. (2018)	18-28/01/1545	29-30/01/1796
González Rodríguez (2019)	19-26/12/1603	03-07/03/1814
Hernández Tolosa (1992)	03/1708	08-11/02/1823
	12/1736	24-29/01/1859
Solano de Figueroa (1929)	02/1740	02/1869
Díaz y Pérez (1887)	05-06/12/1766	06-07/12/1876

3.8. Archivos eclesiásticos

En los archivos eclesiásticos se pueden encontrar diferentes tipos de documentos. Los que se han consultado en esta tesis son documentos parroquiales, es decir, son registros de

todo lo acontecido en las parroquias de los pueblos y ciudades. Se trata de una fuente documental primaria.

En estos documentos se han encontrado varias celebraciones de rogativas. Entre los siglos XVI y XIX, las rogativas se registraban, principalmente, en archivos eclesiásticos y civiles. La mayoría de series de rogativas recuperadas en la PI (Domínguez-Castro et al., 2012; Domínguez-Castro y García-Herrera, 2016) se han extraído de las actas capitulares, en los que se registraban las discusiones y decisiones tomadas en las asambleas de las autoridades locales. En las grandes ciudades se pueden encontrar registros continuos de rogativas hasta el siglo XIX, pero con la llegada de la industrialización estas ciudades perdieron su carácter agrícola. Además, durante este siglo hubo cambios en la burocracia y tuvo lugar la ocupación francesa. Todo esto causó un rápido descenso en el registro de rogativas (Domínguez-Castro et al., 2008). Pero los efectos de la industrialización en zonas rurales de la PI son menores, por lo que es posible encontrar rogativas desde el siglo XIX hasta la actualidad en archivos de Extremadura. En la Tabla 2.6 se muestran las rogativas recuperadas en esta tesis doctoral, junto con la fecha de celebración y los documentos de los que se han extraído. Normalmente, la información que se recogía acerca de la celebración de rogativas era extensa, detallando todo el proceso, la fecha en la que se realizaba y el motivo por el que se pedía.

Tabla 2.6. Información acerca de las rogativas y la fecha y lugar de celebración de estas encontradas en archivos eclesiásticos.

Documento	Fecha (y lugar) de la rogativa
Manuscritos eclesiásticos de: Archivo Histórico Municipal de Zafra; Archivo del Convento de Santa Clara de Zafra; Archivo Parroquia Nuestra Señora de la Candelaria de Zafra. (Zafra)	04/1824 (Fregenal de la Sierra) 04/1896 (Badajoz) 04/1907 (Zafra)
Libro de acuerdos y elecciones de alcalde de mayordomo y jurados de la cofradía de Nra. Sra. de la Soledad (La Zarza) (Archivo Diocesano de Mérida-Badajoz)	03/1849 (La Zarza) 04/1881 (La Zarza)

Capítulo 3

Datos proxy

1. Rogativas

1.1. Introducción

Las rogativas son actos religiosos por los que se pide a Dios intenciones concretas, por ejemplo, por la salud de la realeza, por el buen propósito de la guerra o por la agricultura y ganadería. Las primeras celebraciones de rogativas de las que se tienen registro datan del siglo X (Domínguez-Castro et al., 2014a), aunque las que presentan un registro continuado aparecen en el siglo XV (Domínguez-Castro et al., 2008). Las últimas rogativas celebradas se extienden hasta nuestros días, en los que todavía hay poblaciones donde se celebran. La mayoría de rogativas encontradas se han celebrado comúnmente en la religión católica a lo largo de los siglos, y se pueden encontrar en muchas localizaciones alrededor del mundo. La mayoría de ellas se han celebrado en Europa (Alcoforado et al., 2012; Domínguez-Castro et al., 2018; Fragoso et al., 2018; Piervitali y Colacino, 2001), pero también se han dado en América (Garza Merodio, 2007, 2014) o Filipinas (Warren, 2013).

Las rogativas son eventos excepcionales, por lo que su celebración no era trivial ni pasaba desapercibida. Estos actos implicaban realizar un proceso en el que intervenían varias partes: la eclesiástica, el gobierno local, el pueblo y los que tenían un motivo para realizar la petición a Dios. En todo este proceso se tenían que hacer unos donativos para poder realizar la rogativa, y de todo ello quedaba constancia en los libros de cuentas del gobierno local y de la Iglesia.

Las rogativas que se celebraban por la agricultura y la ganadería están estrechamente relacionadas con el clima. Por ejemplo, la lluvia es necesaria para que las plantas puedan crecer y desarrollarse. Justamente, cuando las rogativas se hacen pidiendo por la lluvia a Dios debido a la escasez de agua en los campos se denominan “rogativas *pro-pluvia*”, y cuando se realizan por el cese del temporal se llaman “rogativas *pro-serenitate*”.

Como se ha dicho anteriormente, las rogativas son actos excepcionales. Esto quiere decir que para su celebración se requería tener un evento excepcional, fuera de lo común. Como ejemplo se va a tomar la rogativa *pro-pluvia*. La celebración de esta indicaba que la escasez de lluvia venía de un tiempo atrás, por lo que se correspondería con un evento extremo de sequía. Por tanto, la celebración de rogativas *pro-pluvia* y *pro-serenitate*, en principio, son buenos *proxies* para identificar eventos extremos de sequía y lluvia, respectivamente. Estos dos tipos de rogativas han sido estudiadas para diferentes fines: para reconstruir periodos de sequía en el pasado (Alcoforado et al., 2000; Barriendos, 1997; Domínguez-Castro et al., 2008, 2012; Fragoso et al., 2018; Piervitali y Colacino, 2001), para identificar eventos climáticos extremos (Domínguez-Castro et al., 2018; Fragoso et al., 2015) o para reconstruir la precipitación en la PI (Rodrigo y Barriendos, 2008). Incluso se han usado como *proxy* de la NAO (Vicente-Serrano y Cuadrat, 2007).

Atendiendo al último aspecto del párrafo anterior, es bien sabido que hay una asociación entre el índice NAO positivo (negativo) y los eventos de sequía (humedad) en la PI (Gallego et al., 2005; Goodess y Jones, 2002; Queralt et al., 2009; Rodríguez-Puebla et al., 1998; Trigo et al., 2004; Zorita et al., 1992). Debido a su proximidad con el océano Atlántico, en Extremadura hay una gran correlación entre estos eventos (Gallego et al., 2005). Por otra parte, las rogativas se celebraban cuando estos eventos climáticos comenzaban a preocupar a la población por su duración e intensidad. De esta manera, las rogativas y el índice NAO podrían estar asociados, y esto es lo que se pretende analizar en esta sección. En particular, se ha estudiado la relación entre el índice NAO y las rogativas *pro-pluvia* celebradas en Extremadura.

En total, se han recuperado 37 rogativas *pro-pluvia* celebradas en 24 localidades diferentes de Extremadura desde el año 1824 hasta el 1931. En la Figura 3.1 se puede ver la distribución de las 24 localidades donde se celebraron las rogativas recuperadas. Se ha digitalizado el mes y año de la celebración de cada rogativa; 30 rogativas fueron celebradas en primavera (marzo, abril y mayo), 2 en otoño (septiembre, octubre y noviembre) y 5 en invierno (diciembre, enero y febrero). Solo se han considerado las rogativas celebradas en primavera para llevar a cabo el estudio. Para hacer esta consideración se ha tenido en cuenta la influencia en la precipitación en Extremadura por parte de la NAO en los meses de invierno (Gallego et al., 2005).

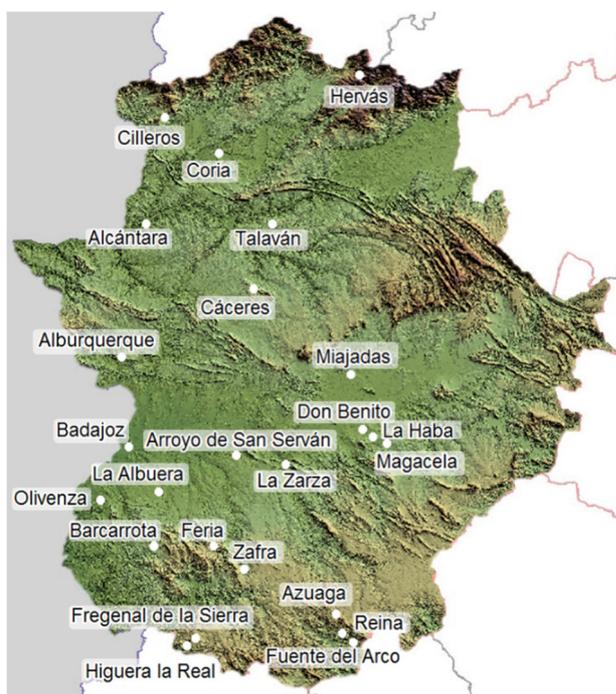


Figura 3.1. Mapa de Extremadura (obtenido del geoportal de Infraestructura de Datos Espaciales de Extremadura – IDE Extremadura) mostrando las poblaciones en las que se realizaron rogativas *pro-pluvia*.

Como el fin de este estudio es comprobar la relación entre las rogativas *pro-pluvia* celebradas en Extremadura y el índice NAO, se ha usado el índice NAO mensual calculado por Jones et al. (1997), el cual se mostró en el Capítulo 1. Las razones por las que se ha usado este índice son dos:

- i) es un índice instrumental, es decir, está calculado a partir de valores medidos directamente con instrumentos meteorológicos;
- ii) cubre completamente el periodo de las rogativas recuperadas (1824-1931).

Se ha utilizado un índice NAO instrumental porque, como se mencionó en el Capítulo 1, las observaciones instrumentales son las más fiables y, en este caso, se está analizando un *proxy* (las rogativas).

Para analizar la relación entre las rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO, se ha asignado el valor del índice NAO a la rogativa celebrada en ese mismo mes y año. Por otra parte, hay varias rogativas que se celebraron en la misma fecha pero en poblaciones distintas. Para evitar que unos eventos de rogativas tengan más peso que otros, se ha tomado como un solo evento de rogativa aquellos que se hayan celebrado en la misma fecha pero en poblaciones diferentes. Así, solo se asociaría un valor del índice NAO con un solo evento de rogativa. En total, para realizar el análisis se han usado 21 fechas de rogativas *pro-pluvia* celebradas en los meses de primavera: 7 rogativas en marzo, 10 en abril y 4 en mayo. Aunque ya se presentaron las rogativas recuperadas en el Capítulo 2, en la Tabla 3.1 se muestran las 21 fechas de rogativas que se han usado para el análisis y las poblaciones donde se celebraron.

Para analizar la relación entre el índice NAO y las rogativas, se va a proceder de dos maneras distintas:

- i) hallar las anomalías para el índice NAO desde la fecha en la que se celebraron las rogativas;
- ii) construir tablas de contingencia.

Tabla 3.1. Las 21 fechas de rogativas *pro-pluvia* usadas en los análisis y la población en la que se celebraron.

Fecha	Población
04/1824	Fregenal de la Sierra
03/1835	Cáceres
03/1849	La Zarza, Fregenal de la Sierra
03/1859	Olivenza
04/1859	Fregenal de la Sierra
05/1867	Badajoz
03/1868	Cabeza del Buey
04/1869	Talaván
04/1881	La Zarza
05/1891	Fregenal de la Sierra
04/1896	Badajoz
05/1896	Fregenal de la Sierra
04/1903	Cáceres
03/1905	Azuaga
04/1905	La Haba, Fregenal de la Sierra
03/1907	Diferentes poblaciones (no se especifica en el texto)
04/1907	Zafra
05/1925	Coria, Reina, Fuente del Arco
04/1927	Cilleros, Coria
04/1929	Magacela, La Albuera, Arroyo de San Serván, Coria, Alcántara
03/1931	Miajadas

1.2. Anomalías en el índice NAO

Las rogativas *pro-pluvia* se celebraban cuando realmente había necesidad de lluvia. Esto quiere decir que habría un déficit de precipitación desde un tiempo atrás, desde meses anteriores. Domínguez-Castro et al. (2019) analizaron la climatología de las sequías en España para el periodo 1961-2014; este estudio muestra que, a escalas relacionadas con las sequías agrícolas (de 3 a 6 meses), Extremadura muestra un número bajo de eventos pero con una gran duración e intensidad. Además, esta región muestra la duración media más alta, de 10 a 20 semanas. Por tanto, sería posible encontrar anomalías en el índice NAO en meses previos a la celebración de rogativas relacionados con la falta de precipitación. Especialmente, esto ocurre en los meses de invierno cuando la influencia de la NAO en la precipitación es mayor (Gallego et al., 2005).

Para calcular las anomalías del índice NAO se toma como referencia el periodo que abarcan las 21 rogativas *pro-pluvia* recuperadas, es decir, el periodo 1824-1931. Se han calculado las anomalías mensuales para estas 21 fechas de rogativas hasta dos inviernos anteriores a la celebración de las rogativas. El cálculo de las anomalías se explica a continuación. Primero, se ha seleccionado el valor del índice NAO mensual desde el mes en el que se celebró la rogativa hasta dos inviernos anteriores (por ejemplo, para la rogativa de marzo de 1931 se ha seleccionado el periodo 12/1930-03/1931 del índice NAO); esto se hace para los 21 eventos de rogativa. Segundo, se calcula el valor medio mensual del índice NAO para todo el periodo (1824-1931), y se halla la diferencia entre estos valores y el del índice NAO en los meses correspondientes al periodo seleccionado de cada rogativa. De esta manera, se obtienen 21 series de anomalías del índice NAO correspondientes a cada evento de rogativa. Como tercer y último paso, se realiza la media de cada mes de las 21 series de anomalías, obteniéndose así una única serie de anomalías.

Para estudiar la significatividad de estas anomalías se ha usado un procedimiento similar al de muestreo aleatorio (*bootstrap resampling procedure*) usado por Piervitali y Colacino (2001). Por tanto, se han recopilado 21 valores aleatorios del índice NAO para cada mes de todo el periodo (1824-1931) y se han calculado las anomalías. Este procedimiento se ha realizado 500 veces, y se ha obtenido la media mensual y la desviación típica del conjunto de datos del muestreo aleatorio para determinar la significatividad de las anomalías en el índice NAO al 95% de nivel de confianza.

En la Figura 3.2 se presentan las anomalías mensuales del índice NAO desde el mes de celebración de la rogativa (derecha del eje x) hasta dos inviernos anteriores (izquierda del eje x). El color gris oscuro indica que ese valor es estadísticamente significativo al 95% de nivel de confianza.

Como se puede ver en la Figura 3.2, todas las anomalías son negativas desde el mes de julio hasta el mes de abril del siguiente año. Esto quiere decir que, en estos meses de

anomalías negativas, el anticiclón de las Azores se desvía hacia el norte dando valores más positivos del índice NAO que en condiciones normales. Solo el valor del mes de febrero previo a la celebración de las rogativas es estadísticamente significativo. El valor de anomalía negativa de este mes de febrero es superior al resto, esto indica que las condiciones medias eran más secas de lo normal. Por tanto, esto es un indicativo de que la celebración de rogativas posteriores a este mes no es casual. De hecho, como se puede ver en la Figura 1.4 del Capítulo 1, la precipitación en Badajoz y Cáceres presenta dos máximos (uno en primavera y otro en otoño), y las 37 rogativas recuperadas fueron celebradas en estas estaciones junto con la de invierno. Además, la celebración de rogativas *pro-pluvia* está directamente relacionada con la agricultura y la ganadería. En Extremadura el tiempo de siega se da en primavera y en otoño, y la precipitación media en otoño es mayor que en primavera. Por tanto, los campos en otoño están húmedos y no se suele dar un déficit de precipitación en esta época (Mühlbauer et al., 2016); por eso se encuentran menos rogativas celebradas en otoño. Por el contrario, como la precipitación media en primavera es menor, es posible que un invierno seco conlleve condiciones de sequía severas si la precipitación de la primavera no es suficiente para contrarrestar este déficit. Por lo tanto, los campos pueden

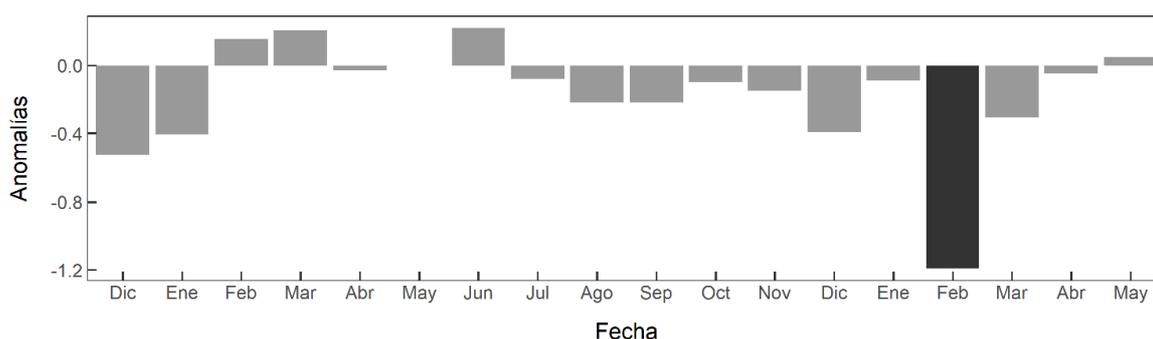


Figura 3.2. Las anomalías mensuales del índice NAO desde el mes de celebración de las rogativas (derecha del eje x) hasta dos inviernos anteriores (izquierda del eje x). La barra gris oscura indica que ese valor es estadísticamente significativo al 95% de nivel de confianza.

tener condiciones secas y tener problemas con los cultivos si la lluvia es escasa. De esta manera, la precipitación en invierno puede jugar un papel importante en la celebración de rogativas en los meses de primavera. El desarrollo de la sequía se da lentamente, y sus efectos aparecen en la agricultura tras el cúmulo de varios meses de lluvia escasa. Por todo esto, podría haber una relación entre la celebración de rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO en los meses anteriores, como se va a estudiar más detalladamente a continuación.

1.3. Tablas de contingencia

Para completar el estudio de las anomalías se va a estudiar la asociación del valor del índice NAO justo en los meses previos a la celebración de las rogativas ($n-1$, $n-2$ y $n-3$) con el valor del índice NAO en el mes n (es decir, el mes en el que se celebró la rogativa). Para proceder al análisis de estas dos variables (rogativas e índice NAO) se ha hecho uso de las

tablas de contingencia puesto que la celebración de una rogativa es una variable cualitativa y con estas tablas se puede analizar este tipo de variables. El índice NAO se ha ordenado por filas en intervalos de 0.5, y las rogativas se han dividido en celebradas y no celebradas (meses en los que no se celebraron rogativas) en esos intervalos. Considerando el número total de meses del índice NAO en cada intervalo, se calcula en cada intervalo el porcentaje de rogativas *pro-pluvia* celebradas y no celebradas. Además, se calcula el promedio de los porcentajes con el fin de establecer un valor (distribución de no dependencia) que indique que no se encuentra una relación entre ambas series (índice NAO y rogativas). Se ha analizado la relación entre el porcentaje de rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO a partir del test χ^2 con un nivel de confianza al 95%, siendo la hipótesis nula (H_0) la no dependencia de ambas series. El análisis se ha dividido en tres partes:

1. Se han relacionado las rogativas *pro-pluvia* en el mes n con el índice NAO en los meses n , $n-1$, $n-2$ y $n-3$. Se ha construido una tabla de contingencia para cada caso con 20 grados de libertad.
2. Se han calculado dos medias móviles del índice NAO, definiendo ventanas de dos y tres meses de longitud. Para las series calculadas con la ventana de dos meses, se ha asociado el promedio del índice NAO de los meses n y $n-1$ y el promedio de los meses $n-1$ y $n-2$ a la rogativa celebrada en el mes n . Para las series calculadas con la ventana de tres meses, se ha asociado el promedio del índice NAO de los meses n , $n-1$ y $n-2$ y el promedio de los meses $n-1$, $n-2$ y $n-3$ a la rogativa celebrada en el mes n . Se ha construido una tabla de contingencia con 16 grados de libertad para cada caso.
3. Se han calculado dos índices NAO invernales: NAO_{DJF} (calculado como el promedio del índice NAO en los meses de diciembre, enero y febrero) y NAO_{DJFM} (calculado como el promedio del índice NAO en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo). Se han agrupado las rogativas celebradas en el mismo año (es decir, se ha sumado la cantidad de rogativas celebradas en un mismo año) y se ha asociado a ellas el índice NAO invernal. Se ha construido una tabla de contingencia para cada caso con 13 (NAO_{DJF}) y 12 (NAO_{DJFM}) grados de libertad.

La Figura 3.3 muestra los porcentajes de rogativas *pro-pluvia* celebradas correspondientes a cada intervalo del índice NAO. En concreto, se muestra la asociación entre las rogativas celebradas en el mes n y el índice NAO en los meses n (a), $n-1$ (b), $n-2$ (c) y $n-3$ (d). Las líneas horizontales negras representan el valor esperado si no hubiera relación entre ambas series (la distribución de la hipótesis nula) para cada caso. Como se ha comentado anteriormente, las rogativas *pro-pluvia* se celebraban cuando se daban condiciones secas en el clima y, además, estas mismas condiciones están relacionadas con valores positivos del índice NAO (Trigo et al., 2004; Vicente-Serrano y Cuadrat, 2007). Teniendo en cuenta este hecho, en la Figura 3.3 (b-d) se puede ver que el número de valores

positivos del índice NAO es mayor que el número de valores negativos (atendiendo solo a la distribución de valores en el eje x). Por el contrario, en la Figura 3.3 (a) no se aprecia mucha diferencia entre los valores positivos y negativos. Una posible explicación a este hecho puede estar en el día de celebración de la rogativa *pro-pluvia*: si la rogativa se celebró al principio del mes, el índice NAO en el mes n es la media de todo el mes completo, por lo que, en principio, no tendría relación con la sequía que da lugar a la celebración de la rogativa en el mismo mes.

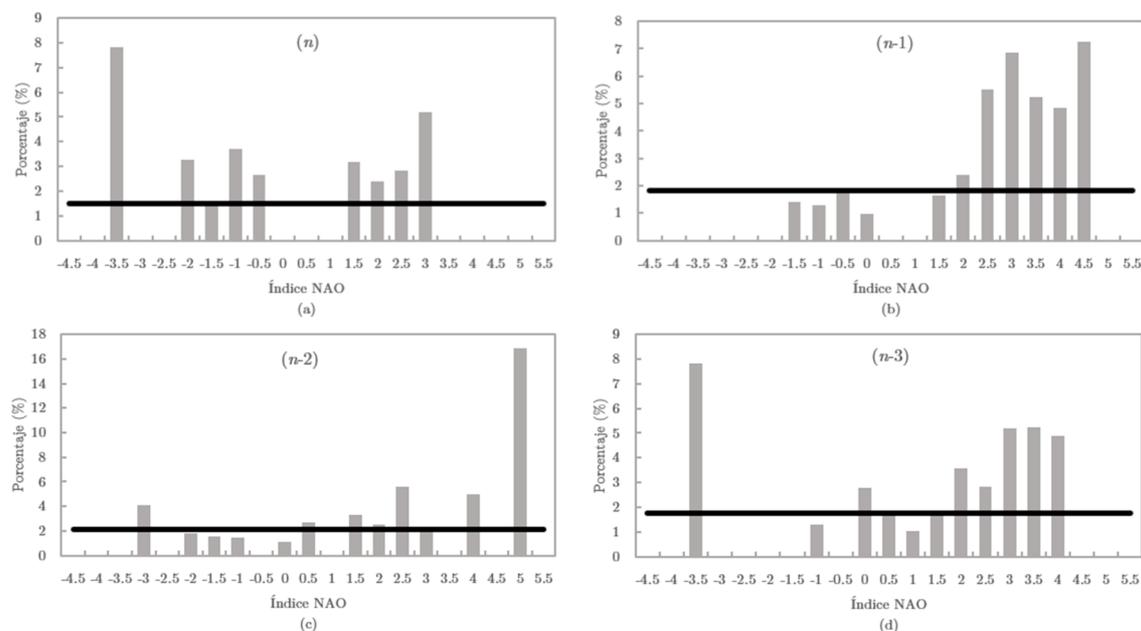


Figura 3.3. Porcentajes de rogativas *pro-pluvia* celebradas en primavera asociadas al índice NAO en los meses: n (a), $n-1$ (b), $n-2$ (c) y $n-3$ (d). Las líneas negras horizontales muestran la distribución de la hipótesis nula para cada caso.

La distribución del índice NAO es normal, por lo que los extremos de la distribución contienen muchos menos eventos NAO que otros puntos de la distribución. Por tanto, al calcular los porcentajes de rogativas celebradas en cada intervalo del índice NAO, si hay rogativas asociadas a los valores extremos del índice NAO, el porcentaje de rogativas será mayor. Se puede observar un alto porcentaje de rogativas *pro-pluvia* encajonadas en intervalos con valores positivos en la Figura 3.3 (b,c). Este hecho concuerda con lo mencionado en los apartados anteriores. Es decir, las condiciones de sequía están relacionadas con valores positivos del índice NAO. En cambio, en la Figura 3.3 (a) hay un menor porcentaje de valores positivos y, además, el valor de porcentaje más elevado se encuentra en un intervalo negativo del índice NAO. En la Figura 3.3 (d) se puede ver que hay un mayor porcentaje de valores positivos, pero el valor más elevado se encuentra en un intervalo negativo, aunque este valor podría ser un *outlier*.

Las rogativas se celebran en un cierto día (una rogativa se puede celebrar al principio del mes o al final) y el valor del índice NAO es mensual, es decir, tiene el mismo valor para

todos los días del mes. Para intentar suavizar este problema se han calculado dos medias móviles como se ha explicado anteriormente. La Figura 3.4 representa la asociación entre las rogativas *pro-pluvia* celebradas y el valor medio de los meses del índice NAO: n y $n-1$ (a); n , $n-1$ y $n-2$ (b); $n-1$ y $n-2$ (c); $n-1$, $n-2$ y $n-3$ (d). La línea horizontal negra representa la distribución de la hipótesis nula para cada caso. A diferencia de la Figura 3.3 (a), en la Figura 3.4 (a,b) (donde entra en juego el mes n) hay un menor número de valores negativos (atendiendo solo a la distribución de valores en el eje x). Esto es debido a que las medias móviles se han calculado con datos de meses anteriores.

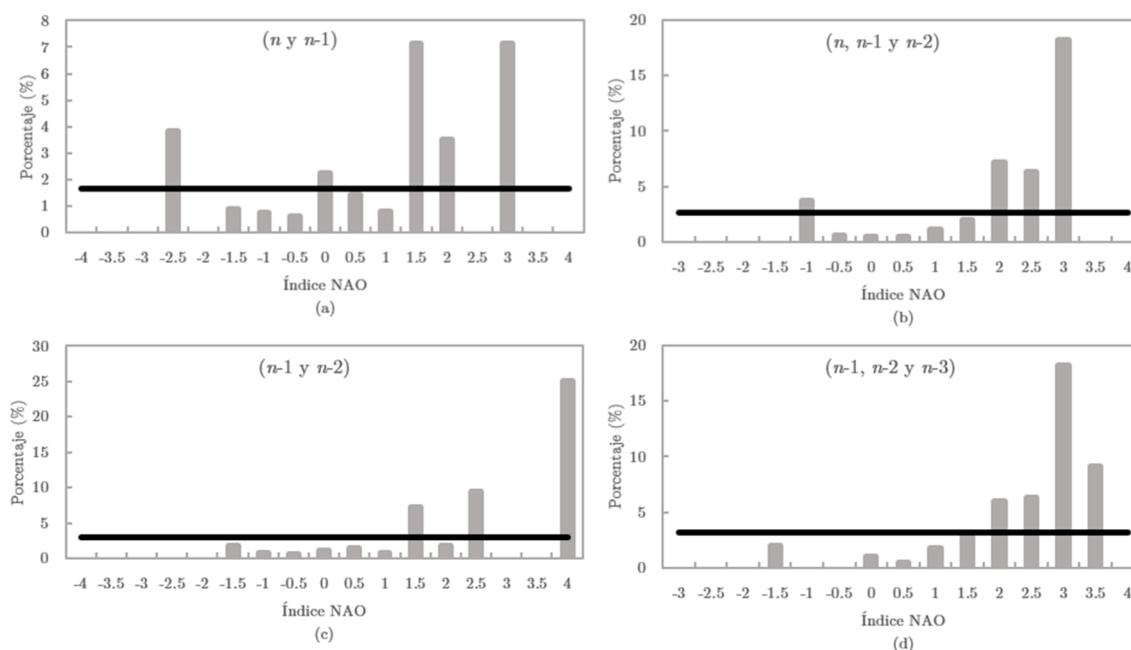


Figura 3.4. Porcentajes de rogativas *pro-pluvia* asociadas con el valor medio del índice NAO en los meses: n y $n-1$ (a); n , $n-1$ y $n-2$ (b); $n-1$ y $n-2$ (c); $n-1$, $n-2$ y $n-3$ (d). Las líneas negras horizontales muestran la distribución de la hipótesis nula para cada caso.

Al igual que en la Figura 3.3, en la Figura 3.4 se observa un elevado porcentaje de rogativas con valores positivos del índice NAO. Esto se ve más claro cuando el mes n no aparece en el análisis, concretamente en la Figura 3.4 (c,d). Esto es algo razonable debido a que el mes en el que se celebró la rogativa tiene menos influencia que los meses anteriores a la sequía que origina la rogativa, anteriormente mencionado.

Finalmente, la Figura 3.5 muestra el porcentaje de rogativas *pro-pluvia* celebradas (agrupadas en el mismo año) correspondientes a cada intervalo del índice NAO invernal calculado: NAO_{DJF} (a) y NAO_{DJFM} (b). La línea negra horizontal, igual que en las figuras anteriores, representa la distribución de la hipótesis nula para cada caso. Ambas figuras muestran un mayor número (y un mayor porcentaje) de valores positivos. Estos resultados pueden ser debidos a que, en este análisis, no se ha tenido en cuenta el mes n al ser un índice NAO invernal. De esta manera, pueden verse directamente los efectos de los meses anteriores.

Teniendo en cuenta todos los resultados expuestos hasta ahora, las rogativas *pro-pluvia* estarían asociadas con valores negativos del índice NAO en el mes n y no sería apropiado asociarlas con este mes. Por otra parte, la desincronización entre las rogativas *pro-pluvia* (celebrada en el mes n) y el índice NAO (meses $n-1$, $n-2$ y $n-3$) puede ser explicada por la larga duración media de las sequías en el suroeste de España, que es de alrededor de 15 semanas cuando se tratan de sequías agrícolas (Domínguez-Castro et al., 2019). Además, Trigo et al. (2004) encontraron este retraso de un mes entre el índice NAO invernal (DJF) y el caudal de los ríos.

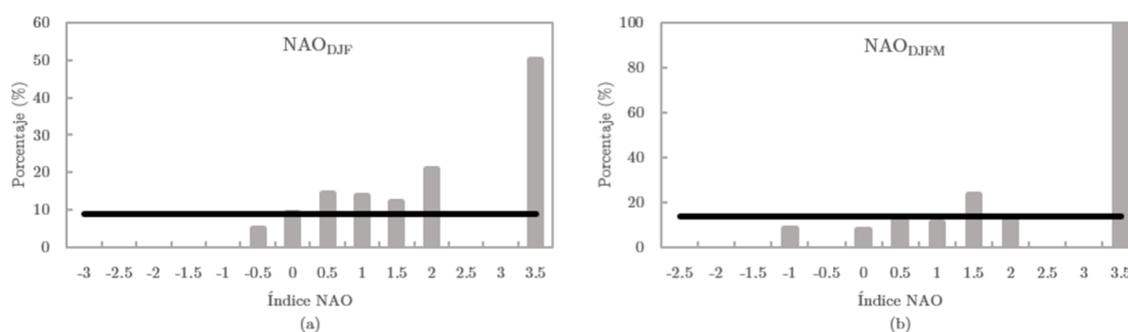


Figura 3.5. Porcentajes de rogativas *pro-pluvia* asociadas al valor índice NAO invernal: NAO_{DJF} (a) y NAO_{DJFM} (b). Las líneas negras horizontales muestran la distribución de la hipótesis nula para cada caso.

Por último, se ha llevado a cabo el test χ^2 para todos los análisis de esta sección (1, 2 y 3); los resultados se resumen en la Tabla 3.2. Todos los valores son estadísticamente significativos y los más relevantes se indican mediante un asterisco. Los valores más bajos del estudio 1 se encuentran en los meses $n-1$ y $n-2$, al igual que en el estudio 2. Esto está de acuerdo con lo discutido anteriormente en las figuras anteriores (Figura 3.3, 3.4 y 3.5) y con el sentido original de la celebración de rogativas *pro-pluvia*. Es decir, las rogativas se celebraban cuando aparecían condiciones de sequía. Por el contrario, cuando el mes n aparece en el análisis, los resultados muestran valores más altos del p -valor. Finalmente, la relación entre las rogativas y el índice NAO invernal (DJFM) muestra un mejor resultado, tanto en las figuras como en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados del test χ^2 , para todos los análisis llevados a cabo (ver pág. 50), de la relación entre las rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO. Los asteriscos muestran los casos más relevantes.

	Mes	n	$n-1$	$n-2$	$n-3$
1.	p -valor	$5.34E^{-6}$	$7.30E^{-7*}$	$6.37E^{-18*}$	$1.07E^{-5}$
2.	Media de los meses	n y $n-1$	n , $n-1$ y $n-2$	$n-1$ y $n-2$	$n-1$, $n-2$ y $n-3$
	p -valor	$7.57E^{-6}$	$5.47E^{-20}$	$2.62E^{-36*}$	$2.68E^{-17}$
3.	Índice NAO invernal	NAO_{DJF}	NAO_{DJFM}		
	p -valor	$2.55E^{-51}$	$2.82E^{-130*}$		

En resumen, los resultados sugieren que las rogativas *pro-pluvia* son un buen *proxy* para el índice NAO (en particular, para el índice NAO invernal). Además, las rogativas *pro-*

pluvia pueden ser asociadas al índice NAO en los meses anteriores (específicamente, en los meses $n-1$ y $n-2$). Estos resultados podrían mejorar los análisis de rogativas celebradas en siglos anteriores teniendo en cuenta esta relación entre ellas y el índice NAO.

1.4. Base de datos de rogativas *pro-pluvia*

Con independencia de todos los análisis llevados a cabo con las rogativas recuperadas, estas forman parte de la base de datos internacional de rogativas *pro-pluvia* (INPRO, del inglés *INternational Pro-pluvia ROgation database*) (<https://inpro.unizar.es/>) creada por Domínguez-Castro et al. (2021). En esta base de datos se recuperan más de 3500 fechas de rogativas entre 1333 y 1949 de 11 países distintos.

Aparte de las 37 rogativas *pro-pluvia* ya mencionadas se han recuperado otras 108 rogativas celebradas en Extremadura. En total, 145 rogativas *pro-pluvia* celebradas en distintas poblaciones de la región extremeña forman parte de la base de datos INPRO. Las 145 rogativas pertenecen, en total, a 25 poblaciones distintas de Extremadura y están datadas entre el año 1504 y 1931. En la Tabla A.1 del Apéndice A se puede consultar toda la información acerca de estas 145 rogativas, como la fecha, la población o la fuente documental de la que se han extraído. Un asterisco en la columna “población” indica que en la descripción de la rogativa no aparecía explícitamente que fuera por la lluvia, pero se ha considerado como tal debido a otras características. Las rogativas se celebraban rezando o sacando en procesión a uno o varios santos (o imágenes). En cada población se solía celebrar la rogativa con la misma imagen dependiendo de cuál fuera el motivo. Por tanto, las rogativas que poseen el asterisco se han considerado *pro-pluvia* por haberse celebrado con imágenes a las que se rogaba por la lluvia y por ser fechas en las que era común realizar este tipo de rogativas. Por último, en la Tabla A.2 se puede consultar la fuente documental de la que se ha extraído la información de las distintas rogativas.

2. Precio del cereal

2.1. Introducción

El precio del cereal (cebada, centeno y trigo) se ha documentado continuamente desde la Edad Media en Europa (Allen, 2001). La variación del precio de mercado es un hecho que siempre ha preocupado a toda la población y, más concretamente, al sector económico. En las últimas décadas se han analizado las causas y consecuencias de la variación en el precio de los distintos granos en Europa; además de los cambios puros económicos, se ha analizado su relación con la variabilidad climática (Campbell y Gráda, 2011; Esper et al., 2017; Kiss et al., 2011; Ljungqvist et al., 2022; Meier et al., 2007; Moreno et al., 2020; Pfister y Brázdil, 2006; Söderberg, 2006). Los distintos trabajos han hallado una relación entre el precio del grano y variables climáticas, como la temperatura o la precipitación. Por ejemplo,

Bauernfeind y Woitek (1999) analizaron las fluctuaciones en el precio del grano en Alemania para el periodo 1500-1599 (la revolución de los precios del siglo XVI); encontraron que la precipitación en invierno y las bajas temperaturas en otoño tenían un impacto positivo en el precio. Zhang et al. (2011) muestran una anticorrelación entre el precio del grano y datos de temperatura para el periodo 1200-1800 en Europa. Además, Esper et al. (2017) analizaron el precio del grano de 19 ciudades distintas de Europa para los siglos XIV-XVIII, junto con índices de sequía y de temperatura, y encontraron una relación entre ellos.

Son varios los *proxies* climáticos referentes a los cereales: el precio de los distintos cereales, la fecha de maduración, la fecha de las cosechas o las plagas son algunos de ellos, y todos están fechados con precisión. Estos *proxies* se han usado en distintas reconstrucciones climáticas. Por ejemplo, las fechas de las vendimias, el precio de los cereales o la fecha de la cosecha del grano se han usado para reconstruir la temperatura (Brázdil et al., 2005; Chuine et al., 2004; Le Roy Ladurie et al., 2006; Nordli et al., 2003) y para reconstrucciones *multi-proxy* (Guiot et al., 2005). Las fechas de las vendimias se han usado también para reconstrucciones del índice NAO (Souriau y Yiou, 2001).

Aunque en Europa se ha analizado la relación entre las fluctuaciones del precio de los cereales (y de *proxies* similares) y la variabilidad climática, en la PI no se ha estudiado este hecho. Solo se han considerado series puntuales del precio de los cereales para estudios que abarcan una gran región de Europa; por ejemplo, Esper et al. (2017) usa datos del precio del cereal de Madrid y Barcelona para llevar a cabo su estudio. Por eso es importante seguir investigando la relación entre este *proxy* y el clima en la PI para futuras reconstrucciones climáticas.

2.2. Precio del cereal en el suroeste de la PI

El *Correo mercantil de España y sus Indias* dedicaba una sección a la agricultura y al tiempo de las distintas provincias de España. Semanalmente se describía lo acontecido con el tiempo y se anotaba el precio mínimo y máximo del trigo y la cebada desde el 1 de octubre de 1792 hasta el 30 de junio de 1808. Para estudiar la relación entre la variación del precio y el clima en el suroeste de la PI se ha digitalizado el precio del grano para las ciudades de esta región en las que se registraba. Además, se han usado datos de temperatura del conjunto de datos de reanálisis EKF400v2 de Valler et al. (2021).

En la Figura 3.6 se ha representado la evolución del precio del trigo (gráfico superior) y de la cebada (gráfico inferior) para cuatro ciudades importantes del suroeste de la PI. Los precios se han normalizado calculando el *z-score*, es decir, el valor del precio menos la media de todo el periodo dividido por la desviación típica. Se observa cómo hay pequeños espacios de tiempo en los que no se registraba el precio del cereal durante el periodo 1792-1804, y un gran hueco entre 1804 y 1807. En general, las cuatro series del precio del cereal del suroeste de la PI se solapan en gran medida durante todo el periodo. Se puede apreciar una gran

subida en los dos primeros años (1792-1794) del precio del trigo, y se observa cómo se estaba produciendo una subida mayor durante el año 1804. Respecto a la cebada, la subida del precio en estos años es menor; sin embargo, se aprecia una subida mayor en 1797-1798. En los primeros meses de 1794, los precios del trigo y la cebada decaen para luego volver a subir hasta el año 1798. Estas subidas del precio podrían estar relacionadas con las Guerras revolucionarias francesas (o Guerras de Coalición) que se extendieron desde 1792 hasta 1802. Este hecho no se da solo en la PI sino que se ha observado en toda Europa (ver Figuras 2 y 3 de Esper et al. (2017)).

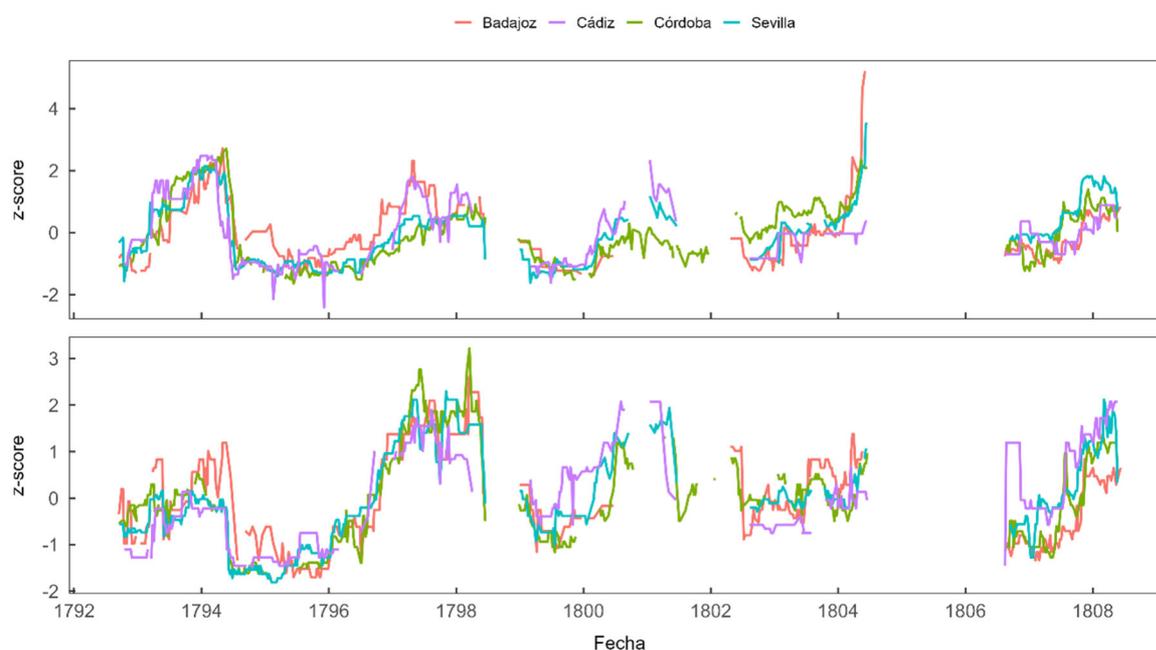


Figura 3.6. Evolución del precio normalizado del trigo (gráfico superior) y de la cebada (gráfico inferior) para las ciudades de Badajoz, Córdoba, Sevilla y Cádiz.

No obstante, en ambas gráficas se observa un ciclo con un periodo de aproximadamente dos años. Las series de datos económicos presentan periodos de volatilidad alta o baja (es decir, los precios pueden subir o bajar rápidamente), o no cambian en gran medida. Con el fin de eliminar este aspecto de la serie del precio del cereal se ha calculado la media móvil de ambas series (trigo y cebada) con una longitud de ventana de 10 años. En concreto, se ha calculado la media móvil para poder comparar la serie con la temperatura y precipitación del conjunto de datos de reanálisis EKF400v2 para el mismo periodo y para un punto cercano a las cuatro ciudades. Antes de realizar el cálculo de la media móvil se han seguido los siguientes pasos: 1) se ha calculado la media mensual de cada serie del precio del cereal, 2) se ha calculado la media mensual de todas las series conjuntamente, 3) se ha calculado la media anual de esta última serie y de cada una por separado, 4) se ha procedido a imputar los valores faltantes en cada serie, 5) se ha calculado el *z-score* de cada serie. La imputación se ha realizado cogiendo el valor anual más cercano al valor faltante. Respecto a la temperatura y precipitación, se han calculado los valores anuales y, posteriormente, el *z-*

score. Finalmente, se han calculado las medias móviles con la ventana de 10 años para todas las series de datos. En la Figura 3.7 se ha representado la comparación entre las medias anuales normalizadas de la temperatura y precipitación con las del precio del trigo (gráfico superior) y de la cebada (gráfico inferior). La línea negra representa la media anual normalizada de todas las series del precio (Badajoz, Córdoba, Sevilla y Cádiz) y las discontinuas las de cada una de ellas. La línea roja muestra la temperatura media anual normalizada y la línea azul las anomalías de precipitación media anual normalizada de la serie EKF400v2. La Figura 3.8 muestra lo mismo que la Figura 3.7 pero aplicando la media móvil con la ventana de 10 años.

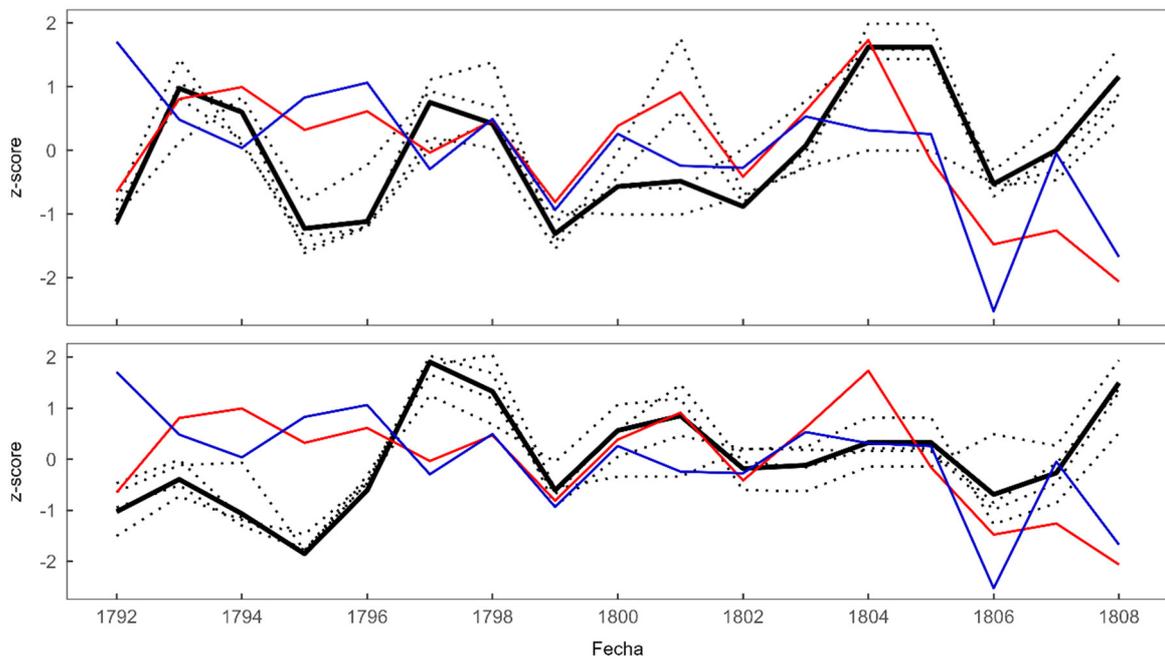


Figura 3.7. Medias anuales normalizadas de la temperatura (línea roja) y precipitación (línea azul) del conjunto de datos EKF400v2 y el precio medio anual normalizado del trigo (gráfico superior) y de la cebada (gráfico inferior). La línea negra representa la media de todas las series del precio (Badajoz, Córdoba, Sevilla y Cádiz) y las discontinuas pertenecen a cada una de ellas.

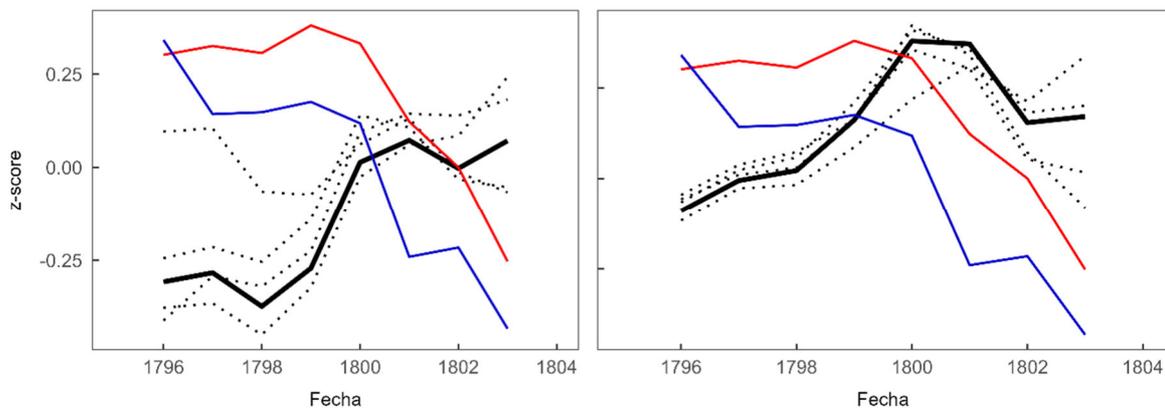


Figura 3.8. Igual que la Figura 3.7 pero aplicando la media móvil con la ventana de 10 años.

Aunque, como se mencionó en la sección 2.1, otros estudios han encontrado una relación entre el precio del cereal y las variables climáticas, en la Figura 3.7 no se aprecia una clara relación entre ambas. Sin embargo, al aplicar la media móvil con la ventana de 10 años (Figura 3.8) parece que pueda haber una anticorrelación entre el precio del cereal y la temperatura y precipitación. De todas formas, el periodo de estudio considerado no es lo suficientemente amplio como para obtener conclusiones. Por tanto, una posible extensión de esta tesis será un análisis más profundo de la posible relación entre el precio del cereal y las variables meteorológicas, así como la digitalización completa de las series del precio del trigo y de la cebada para distintas poblaciones menores del suroeste de la PI; de esta forma, se podrá tener una visión más general de la relación entre el precio del cereal y las variables climáticas.

Capítulo 4

Datos de eventos extremos. Riadas

1. Introducción

Las inundaciones son uno de los desastres naturales más catastróficos. En términos de pérdidas económicas y de vidas humanas, los desastres relacionados con el clima, incluidas las inundaciones, tienen efectos devastadores sobre las infraestructuras. En Europa, cerca del 40% del total de los daños económicos directos producidos durante el periodo 2009-2018 fueron debido a inundaciones (CRED, 2020). Además, se prevé que los daños económicos causados por las inundaciones, tanto directos como indirectos (aquellos que afectan a otros sectores, como los servicios comerciales y públicos), se incrementen a finales del siglo XXI bajo el futuro cambio climático (Dankers y Feyen, 2009; Rojas et al., 2013). Para reducir estos daños en las infraestructuras es necesario calcular periodos de retorno a largo plazo, al menos de 500 años preferiblemente. La mayoría de series instrumentales de datos de caudal no cubren el periodo de 500 años, puesto que comienzan a principios del siglo XX (Balasch et al., 2019; Barriendos y Rodrigo, 2006; Moreno et al., 2005; Sánchez-García et al., 2019). Por ello, son muchas las iniciativas que se han llevado a cabo para recuperar cronologías históricas de inundaciones en Europa para extender las series instrumentales (Blöschl et al., 2020; Glaser et al., 2010; Macdonald y Black, 2010).

En la PI, Barriendos y Rodrigo (2006) han realizado un estudio sobre las distintas cuencas a través de fuentes documentales. Además, se pueden encontrar estudios más detallados para diferentes cuencas: (i) Ebro (Balasch et al., 2019; Llasat et al., 2005), (ii) Tajo (Benito et al., 2003), (iii) andaluza mediterránea (Sánchez-García et al., 2019) y (iv) Duero (Bullón, 2011). Además, para la cuenca del Guadiana se han encontrado muy pocos estudios (Barriendos et al., 2014; Moreno et al., 2005; Ortega, 2007; Ortega y Garzón, 2009). En particular, Barriendos et al. (2014) mostraron la densidad de eventos de riadas en relación al tiempo y al espacio que cubre (ver Tabla 4 de Barriendos et al. (2014)) para cada cuenca de la PI. Estos valores dan una idea de la información relacionada con las riadas que ocurren en las cuencas principales. Especialmente, para el Guadiana, la densidad de eventos es 1.8 eventos/cobertura, donde la cobertura se define como el número de años de registros multiplicado por el área de la cuenca en km^2 y dividido por 10^6 . El valor 1.8 se corresponde con el más pequeño respecto de todas las cuencas estudiadas en ese trabajo, lo que sugiere que la cuenca del Guadiana ha sido muy poco estudiada. Por tanto, es posible que el número de eventos de riadas por año y por kilómetro cuadrado sea mucho mayor, especialmente si se tiene en cuenta que muchos afluentes y arroyos afectaron a pequeñas localidades que no han sido estudiadas en este sentido.

El Guadiana es el cuarto río más largo de la PI con 744 km de longitud; la línea verde muestra su cauce en la Figura 4.1. Se encuentra en el suroeste de la PI y, en su último tramo, discurre por la frontera entre España (Badajoz y Huelva) y Portugal (Beja, Faro y Évora) antes de desembocar en el océano Atlántico. El área total de la cuenca (región azul en la Figura 4.1) suma 67129.38 km^2 , incluyendo diferentes provincias y distritos de España

y Portugal. El curso principal del río se divide en tres partes: el Alto Guadiana (principalmente en Castilla-La Mancha, 26455.55 km²), el Guadiana Medio (principalmente en Extremadura, 23443.73 km²) y el Bajo Guadiana (regiones de Andalucía y Portugal, 17230.10 km²).

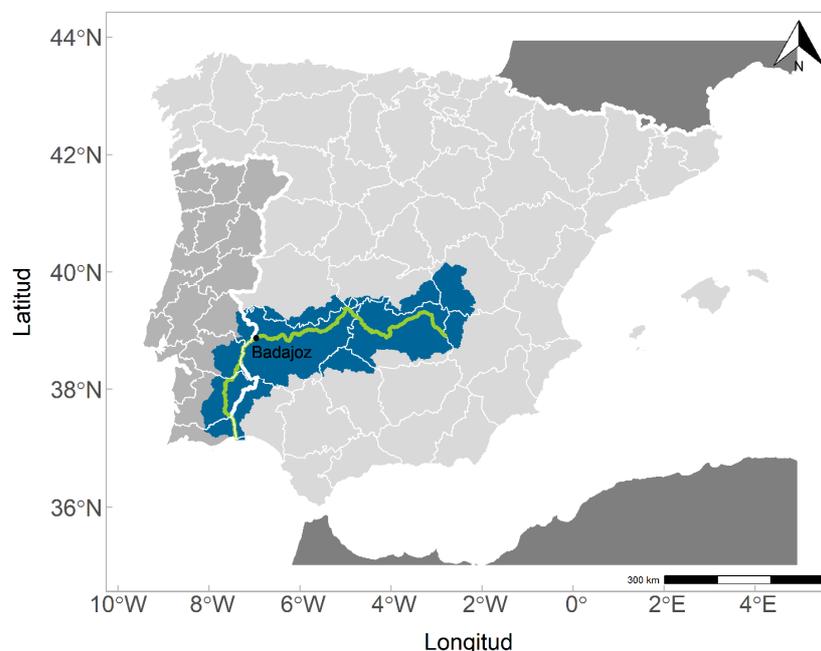


Figura 4.1. Localización de la cuenca del Guadiana (región azul) y del río Guadiana (línea verde) en la PI. El punto negro indica la localización de la ciudad de Badajoz. El mapa se ha obtenido a partir de datos de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (www.chguadiana.es) y del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es).

Los eventos de riadas en el Guadiana se han recuperado para la ciudad de Badajoz (el Guadiana Medio), concretamente, para el Puente de Palmas. Uno de los elementos afectados por las riadas es la población de la ciudad. Por este motivo, a lo largo de los años se han ido situando diferentes placas en el puente y en ciertos lugares de la ciudad para recordar la altura máxima a la que llegó el agua de las riadas (en la Figura 4.2 (b) se muestran dos ejemplos). El Puente de Palmas se construyó en el siglo XV, y ha sufrido daños causados por diversas riadas a lo largo de la historia; por tanto, en principio, se podrían recuperar eventos de riadas desde el año 1500. Más recientemente, en el siglo XX, se colocó una escala métrica en el puente para medir sistemáticamente la altura del agua (se muestra en la Figura 4.2 (a)). La serie instrumental de altura del agua y caudal de la escala métrica se ha extraído del Anuario de aforos 2016-2017 del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX, www.ceh.cedex.es). En concreto, se han obtenido los datos de caudal para la estación 4018 (la cuenca del Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz), la cual está disponible para el periodo 1913-1994. De acuerdo con todo lo mencionado, son dos las razones fundamentales por las que se ha elegido este lugar para recuperar eventos de riadas:

- i) el largo periodo de observaciones de la altura del agua;
- ii) la mayoría de fuentes históricas describen el impacto de las riadas en el puente.

En total, se han recuperado datos de 37 riadas catastróficas desde el año 1500 a partir de diferentes fuentes documentales. En la sección 2 de este capítulo se explica cómo se han considerado como catastróficas las riadas. En la Tabla 4.1 se recogen estas 37 riadas, la fecha en la que ocurrieron y la altura del agua alcanzada. La información sobre las fuentes documentales de las que se obtuvieron estas riadas ya se expuso en el Capítulo 2. En algunos casos hay información de la misma riada catastrófica en los datos instrumentales y en las fuentes históricas, en este aspecto el valor del caudal elegido es el de la serie instrumental.



Figura 4.2. a) Escala para medir la altura del agua en el Puente de Palmas en Badajoz (fotografía de José M. Vaquero); b) las dos últimas placas de la riada catastrófica de diciembre de 1876 en diferentes lugares de Badajoz.

2. Clasificación de las riadas

Las riadas se pueden clasificar teniendo en cuenta distintos aspectos. En el caso de esta tesis doctoral, la magnitud de las riadas se ha clasificado atendiendo al impacto causado por estas en la ciudad de Badajoz. Para establecer la clasificación de las riadas se ha consultado el proyecto *Floodup* (Llasat-Botija et al., 2018). El objetivo de este proyecto fue el de mejorar la información del impacto causado por las riadas en el noreste de la PI, y la

clasificación se puede encontrar en su página web (www.floodup.ub.edu). En resumen, la clasificación es:

- * Riada ordinaria: el río no se desborda y causa pequeños daños.
- * Riada extrema: el río se desborda y causa daños mayores.
- * Riada catastrófica: el río se desborda y causa importantes daños como la destrucción parcial de puentes, construcciones o la muerte de animales y/o personas.

De todas las riadas documentadas y encontradas en las distintas fuentes documentales, solo se han considerado para este estudio las riadas catastróficas, definidas de acuerdo a la clasificación anterior. En particular, se han considerado dos aspectos para clasificar como catastrófica una riada:

- 1) La altura del agua alcanzada: solo se han recuperado las riadas con más de 6 m de altura en el Puente de Palmas.
- 2) La descripción de la riada: en ausencia de datos sobre la altura del agua, la descripción de la riada puede contribuir a obtener la magnitud de la riada. Por ejemplo, descripción del número de muertes, daños en la agricultura o daños en construcciones.

Tabla 4.1. Las 37 riadas catastróficas recuperadas a partir de las distintas fuentes documentales desde el 1500, la fecha y la altura alcanzada.

Año	Mes	Día(s)	Altura agua (m)	Año	Mes	Día(s)	Altura agua (m)
1545	1	18-28	14.78	1915	1	5	7
1596	12			1916	3	14	6
1603	12	19-26	14.80	1917	2	15	6.5
1708	3			1924	3	27	6
1736	12			1926	2	3-4	7
1740	2			1927	12	27	7
1758	1	5-6		1936	2	22	
1766	12	5-6		1940	1	6	7
1796	1	29-30	11.34	1941	2	1	7.5
1814	3	3-7	12.10	1947	3	6	8
1823	2	8-11	9.4	1951	3	15	6
1859	1	24-29	11.26	1955	12	18	6.75
1869	2			1962	1	1	7
1876	12	6-7	12.50	1964	2	27	6.7
1881	1	28	6.69	1969	3	15	7.1
1892	3	13	7	1970	1	13	7.1
1895	1	15-16	6	1979	2	13	7.11
1911	1	25		1985	1	22	6.4
1912	2	6-9	9				

3. Estimación del caudal

Una manera cuantitativa útil de estudiar los eventos de riadas es a través de la relación empírica entre el caudal del río y la altura del agua (Breña Puyol y Jacobo Villa, 2006). Por tanto, se puede estimar el caudal a través de los datos de altura de los distintos eventos de riadas recuperados. Para realizar esta tarea, primero se ha hecho un ajuste de los datos instrumentales de caudal y altura a fin de para obtener la relación entre ambos. Para realizar el ajuste se ha escogido el periodo 1943-1960 por dos razones:

- 1) hay numerosos huecos en la serie antes de este periodo;
- 2) las modificaciones antrópicas más significativas sobre el lecho de los ríos (embalses, nuevos puentes y carreteras accesibles) fueron llevadas a cabo después de este periodo.

Un método muy común para obtener la curva caudal-altura se basa en la función potencial (Breña Puyol y Jacobo Villa, 2006):

$$Q = a(z - z_0)^b$$

donde Q es el caudal, z es la altura medida y z_0 es la altura para $Q = 0$. En el caso de los datos instrumentales del río Guadiana en el Puente de Palmas, este último valor es $z_0 = 0$. Los parámetros a y b son ajustables. Hay varios métodos que pueden ser utilizados para estimarlos (Chow et al., 1988); en este caso, se ha usado el método logarítmico (Breña Puyol y Jacobo Villa, 2006):

$$\log Q = \log a + b \log z. \quad (1)$$

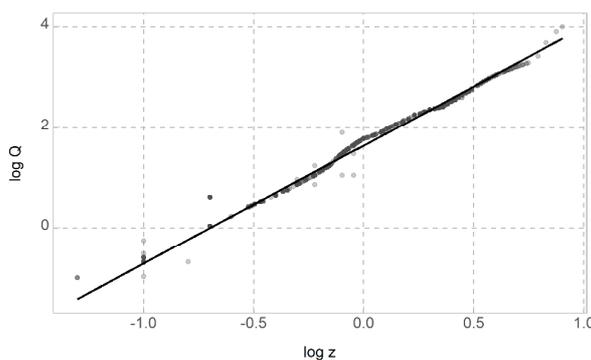


Figura 4.3. Regresión lineal de los datos de caudal y altura en escala logarítmica ajustada a una función de la forma (1). Los puntos se corresponden con los datos diarios instrumentales del río Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz para el periodo 1943-1960.

La Figura 4.3 muestra la regresión lineal de esta ecuación. Se ha obtenido ajustando 6207 valores (puntos grises) de los datos diarios instrumentales de caudal-altura del río Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz para el periodo 1943-1960. Los valores se han representado con puntos grises semitransparentes para ver su densidad. La ecuación (2) se ha obtenido a partir del ajuste de la ecuación (1) y los correspondientes parámetros ajustados se muestran en la Tabla 4.2.

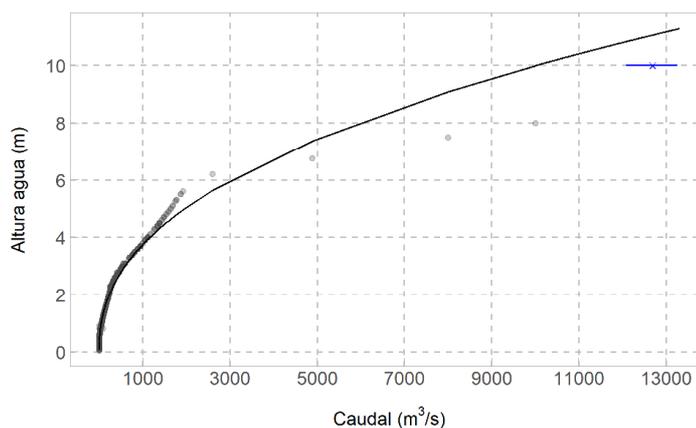
$$Q = 44z^{2.357}. \quad (2)$$

Tabla 4.2. Los parámetros ajustados de la ecuación (1).

Parámetro	Valor	R^2
$\log a$	1.6410 ± 0.0012	0.9942
b	2.357 ± 0.002	

La Figura 4.4 muestra la curva caudal-altura (línea continua) de la ecuación (2) para el río Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz para el periodo 1943-1960. Los puntos grises semitransparentes corresponden a los datos instrumentales. El punto azul y su error es la estimación del caudal máximo de la riada de 1876 por González-Cao et al. (2021). Se puede observar en la Figura 4.4 cómo el valor de caudal obtenido a partir de la ecuación (2) sobreestima el caudal de los datos instrumentales para los valores altos de altura del agua.

Figura 4.4. Curva caudal-altura de la ecuación (2) para el río Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz para el periodo 1943-1960. Los puntos grises semi transparentes representan los datos instrumentales. El punto azul y su error se corresponde con la estimación del caudal máximo de la riada de 1876 por González-Cao et al. (2021).



A partir de la ecuación (2) se ha obtenido el caudal máximo de las grandes riadas recuperadas a partir de los datos de la altura máxima de cada una. La Figura 4.5 muestra la evolución temporal de la magnitud de los eventos de riadas desde el 1500 en el Puente de Palmas en Badajoz. Las barras de color gris claro representan la serie instrumental de caudal-altura. Las barras de color gris oscuro muestran la serie no instrumental de caudal-altura máximas, es decir, los datos de caudal obtenidos a partir de la ecuación (2). Las barras de color negro exponen los eventos de riadas de los que no se ha podido recuperar datos de altura del agua. Las líneas horizontal continua y discontinua indican los valores de 3500 y 7500 m³/s, respectivamente. Estos umbrales se han estimado teniendo en cuenta las descripciones cualitativas sobre el daño y el impacto causado por las riadas y la altura alcanzada por el agua. La línea horizontal continua muestra el umbral para diferenciar las riadas catastróficas. Los eventos de riadas que estén por encima de esta línea serán considerados como riadas catastróficas.

El valor de caudal de $7500 \text{ m}^3/\text{s}$ se ha usado para identificar los eventos de riadas más grandes dentro de la categoría de catastróficas. Hay 8 eventos de riadas que superan este valor; la estimación del caudal para cada riada se muestra en la Tabla 4.3.

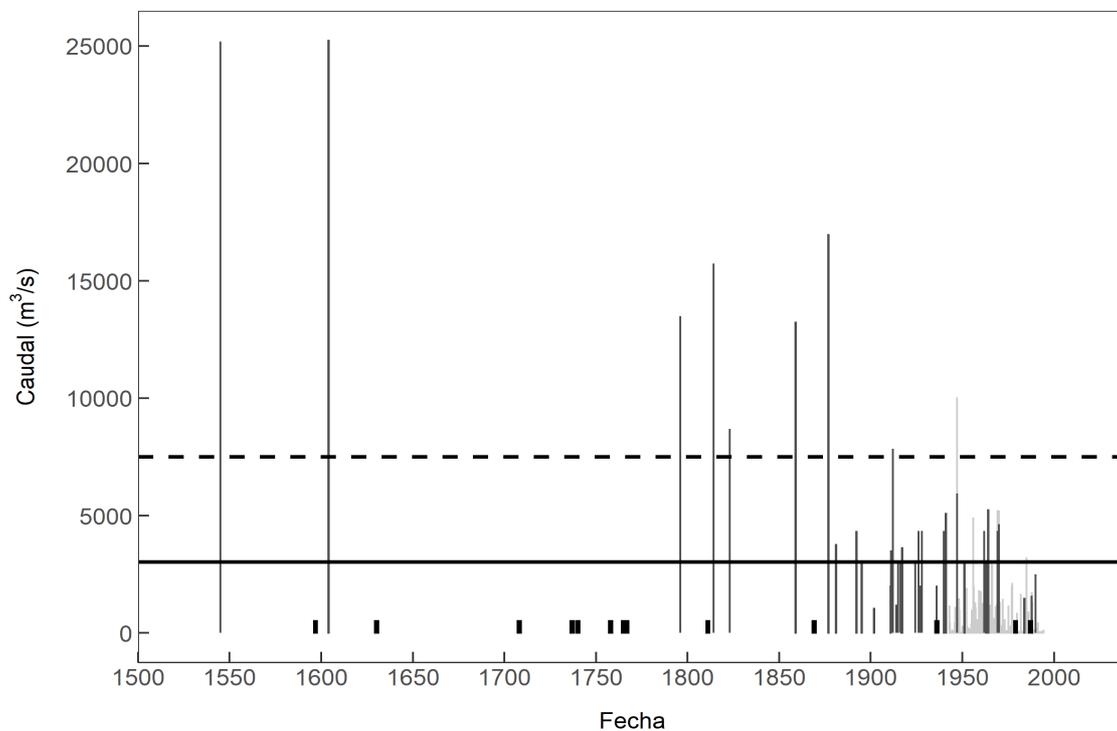


Figura 4.5. Serie instrumental (barras de color gris claro) y no instrumental (barras de color gris oscuro) de caudal-altura para el Puente de Palmas en Badajoz. Las barras de color negro representan los eventos de riadas de los que no se ha podido recuperar datos de altura del agua. Las líneas horizontales continua y discontinua indican los valores de caudal de 3500 y $7500 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Tabla 4.3. Caudal máximo estimado para las 8 riadas más grandes dentro de las riadas catastróficas.

Año	Mes	Altura máxima agua (m)	Caudal estimado máximo (m^3/s)
1603	12	14.80	$(252 \pm 6) \cdot 10^2$
1545	1	14.78	$(251 \pm 6) \cdot 10^2$
1876	12	12.50	$(169 \pm 4) \cdot 10^2$
1814	3	12.10	$(157 \pm 4) \cdot 10^2$
1796	1	11.34	$(135 \pm 3) \cdot 10^2$
1859	1	11.26	$(132 \pm 3) \cdot 10^2$
1823	2	9.4	$(87 \pm 2) \cdot 10^2$
1912	2	9	$(78 \pm 2) \cdot 10^2$

Estas riadas que aparecen en la Tabla 4.3 registraron el valor de altura del agua más alto (entre 9 y 14.80 metros) en todo el periodo analizado. Todas estas riadas produjeron desperfectos en el puente, en la muralla y en multitud de casas cercanas al río. Además, la mayor riada de los últimos siglos es la de diciembre de 1876; esto está basado en el gran número de fuentes documentales consultadas. El valor de la altura del agua alcanzada que

aparece en las fuentes documentales para esta riada es de 12.50 m (Tabla 4.1 y 4.3) y el valor de caudal que aparece en ellas es de $10^4 \text{ m}^3/\text{s}$. Para una altura del agua de 12.50 m, el valor de caudal obtenido de la ecuación (2) se muestra en la Tabla 4.3, y para una altura de 10 m se obtiene un valor de caudal de $(100 \pm 2) \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores son similares a los estimados en otros estudios acerca de esta riada de 1876. Por ejemplo, González-Cao et al. (2021) han reproducido esta riada y su estudio muestra que la altura del agua estuvo cerca de los 10 m y el pico de caudal llegó a superar los $1.2 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$, como muestra en la Figura 4.4. Además, se han llevado a cabo otros estudios sobre esta riada y se han obtenido valores similares (Ortega, 2007).

Durante los siglos XIX y XX, se han encontrado 11 riadas catastróficas con altura del agua alcanzada entre los 7 y 8 metros. El caudal estimado para estas riadas a partir de la ecuación (2) varía entre $(43 \pm 1) \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $(592 \pm 13) \cdot 10^1 \text{ m}^3/\text{s}$. Los barrios cercanos al río se vieron afectados por estas riadas, llegando el agua a las casas. La agricultura y la ganadería también se vieron afectadas. Otras 9 riadas catastróficas se dieron durante estos siglos pero con menor altura del agua, entre 6 y 7 metros. La estimación del caudal va desde los $(300 \pm 7) \cdot 10^1 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta los $(43 \pm 1) \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$. En estos casos, la descripción que se da en las fuentes documentales sobre los efectos de estas 9 riadas en la ciudad y alrededores es similar a las 11 riadas descritas anteriormente. Por último, aunque no se ha podido recuperar la altura del agua para el evento de riada del año 1911, el valor del caudal ($3500 \text{ m}^3/\text{s}$) sí se ha podido recuperar; por tanto, el valor estimado de la altura del agua para esta riada es de 6.40 ± 0.06 metros. Así, serían 10 riadas las que se han recuperado con una altura entre los 6 y 7 metros.

Por otra parte, no se ha podido estimar el caudal de 8 riadas catastróficas al no haber sido posible recuperar datos de altura del agua para ellas. Estas riadas aparecen en la Tabla 4.1 sin datos de altura (excepto la riada de 1911, que no forma parte de estas 8 riadas). El impacto de estas (a excepción de las de los años 1758, 1766 y 1936) fue muy grande, causando daños estructurales en el puente. La altura del agua alcanzada por estas 5 riadas podría situarse entre los 7 y 15 metros. La magnitud de las riadas que se dieron en los años 1758 y 1766 son similares a las 5 anteriores, puesto que también se vieron afectados algunos edificios de la ciudad y los terrenos agrícolas; por tanto, la altura del agua para estas dos riadas podría estimarse entre los 7 y 8 metros. Por otra parte, los efectos de la riada del año 1936 son menores que las anteriores; aun así, algunas casas de la ciudad se vieron afectadas por esta riada. El valor de la precipitación acumulada en 24 h aparece en las fuentes documentales con un valor de 77 mm para el 22 de febrero de 1936, fecha en la que se produjo esta riada. Este valor es mayor que la media del mes de febrero (50.9 mm) para el periodo 1951-2009. Por tanto, teniendo en cuenta los daños causados por esta riada, la altura del agua podría estimarse entre los 6 y 7 metros.

4. Distribución temporal de los eventos de riadas

La distribución temporal de los 37 eventos de riadas recuperados se ha analizado agrupando los eventos de dos maneras distintas: por meses y por décadas.

En primer lugar, los 37 eventos de riadas se han agrupado por meses (barras grises de la Figura 4.6). Los *boxplots* (y la línea negra) de la Figura 4.6 representan la precipitación media mensual en Badajoz para el periodo 1851-2009⁵. La precipitación presenta una marcada estacionalidad, registrando los valores máximos en otoño-invierno. Respecto a las riadas, como se puede ver en la Figura 4.6, ocurren en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre.

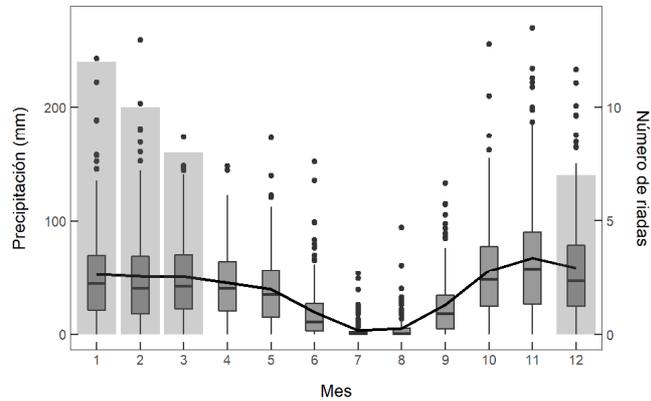


Figura 4.6. Distribución mensual de las 37 riadas catastróficas agrupadas por meses (barras de color gris claro), junto con la precipitación mensual (*boxplots* y línea continua) en Badajoz para el periodo 1851-2009.

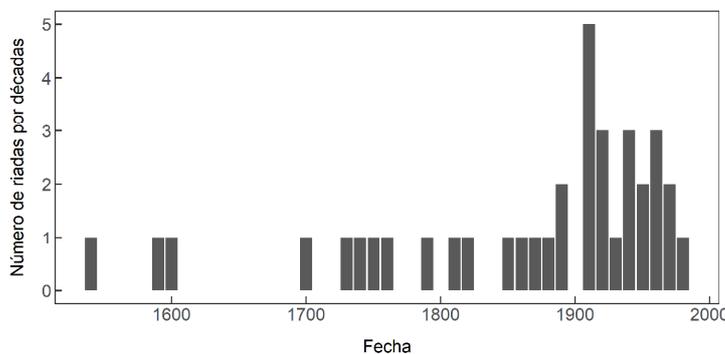


Figura 4.7. Distribución del número de riadas catastróficas por décadas para el río Guadiana en el Puente de Palmas en Badajoz desde 1500.

Los eventos de riadas agrupados por décadas están representados en la Figura 4.7. Según esta, el número de riadas en los siglos XIX y XX es considerablemente mayor que el número de riadas en los siglos XVI-XVIII que fueron recuperados a partir de los registros históricos. El estudio realizado por Sánchez-García et al. (2019) sugiere que la

diferencia entre los dos periodos podría estar relacionada con la mala preservación de los documentos en los siglos XVI-XVIII, o con la falta de registros de este tipo de eventos. De hecho, el número de riadas registradas aumenta con el número de fuentes documentales disponibles, particularmente, con la aparición de los primeros periódicos y revistas. Por otro lado, la mayor parte de la población de Badajoz solía vivir dentro de la muralla durante los

⁵ La serie puede descargarse en la página web de la AEMET:

http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/cambio_climat/datos_diarios/dato_observacional/series_largas/Series_precipitacion.tar.gz.

siglos XVI-XVIII, mientras que, al crecer la población durante los siglos XIX y XX, los límites de la ciudad se extendieron fuera de las murallas, situando las casas más cercanas al río. Como ya se ha dicho, las riadas quedaban registradas en los documentos (o incluso en placas en el puente o en lugares de la ciudad) si estas tenían un impacto significativo en la ciudad. Por tanto, la altura que debía de alcanzar el río para que tuviera un impacto socioeconómico durante los siglos XVI-XVIII tenía que ser mayor. En los siglos más recientes, las viviendas se encontraban a orillas del río, por lo que la altura que tenía que alcanzar el agua para llegar a estas casas era menor. Es posible que todas las razones mencionadas hayan dado lugar, de una manera u otra, a esa diferencia en el número de eventos de riadas entre los siglos XVI-XVIII y XIX-XX.

Por otra parte, el número de riadas en la segunda mitad del siglo XX es menor que en la primera mitad; esto puede ser debido al hecho de que el caudal del río fue regulado mediante la construcción de pantanos y embalses desde finales de 1950 (Medina, 2002).

Además, es importante resaltar que todos estos cambios en el número de eventos de riadas han sido detectados en otras cuencas de la PI. Por ejemplo, Sánchez-García et al. (2019) han mostrado una distribución del número de riadas similar para el río Almanzora en la provincia de Almería desde el 1500, y se pueden encontrar distribuciones del número de eventos de riadas similares en otras cuencas de la PI (Balasch et al., 2019; Barriendos et al., 2014; Benito et al., 2003; Moreno et al., 2005).

5. Condiciones de la circulación atmosférica a gran escala

Para entender las condiciones atmosféricas asociadas a las riadas en Badajoz se han analizado las condiciones de la circulación atmosférica a gran escala en los meses previos a los eventos de riadas recuperados. Además de usar la serie de precipitación registrada en Badajoz (representada en la Figura 4.6), se han usado los índices NAO (Jones et al., 1997) y EA (Comas-Bru y Hernández, 2018), mostrados en el Capítulo 1, para analizar las 26 riadas catastróficas recuperadas entre los años 1851 y 1985. Se ha elegido este periodo debido a que el índice EA usado comienza en 1850.

Para analizar las condiciones en la precipitación y los índices NAO y EA cuando se produjeron las riadas se ha procedido de la siguiente manera: al mes en el que se produjo la riada (9 en enero, 8 en febrero, 6 en marzo y 3 en diciembre), se le ha asignado el valor de la precipitación y de los índices NAO y EA de ese mismo mes. Seguidamente, se ha calculado la media de esos valores desde el mes en el que se produjo la riada (CF) hasta 5 meses anteriores. El resultado se muestra en la Figura 4.8, donde se representa la precipitación media (figura izquierda), la media del índice NAO (figura central) y la media del índice EA

(figura derecha) para las 26 riadas catastróficas desde el mes en el que se produjeron (CF) hasta 5 meses anteriores para el periodo 1851-1985.

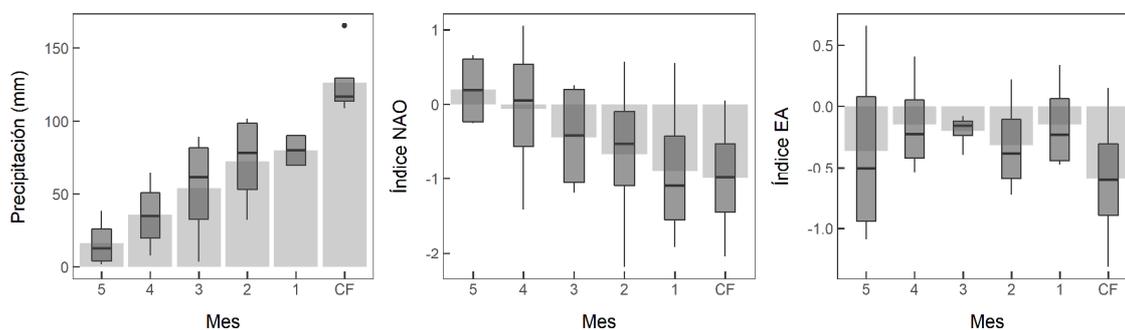


Figura 4.8. Precipitación media (figura izquierda), media del índice NAO (figura central) y media del índice EA (figura derecha) para las 26 riadas catastróficas desde el mes en el que se produjeron (CF) hasta 5 meses anteriores para el periodo 1851-1985.

La precipitación media de Badajoz de los meses en los que se produjeron las 26 riadas catastróficas (CF) es 126.75 mm. El valor para los tres meses previos a las riadas también es relevante, siendo 80.18 mm para un mes anterior, 72.9 mm para dos meses anteriores y 53.75 mm para tres meses previos. La precipitación media en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre para el periodo 1851-2009 se encuentra entre los 50.7 y 58.9 mm (como se indica en la Figura 4.6). La precipitación media para los meses en los que se produjeron las 26 riadas catastróficas (CF) es más del doble que estos valores. La precipitación media en los meses previos también es algo mayor. De hecho, se puede observar un incremento en la precipitación media desde 3 meses anteriores al mes en el que se produjeron.

El valor medio del índice NAO para el mes en el que se produjeron las 26 riadas es -0.994. Al igual que con la precipitación, los valores del índice NAO para los meses anteriores al mes en el que se produjeron las riadas también son relevantes, siendo -0.86 para un mes anterior, -0.67 para dos meses anteriores y -0.44 para tres meses anteriores. Todos los valores son negativos (siendo el más negativo el correspondiente al mes en el que se produjeron las riadas) y, como ya se ha mencionado, valores negativos del índice NAO están relacionados con condiciones húmedas en la PI. Además, se observa un descenso del valor del índice NAO desde estos 3 meses anteriores.

Se puede hacer un análisis similar con el índice EA. El valor medio de este índice para el mes en el que se produjeron las 26 riadas catastróficas es -0.794, y el de los 3 meses anteriores: -0.24 para un mes, -0.49 para dos meses y -0.37 para tres meses. Todos los valores son negativos y el más bajo se encuentra en el mes en el que se produjeron las riadas.

Una abundante precipitación en un solo mes puede dar lugar a una riada de poca magnitud, pero si la precipitación registrada en los siguientes meses es escasa o normal, el caudal del río volvería a la normalidad. Por otra parte, si las condiciones meteorológicas en el siguiente mes conducen a una precipitación mayor de la normal, entonces el caudal sigue

creciendo y la probabilidad de que se produzca una riada aumenta. De acuerdo con los resultados obtenidos, la mayoría de los eventos de riadas observados corresponden a situaciones en las que la precipitación acumulada aumenta consecutivamente. Estas situaciones están conducidas, en parte, por valores inusuales de los dos patrones principales a gran escala que gobiernan la variabilidad climática en la PI, es decir, los modos de variabilidad NAO y EA. Por tanto, la Figura 4.8 sugiere que estos cambios en la precipitación y en los patrones de variabilidad NAO y EA serían parcialmente responsables de las riadas catastróficas estudiadas.

Capítulo 5

Datos meteorológicos

1. Introducción

En este capítulo se presentarán varias series instrumentales meteorológicas recuperadas en distintas partes del suroeste de la PI. En la comunidad autónoma de Extremadura se han recuperado más de 750000 datos meteorológicos correspondientes a 130 poblaciones distintas de Extremadura y de la localidad portuguesa de Campo Maior, y se ha creado una base de datos llamada CliPastExtrem (v1.0). El dato más antiguo de esta base de datos pertenece al año 1826 y el más moderno al año 1955. Además, se han recuperado observaciones actinométricas y de nubosidad registradas en Cáceres durante el periodo 1913-1923. En San Fernando (Cádiz) se registró una serie meteorológica compuesta, principalmente, por observaciones de la presión atmosférica, temperatura, viento y estado del cielo durante el periodo 1799-1813. Por último, se han recuperado observaciones meteorológicas registradas en Almada (Portugal) durante el periodo 1788-1813.

1.1. Control de calidad

Las series meteorológicas mostradas anteriormente han sido digitalizadas. El proceso de digitalizar todas las series meteorológicas se ha llevado a cabo transcribiendo manualmente a ordenador las observaciones originales preservadas en los documentos; esto se ha hecho sin usar ningún programa especializado en reconocimiento de caracteres. Algo importante a tener en cuenta es que durante el proceso de digitalización se pueden cometer errores, además de que los documentos originales también pueden contener fallos. Por eso es necesario llevar a cabo un control de calidad para intentar detectarlos. Estos errores se pueden dar por dos razones:

- * Error original: este tipo de errores vienen dados al escribir un número incorrecto en el documento oficial (el que publica la institución para el conocimiento de todos) en lugar del número real escrito en la hoja manuscrita por el observador. También por un error en el instrumento. Normalmente, este último documento no suele estar disponible.
- * Error en la digitalización: estos errores se dan por transcribir un número incorrecto en el documento digital (el de la transcripción del investigador) en lugar del número escrito en el documento original (el que posee el investigador para recuperar los datos).

En algunos casos, estos errores no se pueden detectar fácilmente como, por ejemplo, si el número equivocado se encuentra en la parte decimal. En otros casos es más fácil localizarlos. Por ejemplo, si están en la parte entera del número es muy posible que estos números aparezcan como *outliers*. Inmediatamente después de transcribir los datos, se comprueba visualmente si se ha cometido algún error durante el proceso para evitar, en la medida de lo posible, errores en la digitalización.

En cualquier caso, en las siguientes secciones se ha procedido a realizar un control de calidad básico para detectar posibles errores o datos sospechosos. El control de calidad solo se ha ejecutado para los valores diarios; la razón yace en la mayor facilidad para detectar los fallos en ellos. Los observadores calculan los valores mensuales y anuales como la media de los valores diarios; por tanto, es más complicado detectar los valores sospechosos en ellos. Además, los valores mensuales y anuales también se han comprobado visualmente después de su transcripción. Por último, se ha tomado como referencia el control de calidad llevado a cabo por Domínguez-Castro et al. (2017) para diseñar el que se ha usado en este capítulo, que se muestra a continuación:

1. **Valores extremos:** se ha calculado la media más/menos tres desviaciones estándar para variables con distribución gaussiana para detectar posibles *outliers*. Los valores que exceden este límite se comprueban con los datos originales y se corrigen si se tratan de un error en la digitalización, o se señalan con un asterisco si es un valor sospechoso.
2. **Valores consecutivos:** se ha calculado la media más/menos tres desviaciones estándar de la diferencia entre valores consecutivos de variables con distribución gaussiana. Los valores por encima (o por debajo) de este valor podrían ser erróneos, sospechosos o *outliers*; por tanto, se comprueban con los originales y se corrigen o señalan con un asterisco.
3. **Comparar promedios:** en algunos casos, los observadores calcularon los promedios diarios y mensuales. Estos valores se comprueban con los promedios calculados a partir de los datos digitalizados. Si ambas medias no son iguales, se comprueban unos promedios con otros, y se corrigen si se trata de algún error en la digitalización.
4. **Coherencia en los valores:** algunas variables contienen valores máximos, mínimos y promedios. En estos casos se ha seguido la siguiente condición: $\text{máximo} > \text{media} > \text{mínimo}$. Todos los valores que no sigan estas condiciones se corregirán o marcarán con un asterisco.
5. **Valores límite:** los valores de algunas variables no pueden ser superiores y/o inferiores que un cierto límite o umbral, por definición. Como el caso de las décimas de cielo cubierto que no pueden ser menores que 0 ni mayores que 10; por tanto, cualquier valor que no esté dentro de este rango será un error, y se corregirá o indicará con un asterisco dependiendo de si se trata de un error en la digitalización o de un valor sospechoso.

En las siguientes secciones se van a presentar las distintas series meteorológicas. Además, se indicarán los pasos concretos que se han seguido en el control de calidad de cada una de ellas.

2. Base de datos de Extremadura

2.1. Introducción

Recuperar datos meteorológicos almacenados en archivos o bibliotecas es una tarea básica en la investigación del clima del pasado. Hasta ahora no se había realizado ninguna búsqueda sistemática de datos meteorológicos antiguos de la comunidad autónoma de Extremadura, a pesar de que existían algunos indicios de observaciones meteorológicas en esta región desde la primera mitad del siglo XIX (Fernández-Fernández et al., 2014; Vaquero et al., 2001). De hecho, la red estatal meteorológica extremeña comenzó con la estación de Badajoz en el año 1860, pero no tuvo un gran desarrollo hasta los años posteriores a la Guerra Civil Española (1936-1939). Al igual que las redes estatales meteorológicas de otras comunidades autónomas, la extremeña no se consolidó hasta mediados del siglo XX con el aumento de estaciones por toda España (Anduaga Egaña, 2012). Además de la red estatal meteorológica, se estableció una red privada en la provincia de Badajoz en la década de 1880, aunque no estuvo operativa por mucho tiempo (Vaquero y Gallego, 2000).

Con el fin de intentar recuperar el mayor número de registros meteorológicos de Extremadura y ponerlos a disposición de la sociedad en general y de la comunidad científica en particular, se ha creado una base de datos meteorológicos de esta región, llamada CliPastExtrem (v1.0). Se han consultado varias fuentes documentales, de las cuales el 67% son anales científicos, el 22% periódicos y el 11% monografías. En total, se han rescatado más de 750000 datos meteorológicos de 130 poblaciones distintas de Extremadura. También se han recuperado datos de la localidad portuguesa de Campo Maior, que se encuentra cerca de la frontera entre España y Portugal, alrededor de 20 km al noroeste de Badajoz.

Algunas de las series meteorológicas que aparecen en esta base de datos se habían digitalizado previamente, aunque solo representan el 1.9% del total. La serie meteorológica de Badajoz correspondiente al periodo 1830-1833 fue publicada por Domínguez-Castro et al. (2014b) como parte de los resultados del proyecto Salvá-Sinobas. Los datos correspondientes a Campo Maior fueron recuperados en 2007 bajo el proyecto portugués SIGN, aunque no se publicaron. Fernández-Fernández et al. (2014) recuperaron observaciones de Zafra para el periodo 1750-1840. Por último, hay que destacar que la serie actinométrica y la serie de nubosidad de Cáceres descritas en la sección 3. de este capítulo también forman parte de esta base de datos.

2.2. Control de calidad

Como ya se ha indicado, debido al elevado número de datos recuperados y a la gran cantidad de variables de estos, se ha llevado a cabo un control de calidad para detectar posibles errores. Los tests que se han usado para realizarlo son los puntos 1, 2, 4 y 5 indicados en la sección 1. Las variables sobre las que se ha usado el control de calidad son la

temperatura, presión, humedad y nubosidad. En algunos casos hay disponibles datos horarios; el test número 4 también se ha aplicado en estas situaciones para la variable de la temperatura. Se ha procedido así puesto que, generalmente, en las primeras horas de la mañana esta variable debería ser menor que en las horas de la tarde (en la región extremeña). Los valores sospechosos se han indicado con un asterisco.

En total, se han analizado 188140 valores en el control de calidad, lo que representa alrededor del 24% del conjunto total de datos. Los valores marcados con un asterisco (es decir, los incorrectos, sospechosos o los *outliers*) suman 807, esto representa el 0.4% del total analizado. El porcentaje de estos valores por variable es: 62% para valores de presión, 35% para la temperatura, 2% para la humedad y el 1% para la nubosidad. Por otra parte, tanto el porcentaje de datos analizados como el de sospechosos son similares a otros trabajos semejantes. Por ejemplo, Domínguez-Castro et al. (2017) analizaron alrededor del 30% del total de datos y detectaron un 0.3% de valores sospechosos.

2.3. Acceso a la base de datos

La base de datos CliPastExtrem (v1.0) se ha publicado en el Centro de Datos Mundial PANGAEA; se puede acceder a ella a través del siguiente enlace: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.925807>. En un único fichero comprimido se encuentran los 157 archivos que lo componen, y cada uno de ellos contiene los datos y un encabezamiento con la información relevante: identificación de la estación, población, latitud y longitud, periodo cubierto por los datos, altitud de la estación (si estaba disponible en los metadatos de los documentos), escala temporal y las variables meteorológicas que componen el fichero.

Por otra parte, el nombre del fichero es la identificación de la estación y se forma siguiendo una estructura simple. Las dos primeras letras se corresponden con la provincia de Extremadura donde estaba la estación (BA para la provincia de Badajoz y CC para la de Cáceres). Las siguientes cuatro letras indican el nombre de la población en la que se encontraba la estación. Finalmente, se escribe un número para distinguir distintos ficheros de una misma estación. Para el caso de la estación portuguesa, se ha compuesto una nomenclatura similar en la que las dos primeras letras indican el país (PT). Un ejemplo del encabezamiento y de las primeras líneas de datos correspondiente al fichero BAALAN2 (que pertenece a la estación de Alange, Badajoz) puede verse en la Figura 5.1.

2.4. Descripción del conjunto de datos

En total, se han recuperado 772253 observaciones meteorológicas de 131 poblaciones distintas de Extremadura y de Campo Maior (Portugal). En la Figura 5.2 se puede ver la distribución geográfica de todas estas poblaciones. En el conjunto de datos se pueden encontrar datos horarios, diarios, mensuales e, incluso, por décadas. Las observaciones más antiguas que se han rescatado se registraron en Zafra en el año 1826, mientras que las más

modernas se anotaron en 1955 en Badajoz. La serie de Campo Maior cubre el periodo de registro continuado más largo (1860-1939), y posee el mayor número de observaciones de una misma serie (481692 datos meteorológicos).

```

/* DATA DESCRIPTION:
Citation: Vaquero, JM et al. (year): "Título", https://doi.org/10.1594/PANGAEA.xxxxx,
Supplement to: Vaquero, JM et al. (In prep): Meteorological records from Extremadura (Spain) during the 19th and 20th cen
Abstract: xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
Coverage: LATITUDE: 38.784444 * LONGITUDE: -6.243611
DATE/TIME START: 1868-07-01T09:00:00 * DATE/TIME END: 1868-09-30T21:00:00
Event(s): BAALAN2 * LATITUDE: 38.784444 * LONGITUDE: -6.243611 * LOCATION: Spain * METHOD/DEVICE: Observation (OBSE)
Parameter(s): DATE/TIME (Year) * GEOCODE * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509)
DATE/TIME (Month) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509)
DATE/TIME (Day) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509)
DATE/TIME (Hour) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509)
Pressure [mmHg] (P) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509)
Temperature [deg] (T) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509) * COMMENT: Reaumur thermometer
Humidity [%] (H) * PI: Vaquero, José Manuel (https://orcid.org/0000-0002-8754-1509) * COMMENT: Saussure higrometer
License: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-4.0)
Size: 1104 data points
*/
Year Month Day Hour P [mmHg] T [deg] H [%]
1868 7 1 9 639.2870 39.00201 78.23446
1868 7 1 12 639.7099 39.43131 78.75854
1868 7 1 15 640.2081 39.85553 79.33671
1868 7 1 21 640.6226 40.10165 79.82380
1868 7 2 9 640.9161 40.16490 80.14725
1868 7 2 12 641.1417 40.07497 80.39779
    
```

Figura 5.1. Cabecero y primeras líneas de datos del fichero BAALAN2.

Puesto que hay un gran número de series meteorológicas recuperadas, con distintas variables y distinto periodo de registro de datos cada una, se ha esquematizado toda esta información en la Figura B.1 del Apéndice B. La leyenda superior indica la resolución temporal de los datos: diario (D), mensual (M), décadas (Dc) y anual (Y). La leyenda inferior indica las variables registradas: temperatura (T), presión (P), precipitación (R) y otros (O). El porcentaje correspondiente a cada escala temporal para todo el conjunto de datos es diferente: el 79.80% de los datos son diarios, el 17.32% es mensual, el 2.85% se corresponde con las décadas y el 0.02% con datos anuales.

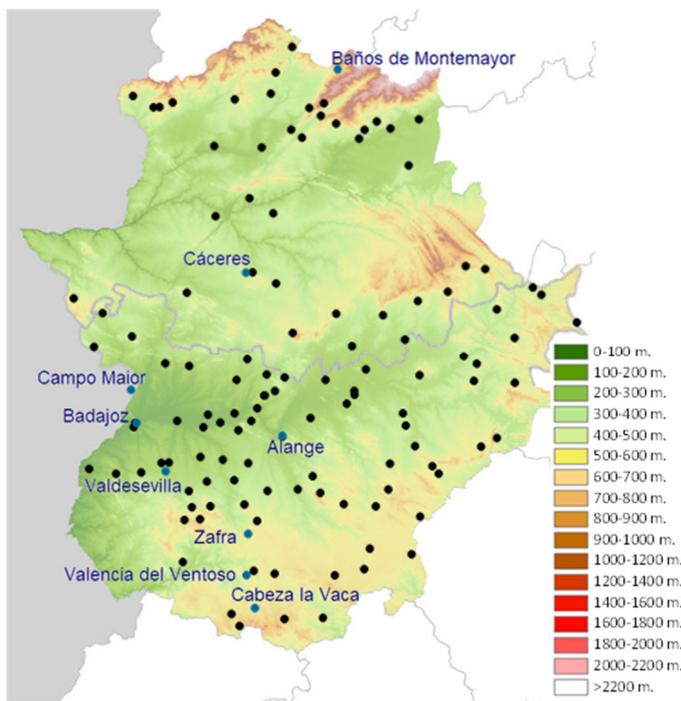


Figura 5.2. Mapa de Extremadura (obtenido de la Infraestructura de Datos Espaciales de Extremadura – IDE Extremadura) con las poblaciones de las que se han recuperado los datos.

Se han agrupado todas las variables del conjunto de datos en 12 categorías en general, aunque las subvariables dentro de estas categorías suman 256. En la Tabla 5.1 quedan

recogidas las categorías, junto con la unidad en la que se registraron, el número de subvariables que contiene cada categoría y el porcentaje del número de datos de cada categoría respecto al total (772253).

Tabla 5.1. Variables registradas en el conjunto de datos junto con sus unidades, el número de subvariables de cada una y el porcentaje de datos respecto al total.

Variable	Unidades	Número de subvariables	Porcentaje de datos
Presión	mmHg, pulgadas	38	15.81
Temperatura	°C, Reaumur	90	19.45
Viento	Km/h	51	21.40
Humedad	%	10	7.29
Precipitación	mm	10	10.51
Evaporación	mm	2	2.50
Visibilidad	-	7	0.35
Nubosidad	Varios	18	12.60
Estado del cielo	-	13	3.17
Horas de sol	h	3	3.13
Ozono	Grados ozonométricos	1	0.73
Otros	-	13	3.01

Como se puede ver en la Tabla 5.1, la mayoría de las categorías son muy comunes, como la presión, temperatura o humedad. Algunos ejemplos de subvariables son: días de lluvia, precipitación máxima diaria, oscilación de la temperatura o número de días que hiela. El mayor número de subvariables que contienen las categorías se encuentran en las de temperatura, presión y viento; en total, suman cerca del 70%. El porcentaje más elevado del número total de datos en cada categoría se da en la de viento (21.40%), seguido por la temperatura (19.45%) y por la presión (15.81%).

Respecto a los instrumentos con los que se midieron las distintas observaciones, no se entrará en detalle acerca de ellos debido a la multitud de series que comprenden la base de datos extremeña. Otras razones son la ausencia de metadatos en algunos casos o la escasa información sobre ellos. Aun así, algunos de los instrumentos meteorológicos que aparecen en los metadatos se han presentado en Vaquero et al. (2022) y en este trabajo se puede ver la información más relevante acerca de ellos. Hay que tener en cuenta que la información encontrada en Vaquero et al. (2022) no se puede aplicar a toda la base de datos puesto que cada serie se registró con un instrumento y medida diferente, por ello cada fichero contiene los detalles de cada serie.

3. Medidas actinométricas

3.1. Introducción

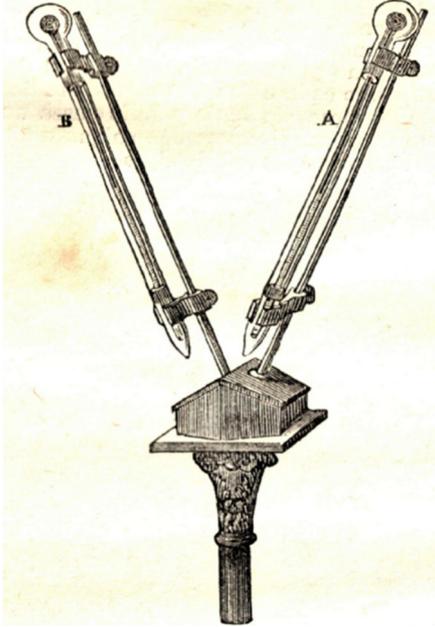


Figura 5.3. Instalación del actinómetro de Arago en el Observatorio de Montsouris (Marié-Davy, 1875).

Las medidas actinométricas son medidas indirectas de la radiación solar. Las primeras referencias sobre los actinómetros aparecen en la mitad del siglo XIX (Herschel, 1844). Desde entonces, los actinómetros han evolucionado en multitud de variantes, aunque todas con un mismo propósito: medir la radiación solar. Una de estas variantes fue el actinómetro de Arago y, aunque no hay referencias sobre él en los trabajos de François Arago, se encontró un prototipo en su colección de instrumentos (Besson, 1927). También es conocido como actinómetro de Arago-Davy puesto que fue M. H. Marié-Davy quien lo usó en el Observatorio de Montsouris (Badescu et al., 2023; Marié-Davy, 1875).

Marié-Davy (1875) describió con gran detalle el instrumento en sí y sus características. La instalación de un actinómetro en el Observatorio de Montsouris puede verse en la Figura 5.3. El actinómetro de Arago consiste en un par de termómetros, uno con un depósito ennegrecido y el otro sin ennegrecer (llamado “brillante” o “desnudo”). Cada termómetro estaba encerrado en una esfera de cristal después de realizarse el vacío. Cuando el actinómetro se expone al Sol, el depósito ennegrecido registra una temperatura mayor que el depósito desnudo, y la diferencia entre estas dos temperaturas es un indicativo de la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre (Marié-Davy, 1875).

Como se ha indicado, las medidas actinométricas en sí son una medida indirecta de la radiación solar, por lo que para obtener el valor de esta se deberá convertir la diferencia de temperaturas a irradiación solar por medio de una ecuación matemática. Marié-Davy (1875) propone una ecuación inicial de la forma $I = a(T' - T)$ y Besson (1927) la modifica como

$$I = (a + bT)(T' - T),$$

siendo T' y T las temperaturas de los termómetros ennegrecido y desnudo, respectivamente, y a y b parámetros ajustables. Para hacer esto último, Besson (1927) realiza una serie de medidas con este y otro instrumento de referencia (un actinómetro de Crova), y realiza un ajuste por el método de mínimos cuadrados.

En otros estudios de la época se desarrollaron otros métodos para llevar a cabo la transformación de la diferencia de temperaturas a irradiación solar. Por ejemplo, Guilmet (1931) propone la siguiente ecuación:

$$I = C_1(1 - n)\Delta T \text{sen } H + C_2 n \Delta T,$$

donde C_1 y C_2 son dos coeficientes a determinar, n es la cantidad de nubosidad medida en décimas de cielo cubierto, H es la altura del Sol y ΔT es la diferencia de temperaturas. Para el cálculo de los coeficientes, las medidas se realizan con cielos completamente claros ($n = 0$) para el coeficiente C_1 y con cielos completamente cubiertos ($n = 1$) para el coeficiente C_2 . Para hacer estos cálculos, Guilmet (1931) compara estas medidas con otras realizadas mediante un solarímetro de Gorezynski.

Puesto que se comenzó a medir la radiación solar en la segunda mitad del siglo XIX, esto hace que sea una variable instrumental relativamente reciente en comparación con la temperatura o la presión atmosférica. Por otra parte, las medidas de radiación solar son escasas debido a que, en ocasiones, los aparatos con los que se medía no eran sencillos de utilizar porque requerían tener unos conocimientos previos sobre física. Es por esto que hallar nuevos datos de esta variable en los siglos XIX y XX es importante para reconstruir la radiación solar y conocer cómo ha variado a lo largo de estos siglos.

En Cáceres se han encontrado medidas actinométricas realizadas con un actinómetro de Arago durante el periodo 1913-1923. Estas medidas se realizaron en la terraza del Instituto Provincial de Segunda Enseñanza (39° 28' 23" N, 6° 22' 12" O, 460 masl) (Cardallaiquet, 1997). Los datos actinométricos originales se encuentran en uno de los libros de observaciones preservados en la Biblioteca de la Delegación Territorial de la AEMET en Extremadura, donde se da una breve descripción del instrumento. El actinómetro de Arago usado en Cáceres consistía en un par de termómetros, uno con la esfera ennegrecida y el otro con la esfera desnuda, al igual que el usado por Marié-Davy en el Observatorio de Montsouris. Estos termómetros fueron construidos por Tonnelot con números de referencia 38140 y 38135. El actinómetro estaba colocado en un borde de la terraza del Instituto. Por desgracia, el instrumento no se ha encontrado, es muy probable que se extraviara cuando se realizó la mudanza del Instituto a otro edificio en el año 1964. Por tanto, los datos de diferencia de temperaturas registradas con el actinómetro de Arago de Cáceres no se pueden transformar directamente a valores de irradiación solar al no poder estimarse los coeficientes de la ecuación usada por Guilmet (1931). Las medidas actinométricas se registraron a distinta hora: 16 h para el periodo 1913-1920; 13 h para el año 1923. Se supone que la hora medida es la hora local. Entre los años 1921 y 1922 no se registraron datos de este instrumento.

Además, se han recuperado datos de nubosidad para el mismo periodo. Para el periodo 1913-1920, la nubosidad se registraba a las 8 h y 16 h en cuartos de cielo cubierto (0 – cielo

claro, 4 – cielo cubierto). Para el periodo 1921-1922, las medidas se tomaron a las 8 h, 13 h y 18 h en décimas de cielo cubierto (0 – cielo claro, 10 – cielo cubierto). En el año 1923, las medidas se registraron a las 8 h y 16 h en décimas de cielo cubierto.

Por tanto, se han analizado los datos actinómetros y la nubosidad para el periodo 1913-1920 puesto que ambas medidas se registraron a la misma hora (16 h). En el control de calidad no se han encontrado valores sospechosos para el periodo completo (1913-1923) de los datos actinométricos y de nubosidad.

3.2. Tendencia de los datos actinométricos

La cantidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra sufre variaciones significativas (Wild et al., 2009). Muchos estudios han analizado las tendencias a largo plazo de medidas de radiación solar. Algunos de estos análisis sugieren un decrecimiento de la cantidad de radiación solar entre 1950 y 1980 (llamado “*global dimming*”) y una recuperación parcial a partir del 1980 (llamada “*brightening*”) (Hatzianastassiou et al., 2005; Russak, 2009; Sanchez-Lorenzo et al., 2013; Stanhill y Cohen, 2001; Wild, 2005; Wild et al., 2009). Por otra parte, otros estudios han encontrado un *early brightening* en la primera mitad del siglo XX (Lachat y Wehrli, 2013; Stanhill y Cohen, 2005, 2008), aunque otros análisis no han mostrado evidencias de este *early brightening* (Antón et al., 2014, 2017; Hoyt, 1979; Kazadzis et al., 2018; Ohvri et al., 2009). Debido a la controversia existente en la comunidad científica sobre las tendencias de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra en la primera mitad del siglo XX, se va a analizar la tendencia de los datos actinométricos recuperados.

Para ello, se ha realizado un análisis de regresión lineal. Puesto que la evolución de las medidas actinométricas presenta un claro comportamiento estacional relacionado con la dependencia de la radiación solar global con el ciclo anual de la elevación del Sol (Iqbal, 1983), se ha evaluado el comportamiento estacional y se ha desestacionalizado la serie temporal diaria.

El comportamiento estacional (S) de la diferencia de lecturas del par de termómetros del actinómetro de Arago (A) se puede estimar como el promedio de todas las medidas actinométricas registradas en el mismo día del año (desde el día 1 hasta el día 365) para todo el periodo (1913-1920). A partir de estos datos, los valores diarios desestacionalizados (D) se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$D_{ij} = A_{ij} - S_j.$$

El subíndice i indica el año (desde 1913 hasta 1920) y el subíndice j el día del año. Por último, la tendencia de la serie actinométrica se puede evaluar para el periodo 1913-1920 usando los valores diarios desestacionalizados.

La Figura 5.4 muestra la evolución temporal en gris (negro) de los valores diarios (mensuales) desestacionalizados de la serie actinométrica para el periodo 1913-1920. Se puede observar un pequeño descenso en los valores desestacionalizados; la pendiente de la tendencia lineal (\pm error estándar) es negativa con valor (-0.16 ± 0.03) °C/año, y es estadísticamente significativa al 95% de nivel de confianza.

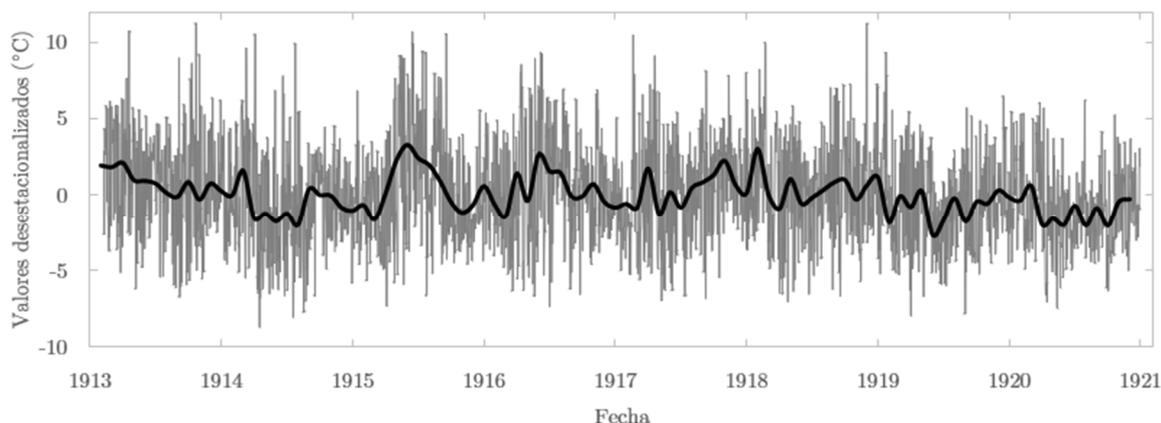


Figura 5.4. Evolución de los datos diarios desestacionalizados de los datos actinométricos para el periodo 1913-1920 en Cáceres.

Además, se ha usado la nubosidad para analizar la tendencia de la serie actinométrica sin el efecto de las nubes, es decir, para los días con observaciones de nubosidad igual a 0. La pendiente de la tendencia lineal de la serie actinométrica en estas condiciones toma el valor (-0.26 ± 0.04) °C/año, también significativo.

Por último, se ha analizado la tendencia de la serie para cada estación del año bajo las condiciones de cielo claro (nubosidad = 0) y sin discriminación por categoría de nubosidad. Para ello, se ha aplicado la regresión lineal a las cuatro estaciones del año: invierno (DJF: diciembre, enero y febrero), primavera (MAM: marzo, abril y mayo), verano (JJA: junio, julio y agosto) y otoño (SON: septiembre, octubre y noviembre). En la Tabla 5.2 se recoge el valor de la pendiente de la tendencia lineal para cada caso. Los valores en negrita indican que son estadísticamente significativos al 95% de nivel de confianza. Todas las estaciones excepto el invierno muestran tendencias negativas para ambos casos de estudio (cielo sin nubosidad y sin discriminación por nubosidad). Además, todas las pendientes bajo condiciones de cielo claro son más negativas que para todas las categorías de nubosidad.

Tabla 5.2. Pendiente de los datos diarios desestacionalizados para cada estación en °C/año (\pm error estándar) en Cáceres para el periodo 1913-1920. Los valores en negrita indican que las tendencias son estadísticamente significativas al 95% de nivel de confianza.

	Sin categorías de nubosidad	Condiciones cielo despejado
Invierno	0.012 \pm 0.049	0.06 \pm 0.08
Primavera	-0.21 \pm 0.06	-0.45 \pm 0.08
Verano	-0.29 \pm 0.05	-0.33 \pm 0.06
Otoño	-0.13 \pm 0.05	-0.16 \pm 0.08

Todos estos resultados están de acuerdo con los de otros trabajos relacionados con medidas de radiación solar en Europa. Las medidas de irradiación solar más cercanas a Cáceres para ese periodo se tomaron en el Observatorio de Madrid. Antón et al. (2017) encontró un decrecimiento del índice de claridad bajo las condiciones de cielo claro en verano del periodo 1915-1922. Por otra lado, Aparicio et al. (2019) encontró este descenso también en medidas pirheliométricas (en condiciones de cielo claro) para el periodo 1910-1925. Muchos otros trabajos han encontrado este descenso en datos de radiación solar en otras partes de Europa entre finales del siglo XIX y principios del XX (Brázdil et al., 1994; Brunetti et al., 2009; Founda et al., 2014; Matuszko, 2014; Sanchez-Lorenzo y Wild, 2012; Stanhill y Achiman, 2017). A este fenómeno lo han llamado “oscurecimiento temprano” (*early dimming* en inglés).

Por tanto, las tendencias negativas obtenidas a partir de los datos actinométricos de Cáceres podrían estar asociados a la evolución final del *early dimming*.

4. Datos de San Fernando (Cádiz)

4.1. Introducción

En 1753 se creó el Real Observatorio de Cádiz en apoyo a la Marina y a la ciencia después de que España sufriera una decadencia como potencia marítima el siglo anterior. En concreto, el observatorio se instaló con el fin de que los futuros oficiales de la Armada aprendieran conceptos sobre astronomía, tan necesarios para la navegación; así se convirtió en un centro de investigación astronómica unido a una institución docente (González González, 1992; Lafuente y Sellés, 1988).

En 1798 el Observatorio fue trasladado a Isla de León (hoy día la ciudad de San Fernando) y, actualmente, se conoce como el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando. Al comienzo de esta nueva etapa para el Observatorio, Rodrigo Armesto (director del mismo durante el periodo 1798-1804) llevó a cabo un plan de observaciones distribuidos en cuatro secciones: Tiempo (Primera Clase), Planetas (Segunda Clase), Longitudes Terrestres (Tercera Clase) y Física Celeste (Cuarta Clase) (González González, 1992).

En la presente tesis se ha recuperado una serie de datos diarios meteorológicos registrados en el Observatorio de San Fernando durante el periodo 1799-1813 (se nombrará como SF1799-1813) pertenecientes a la Cuarta Clase. Aunque esta serie meteorológica no ha sido recuperada hasta ahora, se han llevado a cabo otras iniciativas para recuperar otras observaciones realizadas en el Observatorio. Por ejemplo, Barriandos et al. (2002) analizaron las distintas fuentes documentales que contenían observaciones meteorológicas durante el periodo 1786-1996 y recuperaron la información sobre los instrumentos utilizados;

Domínguez-Castro et al. (2014b) incorporaron las observaciones encontradas para el periodo 1780-1850 a la base de datos del proyecto Salvá-Sinobas; Gallego et al. (2007) recuperaron datos de viento registrados en la “Torre de Vigía” de Cádiz durante el periodo 1806-1852, y de presión y temperatura para 1825-1852; Wheeler (1995) recuperó datos mensuales para el periodo 1789-1816; El Real Instituto y Observatorio de la Armada ha publicado sus registros meteorológicos en volúmenes anuales desde 1870; Pujazón (1899) recopiló la serie mensual de precipitación registrada en el periodo 1805-1899. Además, se han recuperado series meteorológicas tempranas que no se realizaron en el Observatorio, por ejemplo, Rodrigo (2012, 2019) han recuperado observaciones meteorológicas registradas por médicos en Cádiz desde el año 1799. En la Figura 5.5 se muestra un resumen de todos estos datos recuperados para las ciudades de Cádiz (las referencias se muestran en color negro) y San Fernando (las referencias se muestran en color rojo).

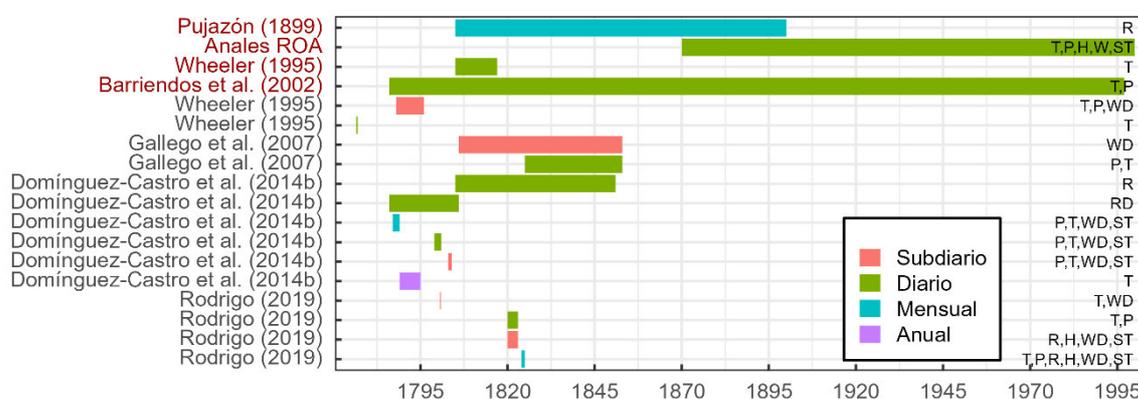


Figura 5.5. Series de datos recuperadas para las ciudades de Cádiz (en color negro) y San Fernando (en color rojo). Las variables meteorológicas de cada conjunto de datos se muestran a la derecha del gráfico: T – temperatura, P – presión, R – lluvia, WD – dirección del viento, H – humedad, RN – días de lluvia, W – diferentes variables de viento, ST – estado del cielo.

4.1. Acceso al conjunto de datos

El conjunto de datos recuperado SF1799-1813 está públicamente disponible en el repositorio de datos abierto Zenodo. Se puede acceder a él mediante el siguiente enlace: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7104289>.

4.2. Descripción del conjunto de datos SF1799-1813

La serie recuperada en esta tesis (SF1799-1813) está compuesta, en total, por 45862 observaciones meteorológicas, registrando distintas variables y periodos diferentes; en la Figura 5.6 se resume esta información. El conjunto de datos SF1799-1813 se compone de 7 variables diarias meteorológicas y 5 mensuales. Las barras rosas, verdes y azules corresponden a distintas horas de observación: 6 h, 12 h, 18 h y 24 h para las barras rosas; 8 h y 14 h para las verdes; 14 h para las barras azules. Las barras grises indican valores mensuales. En los metadatos no se indica el tipo de hora utilizada, pero se supone la hora

media local puesto que el Observatorio disponía de instrumental para “conservar” la hora y esta era una de sus tareas principales como observatorio al servicio de la Armada. Se pueden apreciar dos grandes huecos en el periodo completo de observación, el primero en el periodo 1802-1804 y el segundo en el periodo 1810-1812. El primer hueco podría ser debido a que, en esos años, se le pudo dar más importancia a las obligaciones de los oficiales en la Armada que a las tareas científicas. Esto pudo conllevar la ausencia de los oficiales y, al no ser cubierta, las observaciones meteorológicas no se registraron. El segundo hueco es debido a la ausencia del observador por estar destinado de vigía en la Torre de Zimbrellos para observar los movimientos de los franceses en las baterías de la Carraca; cabe recordar que en esos años tuvo lugar la Guerra de Independencia de España contra Francia.

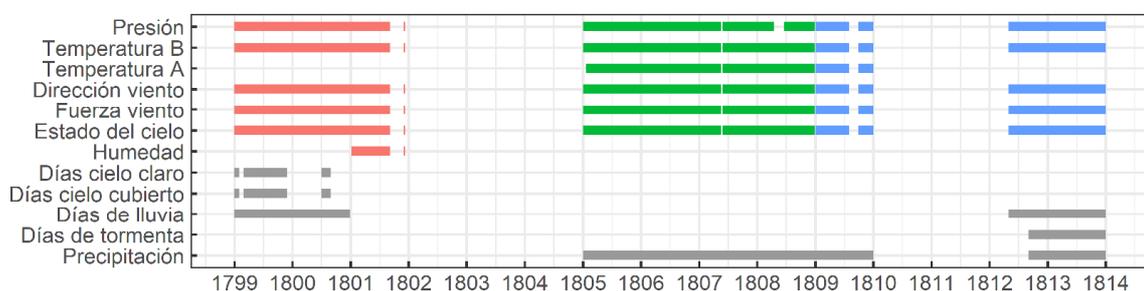


Figura 5.6. Periodo de observación cubierto por cada variable. Las barras rosas, verdes y azules corresponden a las distintas horas de observación: 6 h, 12 h, 18 h y 24 h para las barras rosas; 8 h y 14 h para las verdes; 14 h para las barras azules. Las barras grises indican valores mensuales de las variables.

Por otra parte, la altura a la que estaban situados los instrumentos era diferente para cada periodo. No se registró dato de altura para el periodo 1799-1801. Para el periodo 1805-1809, se anotó 142.5 pies de Burgos (1 pie de Burgos = 0.2786 cm) y, para el periodo 1812-1813, se registró 100 pies sobre el nivel del mar. Es probable que esta última altura también fuera la del periodo 1799-1801 puesto que la media de los valores de presión para este periodo es bastante similar a la media de los valores de presión para el periodo 1812-1813. Además, se midieron con los mismos instrumentos y puede que su localización fuese la misma también. Las observaciones meteorológicas se registraron con diferentes instrumentos y fueron medidas en diferentes unidades, por lo que se van a describir brevemente a continuación:

* Presión

Las observaciones de presión se registraron con dos barómetros de mercurio diferentes y en distintas unidades:

- Periodos 1799-1801 y 1812-1813: las observaciones se realizaron a distintas horas del día con un barómetro George Adams y su unidad era la pulgada inglesa.
- Periodo 1805-1809: las medidas se efectuaron con un barómetro Megnié y la pulgada era la francesa.

✱ **Temperatura (termómetro adjunto al barómetro)**

Normalmente, los barómetros de mercurio tenían adjunto un termómetro para realizar las correcciones por temperatura a las observaciones de presión. Al igual que los barómetros, las unidades de los termómetros también cambiaron:

- Periodos 1799-1801 y 1812-1813: la unidad del termómetro adjunto al barómetro George Adams era el grado Fahrenheit.
- Periodo 1805-1809: la del termómetro adjunto al barómetro Megnié era el grado Reaumur.

✱ **Temperatura del aire**

La temperatura del aire fue registrada con un termómetro Dollond en grados Fahrenheit para el periodo 1805-1809.

✱ **Dirección del viento**

Las observaciones de la dirección del viento se anotaron de acuerdo con la dirección de la rosa de los vientos. Esta fue dividida en 32 direcciones: N, NpNE, NNE, NEpN, NE, NEpE, ENE, EpNE, E, EpSE, ESE, SEpE, SE, SEpS, SSE, SpSE, S, SpSW, SSW, SWpS, SW, SWpW, WSW, WpSW, W, WpNW, WNW, NWpW, NW, NWpN, NNW y NpNW. La letra “p” denota la palabra “por” y se refiere a los rumbos co-colaterales. Estos términos toman el nombre a partir de los rumbos laterales, por ejemplo, NpNE se leería Norte por el Noreste y la dirección del viento se correspondería con $11^{\circ}25'$. En las hojas del manuscrito, este ejemplo aparece como “N1/4NE” y al digitalizarlo se ha cambiado a “NpNE”.

Para el periodo 1812-1813 en el que solo se registraban las observaciones a una hora (14 h), se anotaba como dirección del viento la que había predominado durante las 24 h anteriores.

✱ **Fuerza del viento**

Las observaciones de la fuerza del viento se registraron mediante descriptores. García-Herrera et al. (2003) han elaborado un diccionario para expresar en un formato comprensible los antiguos términos que se usaban para describir la fuerza del viento y transformarlos a la escala de Beaufort. Este diccionario se ha usado aquí para comprobar estos términos antiguos que aparecen en el manuscrito.

Al igual que la dirección del viento, durante el periodo 1812-1813, se anotaba como fuerza del viento la que había predominado durante las 24 h anteriores.

* Estado del cielo

Los observadores daban una descripción detallada del estado del cielo durante el periodo 1799-1801. En estas descripciones puede aparecer, por ejemplo, si el cielo estaba claro o cubierto, la cantidad (cualitativa) de nubes, si llovió o hubo otro tipo de precipitación. A partir de 1805, la descripción se resumió a una sola palabra, por ejemplo, “claro” para indicar si el cielo estaba despejado. Al igual que en los dos casos anteriores, para el periodo 1812-1813, el estado del cielo se anotaba según el que había predominado durante las 24 h anteriores.

Además, la suma de los días claros, cubiertos, de lluvia y de tormenta en cada mes también se registró en diferentes periodos. La suma de los días claros, cubiertos y de lluvia se registraron en el periodo 1799-1800, y los de lluvia y tormenta durante el periodo 1812-1813.

* Humedad

No hay información sobre la humedad en los metadatos. Se registró solo durante el periodo comprendido entre 6 de enero de 1801 y el 11 de diciembre de 1801.

* Precipitación

La precipitación se registró semanalmente para el periodo 1805-1808 y mensualmente durante el año 1809, y su unidad fue la pulgada de Burgos (1 pulgada = 0.2322 cm).

4.3. Control de calidad

Para detectar posibles errores en la digitalización o valores sospechosos en los datos originales se ha llevado a cabo también un control de calidad para la serie SF1799-1813. Los criterios 1, 2, 3 y 5 de la sección 1 se han aplicado a las variables de presión y temperatura del termómetro adjunto al barómetro. Para la temperatura del aire y la humedad se aplicaron los puntos 1, 2 y 5.

En total, en el control de calidad se han analizado 19618 valores, de los cuales 300 (el 1.53% del total analizado) han sido detectados como errores en la digitalización y han sido corregidos. Los errores en cada variable no fueron los mismos: 82 se detectaron en las observaciones de la presión, 183 en la temperatura del termómetro adjunto al barómetro, 18 en la temperatura del aire y 17 en la humedad. El número total de datos analizados para la presión es de 7652, para la temperatura del termómetro adjunto al barómetro 7774, para la temperatura del aire 3176 y para la humedad 1016. Por tanto, el porcentaje de error total en cada variable es: 1.07% para la presión, 2.35% para la temperatura del termómetro adjunto al barómetro, 0.57% para la temperatura del aire y 1.67% para la humedad.

4.4. Cambio de unidades

4.4.1. Temperatura

Las unidades de la temperatura son los grados Reaumur y Fahrenheit. Se han convertido estos valores a grados Celsius usando las ecuaciones (3) y (4). La ecuación (3) convierte grados Reaumur (T_R) a Celsius (T) y la ecuación (4) convierte grados Fahrenheit (T_F) a Celsius (T).

$$T = \frac{5}{4}T_R \quad (3)$$

$$T = \frac{5}{9}(T_F - 32) \quad (4)$$

4.4.2. Presión

Las unidades de la altura alcanzada en el barómetro ($h_{mercury}$) son la pulgada inglesa y la francesa. Estas unidades se han convertido a metros mediante las siguientes relaciones, respectivamente:

$$h = 0.0254h_{mercury} \quad (5)$$

$$h = 0.02707h_{mercury} \quad (6)$$

* Reducción a 0°C

El mercurio se expande y se contrae dependiendo de la temperatura a la que se encuentre, por tanto, las observaciones meteorológicas registradas con un barómetro de mercurio se deberían de corregir a la temperatura de 0 °C. La densidad del mercurio cambia con la temperatura de acuerdo con la expresión:

$$\rho_{Hg} = \frac{\rho_0}{1 + \alpha T}$$

donde $\alpha = 0.0001818 \text{ K}^{-1}$ es el coeficiente de dilatación térmica para el mercurio a 0 °C, $\rho_0 = 13595.1 \text{ kgm}^{-3}$ es la densidad del mercurio a 0 °C y T es la temperatura del termómetro adjunto al barómetro.

Por otra parte, la escala del barómetro podría expandirse debido a la temperatura; así, las medidas de la escala también deberían de corregirse. La expresión que define el coeficiente de expansión térmica lineal es:

$$\beta = \frac{1}{L} \left(\frac{\Delta L}{\Delta T} \right).$$

Desarrollando esta expresión, la altura de la escala corregida a 0 °C (h_0) se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$h_0 = [1 + \beta T]h, \quad (7)$$

donde h es el valor obtenido en las ecuaciones (5) o (6).

Por tanto, la presión en metros de mercurio se convierte a Pascales mediante la ecuación (8):

$$p_0 = g_n \frac{\rho_0}{1 + \alpha T} [1 + \beta T]h, \quad (8)$$

donde h es la altura del mercurio, T es la temperatura del termómetro adjunto al barómetro y $g_n = 9.80665 \text{ ms}^{-2}$ es la gravedad normalizada.

*** Corrección por gravedad local**

La ecuación (9) permite calcular la gravedad local ($g_{\varphi,H}$) como función de la latitud (φ) y la altura a la que se encuentra la estación meteorológica (H) (OMM, 2018).

$$g_{\varphi,H} = 9.8062(1 - 0.0026442 \cos 2\varphi - 0.0000058 \cos^2 2\varphi) - 0.000003086H. \quad (9)$$

Por último, la ecuación (10) da la presión corregida a 0 °C y a la gravedad local.

$$p_n = p_0 \frac{g_{\varphi,H}}{g_n}. \quad (10)$$

*** Reducción a la presión media del nivel del mar**

Los valores de presión que se han medido a distintas alturas deberían reducirse a valores de presión media a nivel del mar si se van a realizar comparaciones entre ellas (OMM, 2018). La ecuación (11) permite calcular los valores de presión reducidos al nivel del mar:

$$p_{MSL} = p_n \cdot \exp \left(\frac{\frac{g_n H}{R}}{T + a \frac{H}{2}} \right) \quad (11)$$

donde H es la altura de la estación meteorológica, g_n es la gravedad normalizada, $R = 287.05 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ es la constante de los gases para el aire seco, T es la temperatura del aire y $a = 0.0065 \text{ Km}^{-1}$ es la tasa de caída supuesta en la columna de aire ficticia que se extiende desde el nivel del mar hasta la altura de la estación.

Como se ha mencionado anteriormente, las observaciones de la temperatura del aire solo están disponibles para el periodo 1805-1809. Pero el coeficiente de determinación entre las observaciones de la temperatura del aire y las del termómetro adjunto al barómetro para el mismo periodo es $R^2 = 0.8638$ (3174 grados de libertad). Por tanto, en lo sucesivo se considerará a la temperatura T en la ecuación (11) como la del termómetro adjunto al barómetro para el periodo completo 1799-1813.

4.5. Análisis de los datos de presión

En la Figura 5.7 se han representado los datos diarios de presión una vez realizados los cambios de unidades y las correcciones. En los primeros meses del año 1808 se aprecia un descenso continuo en los valores de la presión. Cornes et al. (2012) recuperaron registros de presión medidos con un barómetro Megnié en el Observatorio de París, y observaron que el vacío del barómetro sufrió pérdidas de una tasa de 0.02 Pa/mes. Es posible que el barómetro Megnié del Observatorio de San Fernando también sufriera estas pérdidas. En los metadatos se encontró un comentario de la persona encargada de las observaciones explicando que las lecturas del barómetro Megnié en el año 1808 eran 0.22 pulgadas más bajas que las del barómetro George Adams y, además, más bajas que cuando se instaló. También escribió en el año 1809 que el barómetro se desmontó y reparó en agosto de ese año. Con los datos digitalizados se ha comprobado esta diferencia notificada por el observador entre las lecturas de los dos barómetros; para el periodo 1808-1809, los valores de la presión son, de media, 0.22 pulgadas inferiores a las observaciones del barómetro George Adams para el periodo 1799-1801. Por tanto, se ha sumado 0.22 pulgadas a las observaciones originales para el periodo 1808-1809 (ya ajustado en la Figura 5.7).

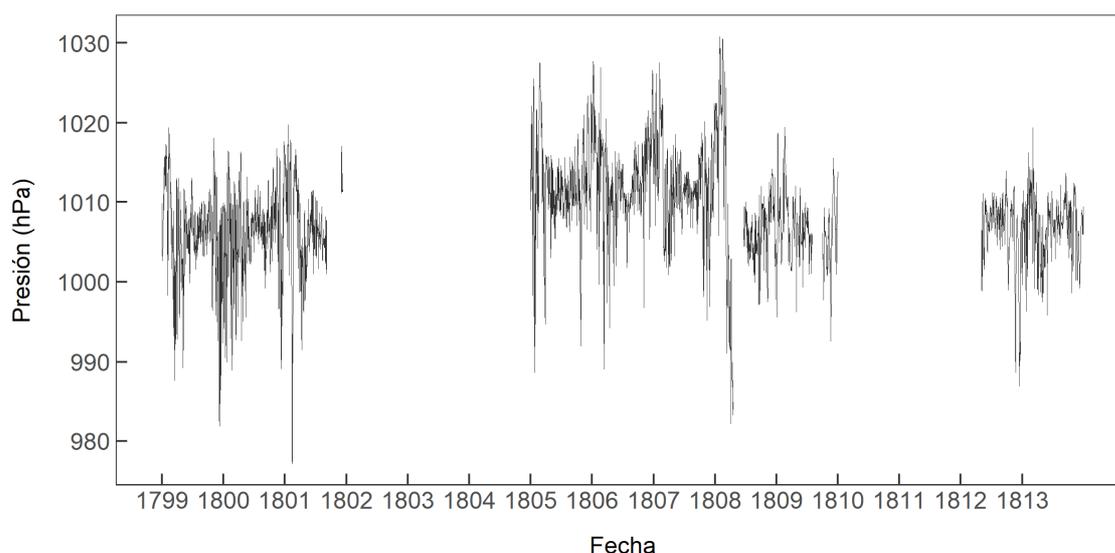


Figura 5.7. Datos diarios de la presión de la serie SF1799-1813 después de hacer los cambios de unidades y las correcciones correspondientes para el periodo 1799-1813.

También se puede apreciar que los valores de la presión del barómetro Megnié son más altos que los del barómetro George Adams. Como es necesario hacer un ajuste a los datos, se ha usado una serie moderna de presión de San Fernando. Esta serie que se nombrará como SF2006-2021 forma parte de la estación meteorológica en San Fernando de la AEMET y cubre el periodo 2006-2021⁶. Para el ajuste, se ha calculado el año tipo mensual (es decir,

⁶ Se puede descargar en <https://datosclima.es/>

la media mensual de todo el periodo) de la serie SF2006-2021 y se han comparado estos valores con los de SF1799-1813, siendo menores estos últimos que los de la otra serie. Se calcula la diferencia entre las dos medias y se añade este valor a la serie de presión del conjunto de datos SF1799-1813. Por todo esto es necesario hacer dos ajustes distintos a los valores de presión de la serie SF1799-1813. Se ha calculado la media de todo el periodo de la serie SF2006-2021 y la media de los periodos 1799-1801 y 1808-1813 de SF1799-1813, y se ha hallado una diferencia de 10.3 hPa entre ambas. Por tanto, a los valores de la presión (después de haber hecho los cambios de unidades y las correcciones necesarias) para los periodos 1799-1801 y 1808-1813 de SF1799-1813 se les ha sumado 10.3 hPa. Esta misma comprobación se ha realizado para el periodo 1805-1808, y se ha encontrado una diferencia de 4.9 hPa, por lo que se ha sumado esta cantidad a los valores de la presión en ese periodo. Otros trabajos que han analizado series de presión han encontrado este mismo problema. Por ejemplo, Können y Brandsma (2005) realizaron un ajuste de 16.7 hPa en la serie de presión de Leiden (Países Bajos). Fue necesario un ajuste entre 9.0 y 10.5 hPa para una serie de presión de Londres (Inglaterra) (Slonosky et al., 2001). Además, Rodrigo (2019) encontró una diferencia entre los valores mensuales de presión en Cádiz para el periodo 1820-1822 y los valores del periodo 1901-1930 del orden de 3 hPa. Algunas posibles explicaciones a este problema podrían hallarse en la diferencia de altura entre los instrumentos, en la calibración del barómetro, imperfecciones o la existencia de aire atrapado en ellos, o el desconocimiento de la altura correcta a la que estaba situado el barómetro.

Además, la serie de datos SF1799-1813 se ha comparado también con una serie de paleoanálisis global mensual (EKF400v2) generada para el periodo 1600-2005 por Valler et al. (2021). En la Figura 5.8 se muestran las dos series usadas para comparar (SF2006-2021 y

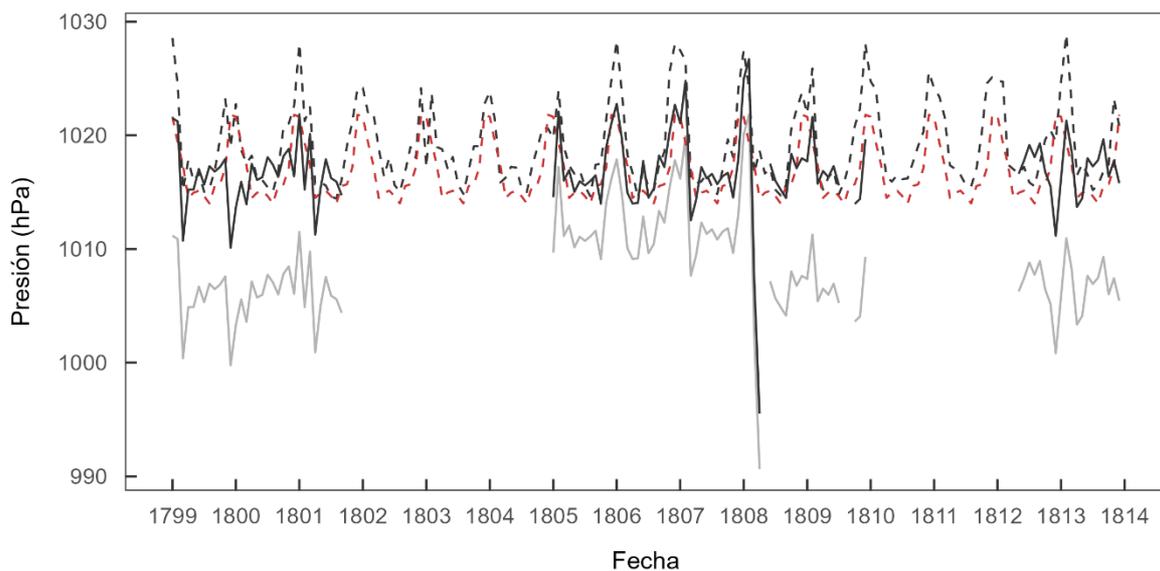


Figura 5.8. La línea gris representa los valores medios mensuales de la presión de la serie SF1799-1813 y la línea negra continua representa lo mismo después de realizar el ajuste. La línea roja discontinua muestra el año tipo mensual de la serie SF2006-2021. La línea negra discontinua representa los valores mensuales de la presión de la serie EKF400v2.

EKF400v2) junto con la serie SF1799-1813 antes y después de realizar el ajuste a la serie moderna. La línea gris representa los valores medios mensuales de la presión de la serie SF1799-1813, y la línea negra continua representa esos valores después de hacer el ajuste. La línea roja discontinua muestra el año tipo mensual de la serie SF2006-2021, y la línea negra discontinua representa los valores mensuales de presión de la serie EKF400v2. Se puede apreciar en la Figura 5.8 que los valores de EKF400v2 son más altos que los de las otras dos series. Al tratarse de datos de reanálisis, se han escogido unas coordenadas muy cercanas a San Fernando, pero no las exactas; una posible explicación a esta diferencia podría encontrarse en este hecho. En todo caso, el comportamiento de los valores de la presión de EKF400v2 es similar al de las otras dos series.

4.6. Análisis de los datos de temperatura

Al igual que en el apartado anterior, se han usado los datos de temperatura de las series de SF2006-2021 y EKF400v2 para compararlos con la serie SF1799-1813. En la Figura 5.9 se han representado las tres series conjuntamente. La línea gris muestra los datos diarios de temperatura del aire de la serie SF1799-1813 para el periodo 1805-1809. La línea roja discontinua representa el año tipo diario de la temperatura del aire de la serie SF2006-2021. Por último, la línea negra discontinua muestra los valores mensuales de la temperatura de la serie EKF400v2 para el periodo 1805-1809. Como se puede apreciar, las tres curvas presentan un comportamiento similar. Además, existe una buena concordancia entre las dos series de San Fernando (SF1799-1813 y SF2006-2021); el coeficiente de determinación entre ambas curvas es $R^2 = 0.9104$. El coeficiente de determinación entre la serie SF1799-1813 y la de EKF400v2 es $R^2 = 0.9384$. Para el caso de los valores desestacionalizado de los

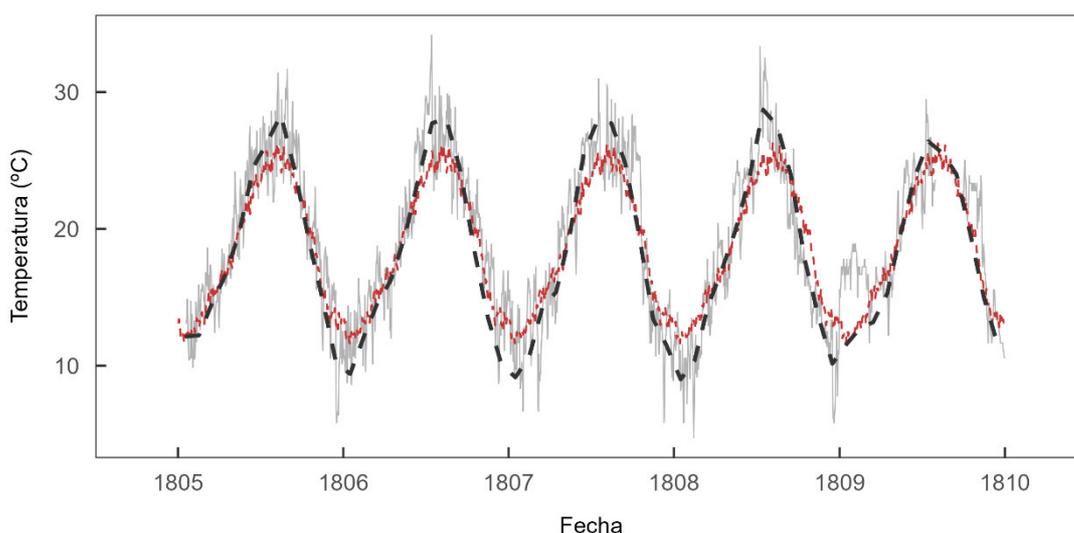


Figura 5.9. La línea gris muestra los datos diarios de temperatura del aire de la serie SF1799-1813 para el periodo 1805-1809. La línea roja discontinua representa el año tipo diario de la temperatura del aire de la serie SF2006-2021. Por último, la línea negra discontinua muestra los valores mensuales de la temperatura de la serie EKF400v2 para el periodo 1805-1809.

conjuntos de datos SF1799-1813 y EKF400v2, el coeficiente de determinación es $R^2 = 0.4119$. Estos tres últimos análisis se han realizado con valores mensuales. La temperatura del aire del conjunto de datos SF1799-1813 para el periodo 1805-1809 muestra un ciclo estacional similar a la media mensual del conjunto de datos SF1997-2021 y a la temperatura mensual del conjunto de datos EKF400v2. La temperatura de SF1799-1813 en los meses de verano para el periodo 1805-1809 es ligeramente mayor (bastante similar) que la media mensual de SF1997-2021 (EKF400v2).

Como se muestra en la Figura 5.9, la temperatura del aire de las tres series es bastante similar en los primeros meses de cada año excepto para el año 1809. Los valores de la temperatura en los primeros meses de 1809 de los datos recuperados (SF1799-1813) son más altos que la temperatura media del periodo 2006-2021 (SF2006-2021) y de los valores mensuales de los datos de reanálisis (EKF400v2) en esos meses. Este mismo comportamiento de los datos de la temperatura del aire de la serie SF1799-1813 se da en la temperatura del termómetro adjunto al barómetro de esta misma serie de datos, aunque estos resultados no se muestren. Para comprobar si este comportamiento es único de este lugar (por lo que podría tratarse de un posible error) o si, por el contrario, se da en otros lugares del mundo, se han buscado otras series instrumentales de temperatura disponibles que incluyeran el año 1809. Seis series diferentes de temperatura de Suiza (Brugnara et al., 2020) presentan el mismo comportamiento en los primeros meses de 1809. En registros de temperatura de Mallorca y Madrid (Domínguez-Castro et al., 2014b) también se ha hallado un comportamiento similar. Por tanto, parece que no se trata de ningún error a la hora de registrar las observaciones o de los aparatos y, aparentemente, este comportamiento se manifiesta en otros lugares del suroeste de Europa.

4.7. Análisis de los datos de viento y del estado del cielo

La rosa de los vientos superior en la Figura B.2 del Apéndice B muestra la frecuencia de los datos de dirección de los vientos de la serie rescatada (SF1799-1813) representada para todo el periodo 1799-1813. En general, hay 5 rumbos predominantes: NW, W, SW, SE y ESE. En los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) los vientos preponderantes son N, NW, SW; también son relevantes las direcciones SE y ESE, aunque en menor grado. En los meses de primavera (marzo, abril y mayo) las principales direcciones son NW, SW y SE. En los meses de verano (junio, julio y agosto), las direcciones predominantes son W, SW y ESE. Por último, en los meses de otoño (septiembre, octubre y noviembre), la dirección del viento principal es SW; en menor medida también son importantes las direcciones NW, SE y ESE. Estos vientos predominantes concuerdan con la localización de la ciudad de San Fernando, muy cercana al estrecho de Gibraltar. En general, la frecuencia de los vientos del oeste es más alta que los del este, como era de esperar (Sousa, 1987).

Por otra parte, se ha representado la frecuencia (junto con el porcentaje correspondiente) de los términos que describen la fuerza del viento y el estado del cielo. En la Figura 5.10 se muestran ambas gráficas, estando en el panel superior los datos relativos a la fuerza del viento para el periodo 1799-1813 y en el panel inferior los del estado del cielo para el periodo 1805-1813. Los términos de la fuerza del viento se han presentado con el nombre original escrito en los manuscritos, pero podrían convertirse a la escala de Beaufort usando el diccionario CLIWOC (García-Herrera et al., 2003). Los términos predominantes son: flojo (fuerza del viento 3 en la escala Beaufort), fresquito (escala de Beaufort = 5) y fresco (escala de Beaufort = 6). Además, hay dos términos más con un gran número de observaciones, que son: bonancible (escala de Beaufort = 4) y recio (escala de Beaufort = 7). Calvo et al. (2008) obtuvieron valores de frecuencia similares para una serie de datos de Cádiz (10 km al noreste de San Fernando) para el periodo 1806-1852. Por otra parte, la

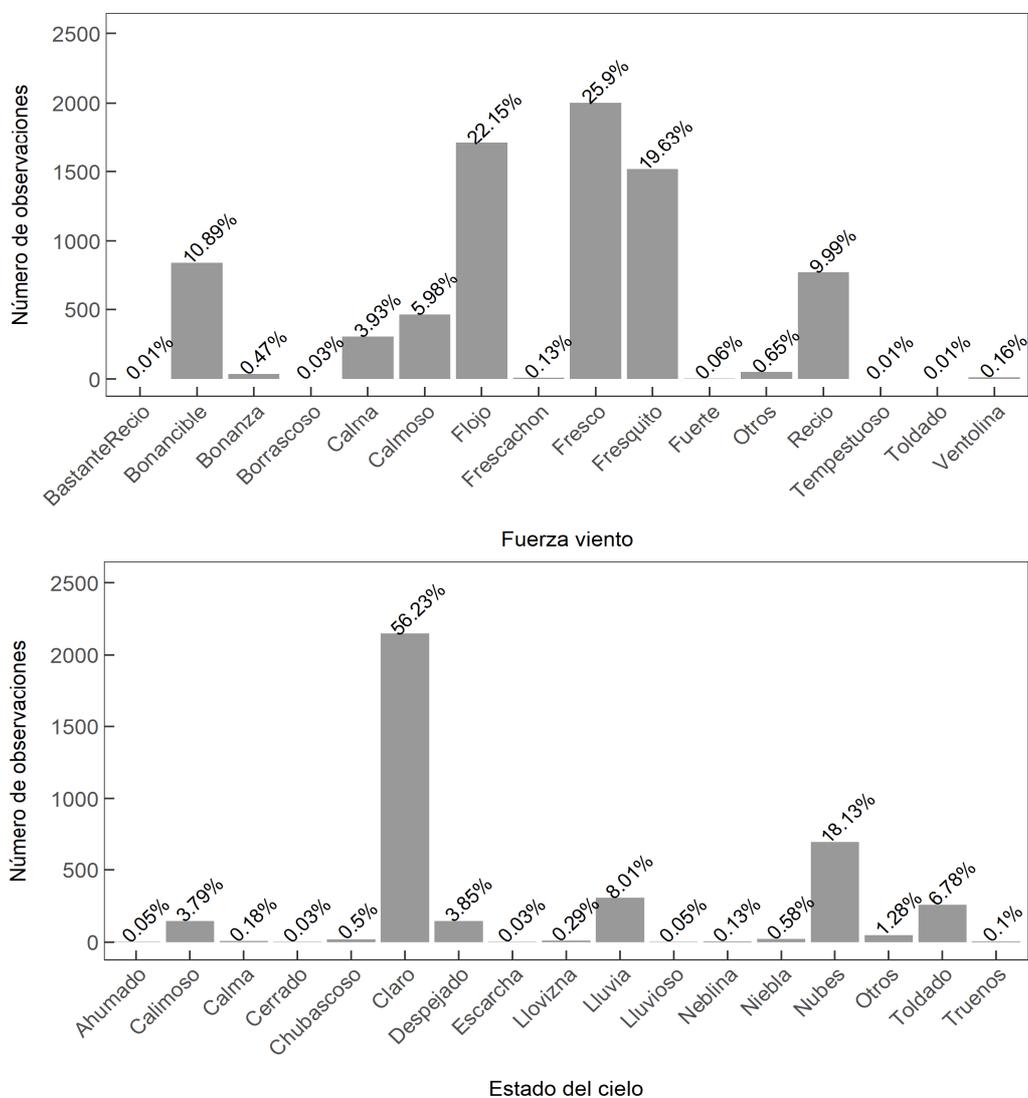


Figura 5.10. Frecuencia (junto con el porcentaje correspondiente) de los términos que describen la fuerza del viento y el estado del cielo. El gráfico superior muestra los datos relativos a la fuerza del viento para el periodo 1799-1813 y el inferior los del estado del cielo para el periodo 1805-1813.

los que se registró más precipitación. En la Figura 5.12 se muestra la presión a nivel del mar y las anomalías de precipitación total (lluvia y nieve) de la serie EKF400v2 para los meses de noviembre y diciembre de 1812 y para los meses de octubre a diciembre de 1813. Como se muestra en la Figura 5.12, aparece un valor alto de anomalía de precipitación (alrededor de 200 mm) y un valor de presión alrededor de 1020 hPa para el mes de diciembre de 1812 en el sur de España. Para el año 1813, también se estiman valores altos en la precipitación para los meses de octubre y diciembre, y un valor de anomalía 0 de precipitación para el mes de noviembre en el sur de España. Por otra parte, se estiman valores de presión sobre los 1020 hPa en los meses de noviembre y diciembre de este año, y de 1018 hPa para el mes de octubre. En general, la dinámica atmosférica a gran escala en estos meses está de acuerdo con los valores de precipitación representados en la Figura 5.12 para estos meses.

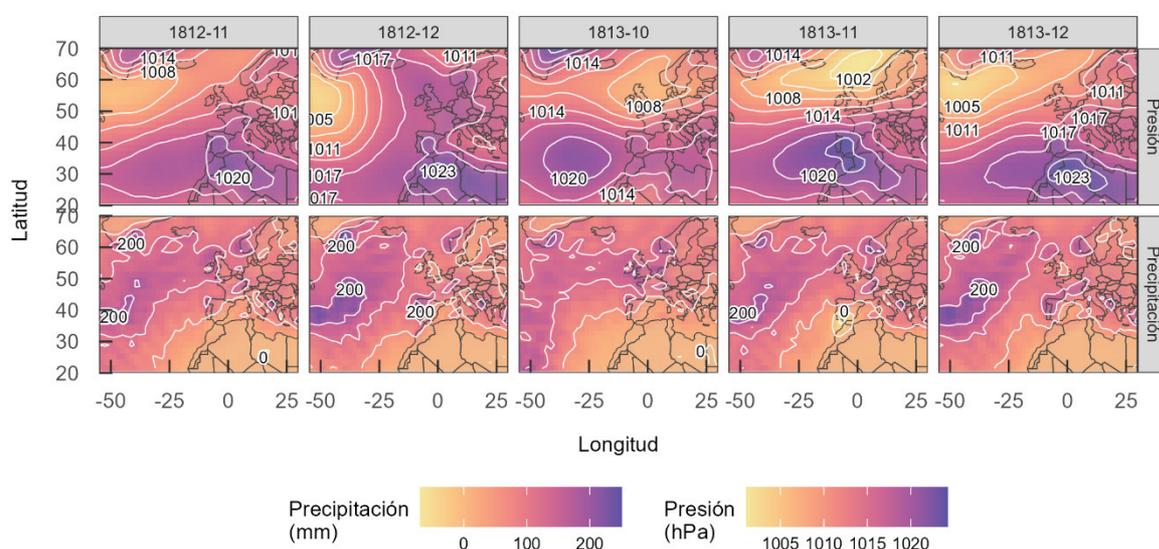


Figura 5.12. Presión a nivel del mar y anomalías de precipitación en los meses en los que más precipitación acumulada se registró durante el periodo 1805-1813 de la serie SF1799-1813.

5. Datos de Almada (Portugal)

5.1. Introducción

Las primeras observaciones meteorológicas que se conocen de Portugal son las realizadas por Diogo Nunes Ribeiro en Lisboa entre el 1 de noviembre de 1724 y el 11 de enero de 1725. A pesar de ser una serie muy corta, se ha usado para analizar la tormenta tropical de noviembre de 1724, que causó importantes daños en la isla de Madeira (Domínguez-Castro et al., 2013).

También en Portugal han sido muchos los esfuerzos por recuperar datos meteorológicos de siglos pasados, así como en la colonia portuguesa de Rio de Janeiro en Brasil. Por ejemplo,

Alcoforado et al. (2012) recuperaron medidas meteorológicas de Portugal Continental, la isla de Madeira y Rio de Janeiro para el periodo 1749-1802. Farrona et al. (2012) han recuperado observaciones meteorológicas diarias realizadas en Rio de Janeiro para el periodo 1781-1788. Montero-Martín et al. (2021) recuperaron las series más tempranas conocidas de horas de sol y cobertura nubosa registradas en Coimbra para el periodo 1891-1950.

Además, las observaciones meteorológicas y los eventos climáticos extremos se han usado también para reconstruir el clima de Portugal: Alcoforado et al. (2000) reconstruyeron la temperatura y la precipitación durante el Mínimo de Maunder (AD 1675-1715), Fragoso et al. (2015) usaron información meteorológica para reconstruir las condiciones climáticas en Portugal durante el siglo XVIII, Fragoso et al. (2018) usaron diferentes fuentes documentales para estudiar las sequías en Portugal durante el siglo XVIII y Alcoforado et al. (2021) usaron diferentes fuentes documentales para analizar y extender el conocimiento sobre las inundaciones que ocurrieron en el río Duero en Oporto durante el periodo 1727-1799.

En la presente tesis, se ha recuperado la serie meteorológica más temprana registrada en Almada (Portugal) para el periodo 1788-1813. Esta serie meteorológica fue registrada por varios médicos que ejercían su labor en Almada. En otras partes del mundo, la comunidad médica ha sido una de las pioneras en llevar a cabo un registro de observaciones meteorológicas (Anduaga Egaña, 2012). Esta tarea la realizaban al estar interesados en la influencia de los factores meteorológicos en la salud humana.

5.2. Acceso al conjunto de datos

El conjunto de datos recuperado está públicamente disponible en el repositorio de datos abierto Zenodo. Se puede acceder a él mediante el siguiente enlace: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8069288>.

5.3. Descripción del conjunto de datos de Almada

Un conjunto documental de *Livros de observações médicas e meteorológicas* se encuentra disponible para el periodo 1785-1813 en el Archivo Histórico Municipal de Almada con número identificativo del 3014 al 3029.

En total, se han recuperado 5883 observaciones meteorológicas de estos manuscritos para el periodo 1788-1813. El conjunto de datos se compone de valores diarios y mensuales. Las observaciones diarias se encuentran disponibles para el periodo 1888-1889 y, en total, suman 4372 datos meteorológicos correspondientes a distintas variables: temperatura de la mañana y la tarde, pulgadas y líneas de presión, dirección del viento y estado del cielo. En los metadatos no se hace referencia a las horas de observación, a las unidades de medida ni a los instrumentos usados. Se han recuperado observaciones meteorológicas mensuales para los años 1792, 1796, el periodo 1798-1807 y el año 1813. Estos años reúnen 1511 datos

meteorológicos de distintas variables: temperatura máxima, media y mínima, pulgadas y líneas de presión máxima, media y mínima, dirección del viento y estado del cielo. Al igual que ocurre en los datos diarios, en los metadatos no hay información sobre los instrumentos usados o las horas de observación.

Una posible explicación para que haya periodos tan diferenciados de observación puede ser el hecho de que hubo distintos médicos en Almada durante el periodo 1788-1813. El médico Gaspar Lopes Henriques de Chaves ejerció su profesión en Almada durante el periodo 1785-1792, José Joaquim Alvares lo fue en 1796-1807 y José António Morão en 1813.

5.4. Control de calidad

Al igual que en las secciones anteriores, se ha realizado un control de calidad para comprobar la existencia de errores en la digitalización o valores sospechosos en los datos originales. Para ello, se han aplicado los criterios 1, 2 y 5 de la sección 1 a la serie de Almada recuperada. Las variables a las que se les ha aplicado el control de calidad son las de temperatura y presión.

En total, se han analizado 2911 valores diarios en el control de calidad y se han corregido 8 valores pertenecientes a la presión. Esto supone un 0.27% del total de datos analizados. De los valores corregidos, 3 de ellos corresponden a errores al digitalizar; el resto son claros errores originales que son fáciles de detectar.

5.5. Análisis de las distintas variables

En la Figura 5.13 se muestran los datos de presión diarios para el periodo 1788-1789 en el panel superior. En el inferior, se muestran los datos mensuales para el periodo 1792-1813, donde las líneas gris claro, medio y oscuro se corresponden con los valores mínimos, medios y máximos, respectivamente. Aunque no hay información en los metadatos sobre las unidades de las variables, los valores originales se han representado en hectopascales suponiendo que la pulgada utilizada era la francesa (1 pulgada = 27.07 mm = 36.09 hPa). Se ha hecho esta suposición teniendo en cuenta el rango de valores de las pulgadas de presión. Como se puede ver en el panel inferior, los valores mínimos mensuales son más altos que los medios y máximos en algunos casos (por ejemplo, en los años 1792 y 1793). Esto hace pensar que, en realidad, no se trataban de valores máximos, medios y mínimos sino que, probablemente, se traten de valores medidos por la mañana, al mediodía y por la tarde. Además, también se puede ver cómo el valor de los últimos meses del año 1792 están muy por debajo del resto. Esto puede ser un error original; es decir, la persona encargada de escribir el valor en el manuscrito cometió un fallo.

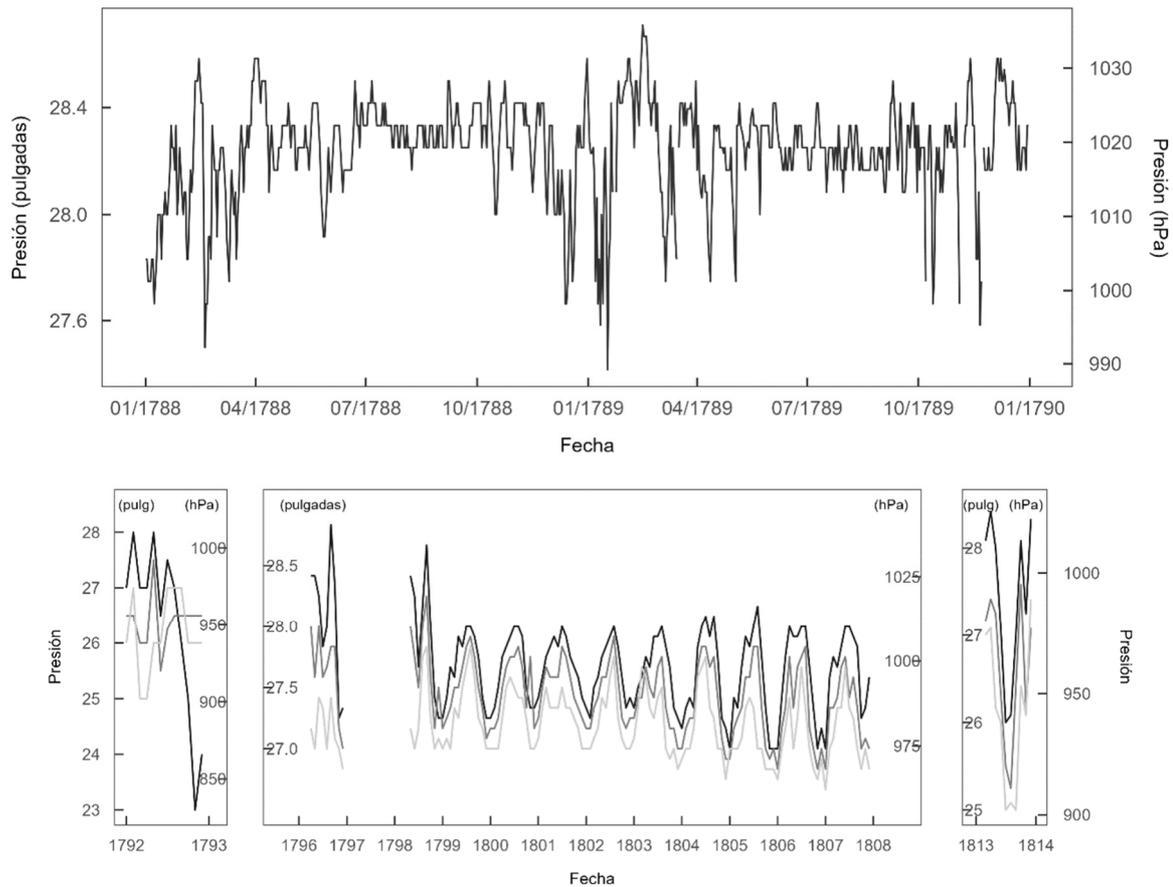


Figura 5.13. Observaciones de presión diarias para el periodo 1788-1789 (figura superior) y mensuales para el periodo 1792-1813 (figura inferior).

Los datos de temperatura se muestran en la Figura 5.14. En el panel superior se muestran las observaciones de la temperatura por la mañana (gris claro) y por la tarde (gris oscuro) para el periodo 1788-1789; en el panel inferior se representan las observaciones de la temperatura máxima (gris oscuro), media (gris medio) y mínima (gris claro) para el periodo 1792-1813. En la Figura 5.14 (panel superior) se puede apreciar cómo la temperatura de la tarde en los últimos días del año 1789 registra valores muy por debajo de la media; es muy probable que se traten de errores originales. Al igual que ocurría con la variable de la presión, la temperatura presenta distinta unidad de medida dependiendo del periodo. Teniendo en cuenta el rango de valores de la temperatura de los datos diarios y de los datos mensuales para el año 1792, es probable que se trate de la escala Fahrenheit. Respecto al periodo 1796-1813, es posible que la escala sea la de grados Reaumur. En cualquier caso, se ha añadido un segundo eje con la escala Celsius en la Figura 5.14.

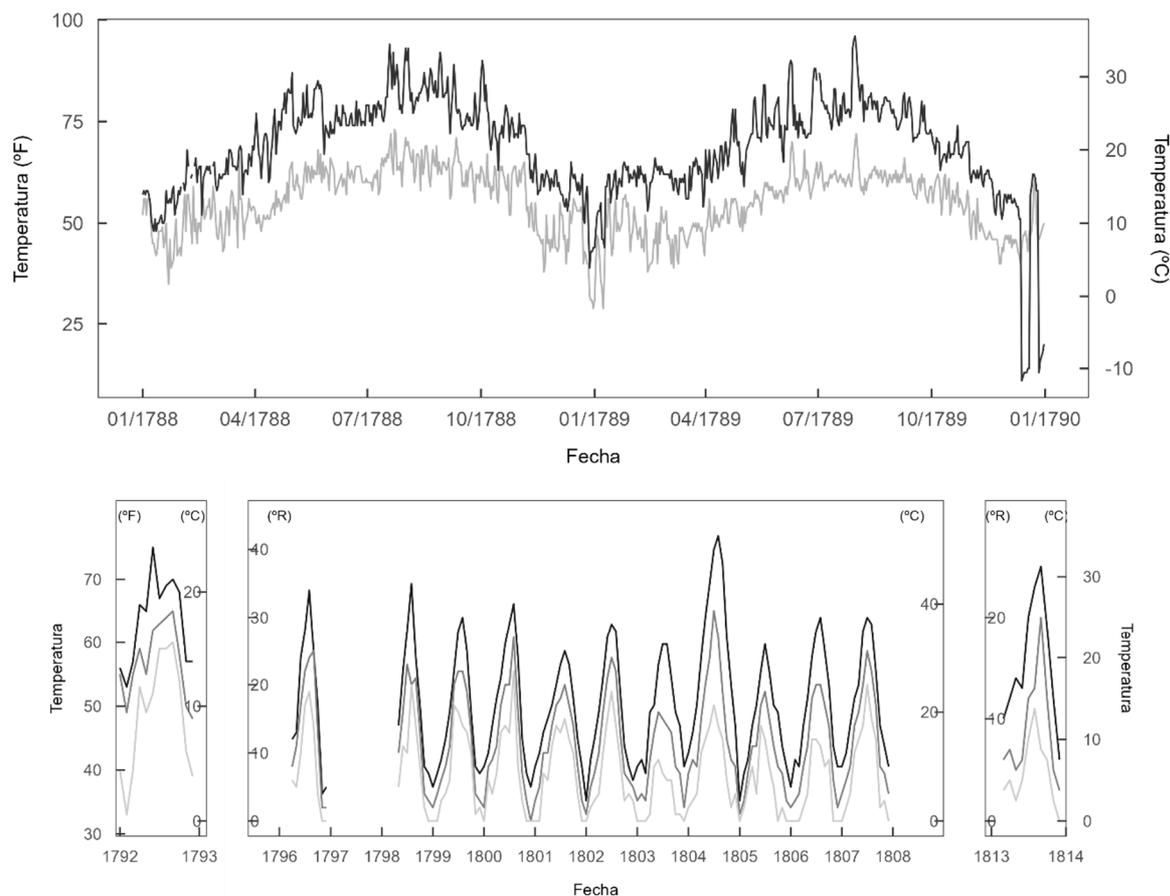


Figura 5.14. Superior: observaciones de temperatura por la mañana (gris claro) y por la tarde (gris oscuro) para el periodo 1788-1789. Inferior: observaciones de temperatura máxima (gris oscuro), media (gris medio) y mínima (gris claro) para el periodo 1792-1813.

El invierno de 1788/1789 es uno de los más duros en los últimos 300 años en la Europa Central (Brázdil et al., 2003; Gisler, 1985). Pappert et al. (2022) han analizado los datos de presión y temperatura en Europa en el invierno de 1788/1789. En este estudio, en la PI solo hay datos de Cádiz, Madrid y Barcelona. Por tanto, con la serie meteorológica de Almada se podría aumentar la información sobre el invierno de 1788/1789 en la PI. En la serie de Almada, sin tener en cuenta los posibles *outliers* de finales de 1789, se registran los valores mínimos de temperatura a finales del año 1788 y principios del 1789 (Figura 5.14); por la mañana, la temperatura mínima es de 29 grados y se registra el día 31 de diciembre de 1788 y el 8 de enero de 1789, y por la tarde es de 39 grados y se registra el día 28 de diciembre de 1788. Si la unidad de la temperatura es el grado Fahrenheit, las temperaturas de la mañana y de la tarde en grados Celsius son $-1.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $3.89\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Como se puede ver en la Figura 1.4, la temperatura media mensual de enero y diciembre en Lisboa no baja de los $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. El día 23 de diciembre de 1788 se produjo un gran descenso en la temperatura, con una diferencia entre el día 22 y 23 de unos $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, tanto por la mañana como por la tarde. Se registraron valores bajos de temperatura hasta el día 9 de enero de 1789 cuando volvió a subir la temperatura hasta los $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ por la mañana y tarde,

respectivamente. La lectura del barómetro a finales de diciembre de 1788 y principios de enero 1789 registra valores de más de 28 pulgadas, alcanzando el valor máximo de 28.58 pulgadas (Figura 5.13). Si la pulgada con la que registraron los valores de presión fue la francesa, en hectopascales sería alrededor de 1010.53 hPa para las 28 pulgadas y alrededor de 1031.46 hPa para las 28.58 pulgadas. No se conoce el valor de la altura donde estaba posicionado el barómetro ni otras características, por lo que no se han podido hacer correcciones a los valores transformados a hectopascales. En la Figura 7 de Pappert et al. (2022) se muestra un bloqueo persistente en toda Europa. Teniendo en cuenta los valores mostrados (presión y temperatura) y que la mayoría de días el cielo se anotó como “despejado” y “claro”, estos valores podrían estar de acuerdo con Pappert et al. (2022) y tratarse de un anticiclón.

La frecuencia de la dirección del viento para los datos diarios del periodo 1788-1789 se representa en la Figura 5.15 (izquierda). Solo se han representado los datos diarios puesto que en los datos mensuales no aparece un único valor de la dirección, sino que anotaban varios. La dirección predominante en Almada para el periodo 1788-1789 es NW, como se puede ver en la Figura 5.15. Las siguientes direcciones dominantes son NW, N, NNE y NE, y, en menor medida, SW, W y WNW.

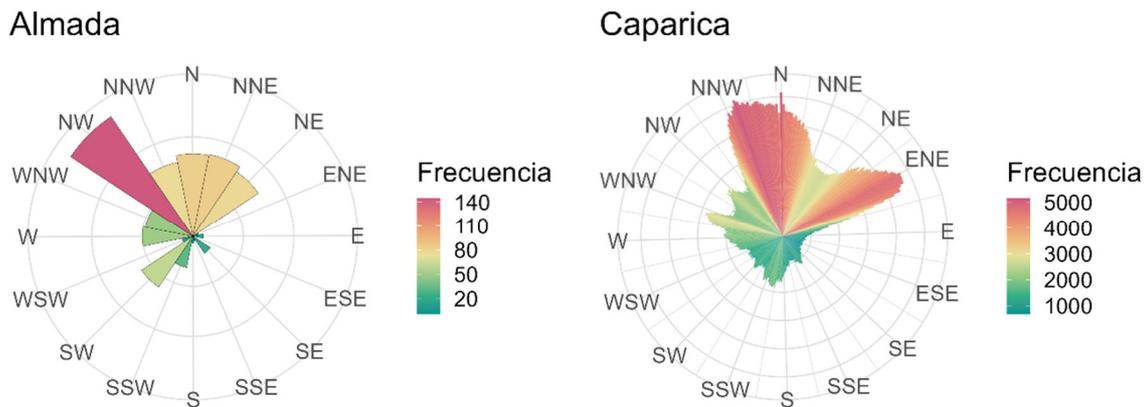


Figura 5.15. Frecuencia de los datos de dirección de viento de la serie meteorológica diaria de Almada para el periodo 1788-1789 (izquierda) y para la serie subdiaria de Caparica para el periodo 2002-2017 (derecha).

Respecto a las observaciones del estado del cielo no se han representado puesto que la información es muy variada: anotaban distinto tipo de información sobre los estados de la atmósfera en un mismo día.

Además, se ha realizado una comparación entre los datos recuperados de Almada con datos modernos de dirección de viento, aunque haya diferencias obvias entre los instrumentos utilizados y su localización. Los datos modernos de dirección de viento usados para la comparación pertenecen a la estación meteorológica de Caparica (a unos 7 km al oeste de Almada). La estación registraba datos cada 10 minutos durante el periodo 2002-

2017. La frecuencia de estos datos se ha representado en la Figura 5.15 (derecha). Cualitativamente, la distribución de las direcciones de viento en los conjuntos de datos de dirección de viento de Almada y Caparica es similar. La dirección dominante es NW para Almada y NNW para Caparica. Pueden ser muchas las razones para esta diferencia en la frecuencia de ambas bases de datos, desde los efectos locales de la posición de los instrumentos hasta la diferencia en el registro de los datos.

Para terminar, el conjunto de datos histórico de Lisboa se ha usado como referencia para comparar el comportamiento del ciclo anual climatológico de una estación moderna con el comportamiento de los datos mensuales de Almada (a pesar de las diferencias en el periodo de ambos conjuntos de datos). Por lo tanto, se han realizado las medias mensuales de la presión y la temperatura para el conjunto de datos de Lisboa para el periodo 1864-2018 y 1855-2018, respectivamente. Además, el conjunto de datos EKF400v2 (ya mencionado anteriormente) se ha usado como referencia para comparar los datos mensuales disponibles de la cuadrícula con los datos mensuales recuperados de Almada. Así, los datos mensuales de presión y temperatura de los conjuntos de datos de Almada y EKF400v2 se compararán. El periodo elegido para estos dos últimos conjuntos de datos es 1798-1808 puesto que no hay huecos en el conjunto de datos de Almada. Debido a la diferencia de unidades usadas entre los diferentes conjuntos de datos a comparar, se han normalizado los valores de los tres conjuntos de datos usando la ecuación *z-score*:

$$z = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}, \quad (12)$$

donde x_i es el valor mensual de presión o temperatura, \bar{x} es la media mensual de los valores de presión o temperatura para el periodo 1798-1808 y σ es la desviación estándar mensual de presión o temperatura para el periodo 1798-1808.

A continuación, se va a describir la comparación de las tres series de datos. La evolución temporal de las series EKF400v2 y Lisboa son muy similares (como era de esperar), tanto para la presión como para la temperatura. Sin embargo, el comportamiento de la serie de datos de Almada muestra diferencias significativas entre ambas series (EKF400v2 y Lisboa). En general, se pueden señalar importantes inconsistencias en la serie mensual del conjunto de datos de Almada. Uno de ellos es la inversión en el ciclo anual de la presión en Almada respecto a los otros dos conjuntos de datos comparados: cuando los valores de presión son positivos en los datos de Almada, los valores de presión son negativos en los conjuntos de datos EKF400v2 y Lisboa, y viceversa. Por esta razón, es posible que los datos mensuales de presión del conjunto de datos de Almada no fueran bien medidos, aunque la falta de metadatos no permitirá evaluar bien este problema. Respecto a los valores mensuales de temperatura, se vuelven a encontrar problemas en los datos de Almada al compararlos con las otras dos series. En este caso, el ciclo anual no está invertido, pero la amplitud de

oscilación de la temperatura es bastante variable y no parece reproducir la variabilidad natural. En particular, se aprecian fuertes cambios en los valores medios durante los años 1803-1806. El resto de años se ajustan bastante mejor a las dos series comparadas. Además, se aprecia una mayor variabilidad en el caso de los valores mínimos y máximos de los datos de Almada. Por tanto, las observaciones mensuales de presión y temperatura del conjunto de datos de Almada deben ser usadas con precaución. Por otra parte, parece que los valores diarios de la serie de Almada no muestran estos problemas.

Capítulo 6

La huella de grandes eventos en el clima y en el tiempo

1. Erupciones volcánicas

1.1. Introducción

El mecanismo principal por el que la actividad volcánica influye en el sistema climático se produce a través del intercambio en la cantidad de aerosoles en la atmósfera (Kondratyev, 1984; Robock, 2000). En la atmósfera oxidante, el SO_2 de origen volcánico se convierte en H_2SO_4 o en sulfatos químicamente estables, siendo esta conversión muy rápida. En la troposfera, esta transformación se da en pocos días, mientras que en la estratosfera puede tardar hasta varias semanas o meses. El ácido sulfúrico es altamente higroscópico y, por tanto, existe como $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ o como aerosoles de ácido sulfúrico (Cole-Dai, 2010). Estos aerosoles dispersan la radiación solar; de esta manera, modifican la cantidad de energía que llega al suelo y la energía dispersada vuelve al espacio. Además, también absorben y reemiten radiación infrarroja, lo que conduce a un calentamiento o enfriamiento (depende del tamaño de las partículas) del gas ambiente. El efecto neto habitual de las partículas pequeñas, como el H_2SO_4 , se traduce en un enfriamiento en la superficie (no llega la radiación solar e infrarroja al suelo) y un calentamiento en la estratosfera (las radiaciones solar e infrarroja son absorbidas) (Kondratyev, 1984).

Son varios factores los que determinan el impacto en el clima de una erupción volcánica. Uno de ellos es la fuerza explosiva de la erupción. Dependiendo de la magnitud de esta, la columna de gas y ceniza alcanzará una mayor o menor altura, pudiendo llegar hasta la estratosfera. La mayoría de las erupciones volcánicas no son tan potentes como para que la columna de gas y ceniza se extienda hasta la estratosfera. En la troposfera, el tiempo de permanencia de los aerosoles volcánicos es de unos pocos días debido a que las cenizas son devueltas a la superficie por sedimentación o precipitación. Por tanto, la mayoría de erupciones cuyos aerosoles no pasan de la troposfera no tienen un impacto significativo en el clima (Cole-Dai, 2010; Kondratyev, 1984).

Sin embargo, los tiempos de permanencia de los aerosoles en la estratosfera son mucho más largos que en la troposfera; por tanto, si los aerosoles volcánicos llegan a la estratosfera tendrán un mayor efecto sobre el balance de energía de la Tierra (Kondratyev, 1984). Es mucho más probable que las grandes erupciones que alcanzan la estratosfera tengan un impacto significativo en el clima. Esto es debido a que se inyecta una gran cantidad de SO_2 de la erupción, a los largos tiempos de permanencia de los aerosoles en la estratosfera y a la distribución de los aerosoles por todo el planeta a través de la circulación estratosférica (Cole-Dai, 2010). Al contrario que en la troposfera, los aerosoles volcánicos pueden llegar a permanecer en la estratosfera uno (o más) años, por lo que pueden causar un enfriamiento significativo en la superficie (Kondratyev, 1984). Las grandes erupciones que tienen lugar en los trópicos pueden causar un impacto global puesto que sus aerosoles se distribuyen por

todo el planeta a través de la rápida circulación longitudinal y el transporte de los aerosoles hacia los polos en ambas direcciones (Cole-Dai, 2010).

1.2. Las grandes erupciones desde que existen registros de temperatura

Para cuantificar la magnitud de las erupciones volcánicas históricas se construyó un índice de explosividad volcánica (*Volcanic Explosivity Index* - VEI) a partir de datos como el volumen de inyección, la altura de la columna de ceniza, el tipo de erupción, la duración o el impacto ambiental (Newhall y Self, 1982). La escala de este índice va desde el 0 hasta el 8, siendo esta última categoría la más virulenta. Robock (2000) reunió en su trabajo las grandes erupciones de los últimos 250 años (Tabla 1 de su trabajo). En la Tabla 6.1 se ha resumido la información de Robock (2000) anotando solo el nombre y el lugar de la erupción, el año y el índice VEI. Además, se ha incluido la erupción de 1809 y se estima que el VEI de esta erupción es 6 (Guevara-Murua et al., 2014).

Tabla 6.1. Resumen de la Tabla 1 de Robock (2000) en la que recoge las grandes erupciones de los últimos 250 años. En esta tabla se anota el nombre del volcán, el lugar, el año y el índice VEI. Se ha incluido la erupción de 1809.

Volcán	Lugar	Año	VEI
Grimsvotn [Laki]	Islandia	1783	4
Desconocido	Desconocido	1809	6
Tambora	Sumbawa (Indonesia)	1815	7
Cosigüina	Nicaragua	1835	5
Askja	Islandia	1875	5
Krakatoa	Indonesia	1883	6
Okataina [Tarawera]	Isla Norte (Nueva Zelanda)	1886	5
Santa María	Guatemala	1902	6
Ksudach	Kamchatka (Rusia)	1907	5
Novarupta [Katmai]	Alaska (Estados Unidos)	1912	6
Agung	Bali (Indonesia)	1963	4
Monte Santa Helena	Washington (Estados Unidos)	1980	5
El Chichón	Chiapas (México)	1982	5
Monte Pinatubo	Luzón (Filipinas)	1991	6

La primera gran erupción de un volcán que tuvo lugar cuando ya existían los primeros registros de temperatura fue la del Laki en Islandia en junio de 1783, la cual se prolongó hasta febrero de 1784 (Kondratyev, 1984). Se estima que produjo 200 megatoneladas de aerosoles sulfúricos, de los cuales 25 megatoneladas permanecieron durante más de un año en la estratosfera (Thordarson y Self, 2003). Esta gran cantidad de cenizas produjo una “neblina” que no solo estuvo presente en Islandia, sino que se vio en gran parte de Europa, incluso en el este de China (Cole-Dai, 2010; Kondratyev, 1984; Thorarinsson, 1979). De hecho, cierta cantidad de aerosol llegó a pasar a algunas zonas del hemisferio sur (Trigo et al., 2010). Cole-Dai (2010) recoge numerosos testimonios de diferentes trabajos publicados

sobre la presencia de esta “niebla seca” en diferentes partes de Europa. Por otra parte, los efectos de la erupción se manifestaron en las temperaturas en superficie. Cole-Dai (2010) calcula la media de las anomalías de temperatura de 29 estaciones diferentes de Europa y el noreste de los Estados Unidos y observa un descenso medio de hasta 1.3-1.4 °C en la temperatura (esto se puede ver en la Figura 9 del artículo).

La erupción volcánica del Tambora en abril de 1815 fue la más violenta y la que causó más muertes en estos últimos 250 años (Kondratyev, 1984). Meses más tarde de la erupción, entre finales de junio y principios de octubre, se observaron atardeceres con colores muy vivos en Londres y una persistente “niebla seca” al noreste de los Estados Unidos. Incluso se llegaron a observar manchas solares a simple vista en 1816 por el oscurecimiento aparente del Sol debido a las cenizas (Kondratyev, 1984) que hacía que se pudiese mirar el disco solar sin deslumbramiento. Esta erupción también tuvo grandes consecuencias en el clima, de hecho, al año 1816 se le conoce comúnmente como “el año sin verano”. Son muchos estudios los que han encontrado un descenso anormal en las temperaturas en superficie de distintas partes del mundo (por ejemplo, Brázdil et al., 2016; Raible et al., 2016; Trigo et al., 2009).

La erupción de 1809 es la segunda más violenta de estos últimos siglos después del Tambora. Se estima que la contribución de sulfatos a la atmósfera fue la mitad que la del Tambora pero más del doble que la del Krakatoa (Gao et al., 2008). La fecha exacta de esta erupción se desconoce, pero un detallado análisis de registros de núcleos de hielo de la Antártida y Groenlandia apunta a una erupción en febrero de 1809 (± 4 meses) (Cole-Dai, 2010); esto está de acuerdo con otros estudios sobre registros de núcleos de hielo (Sigl et al., 2013, 2015). También se sugiere una posible erupción a finales de noviembre o principios de diciembre de 1808 (4 de diciembre de 1808 ± 7 días) al analizar diferentes observaciones de Sudamérica sobre fenómenos atmosféricos consistentes con los aerosoles estratosféricos (Guevara-Murua et al., 2014). Estas observaciones que recoge Guevara-Murua et al. (2014) presentan testimonios en Colombia y Lima en diciembre de 1808 como la presencia de una nube ligera, transparente y muy extendida, como el color del cielo que se tornó en blanquecino o en el del disco solar. Además, no solo se apreciaron estos fenómenos en Sudamérica, sino que en Londres se observó cambios en el color del disco solar a principios de abril de 1809 (Guevara-Murua et al., 2014). Del mismo modo, son muchos los estudios que reportan un descenso de temperaturas durante los años 1809 y 1810 en varias partes del mundo (Guevara-Murua et al., 2014; Raible et al., 2016; Timmreck et al., 2021).

La erupción en agosto de 1883 del Krakatoa pudo ser registrada, por primera vez, por instrumentos geofísicos. Multitud de barógrafos de todo el mundo registraron la onda de presión del aire en un periodo de 5 días y los mareógrafos también notaron los efectos de la erupción. También se observaron intensos atardeceres desde semanas hasta tres años después, así como el descenso de temperaturas que sigue a la erupción (Kondratyev, 1984).

La mayor erupción del siglo XX fue la del Katmai en Alaska, en junio de 1912 (Hildreth y Fierstein, 2012). En este caso, medidas de radiación solar, como las pirheliométricas, tomadas después de la erupción registraron valores por debajo de lo normal en diferentes partes del globo (Aldrich, 1944; Antón et al., 2014; Aparicio et al., 2020; Ohvri et al., 2009; Stothers, 2001).

La erupción del Monte Agung en marzo de 1963 en Bali fue la primera del siglo XX que se produjo cuando ya existían medidas de la temperatura de la estratosfera; quedó registrado el aumento de temperatura en esta capa (Kondratyev, 1984). Y la erupción del Monte Pinatubo en junio de 1991 en Luzón ha sido la última gran erupción volcánica, la cual se pudo estudiar en profundidad, así como su relación con el clima (Graft et al., 1993).

1.3. La señal de erupciones volcánicas en los datos recuperados

1.3.1. Erupción del volcán desconocido de 1809

De todos los datos recuperados en esta tesis, solo hay una serie que contiene el año 1809 y es la del Observatorio de San Fernando. Esta serie ha sido descrita en el capítulo 5 y abarca el periodo 1799-1813. Por tanto, se han analizado los datos de esta serie durante el año 1809 para hallar la posible huella del volcán de 1809 en estas medidas.

Como se ha visto en las subsecciones anteriores, los grandes volcanes provocan un descenso de la temperatura global del planeta como consecuencia de la dispersión de la radiación solar y de la absorción de la radiación térmica de la Tierra por parte de los aerosoles. De esta manera, los datos de temperatura para el periodo 1805-1809 se han representado en la Figura 6.1 para ambos termómetros utilizados en la serie SF1799-1813

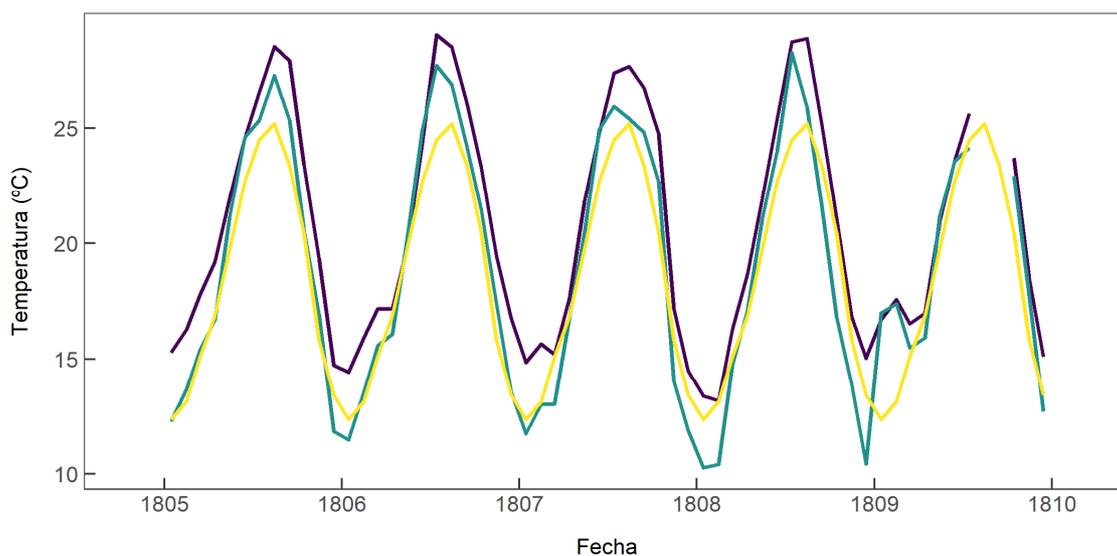


Figura 6.1. Temperatura media mensual del termómetro adjunto al barómetro (línea morada) y del aire (línea azul) de la serie SF1799-1813 para el periodo 1805-1809. La línea amarilla muestra año tipo mensual de la temperatura de la estación de San Fernando de la AEMET para el periodo 1997-2021.

(termómetro adjunto al barómetro (línea morada) y el del aire (línea azul)). Además, se ha representado el año tipo mensual de la temperatura de la estación de San Fernando de la AEMET para el periodo 1997-2021⁷ (línea amarilla). En el análisis de la temperatura de esta serie (SF1799-1813) efectuado en la sección 4.6 del Capítulo 5, se discutió acerca de los grandes valores alcanzados por la temperatura en enero y febrero del año 1809. Pero, como se aprecia en la Figura 6.1, la temperatura media del mes siguiente (marzo) sufrió una gran caída; además, la de abril se sitúa, incluso, por debajo de la media del año tipo mensual del periodo moderno. Los valores de la temperatura para los meses de mayo y junio de 1809 no parecen presentar anomalías grandes; sin embargo, se puede apreciar en la Figura 6.1 que el valor de la temperatura para el mes julio es menor que el del año tipo mensual. Por último, el único valor de temperatura en los siguientes meses que se encuentra por debajo del año tipo mensual es el de diciembre.

A continuación, en la Tabla 6.2 se presentan los cálculos de anomalías de temperatura de ambos termómetros (el adjunto al barómetro y el del aire) para el año 1809. Las anomalías se han calculado a partir de la media mensual de los años anteriores de las mismas series (1805-1808) y a partir del año tipo mensual de los datos modernos para el periodo 1997-2021. Respecto al termómetro adjunto al barómetro, los datos de temperatura están disponibles para el periodo completo (1799-1813), pero en 1805 se cambia de instrumento y de lugar y permanece así durante el periodo 1805-1809. Por tanto, para que el análisis sea lo más homogéneo posible, se ha decidido calcular las medias mensuales (para realizar el cálculo posterior de las anomalías) con el periodo 1805-1808 en el caso del termómetro adjunto al barómetro.

Tabla 6.2. Anomalías de temperatura del termómetro adjunto al barómetro y del termómetro del aire para el año 1809. Las anomalías se han calculado a partir de la media mensual de los años anteriores de las mismas series (1805-1808), y a partir del año tipo mensual de los datos modernos para el periodo 1997-2021.

	Media 1805-1808		Media 1997-2021	
	Termómetro barómetro	Termómetro aire	Termómetro barómetro	Termómetro aire
Enero	2.23	5.54	4.35	4.62
Febrero	2.32	4.72	4.44	4.26
Marzo	-0.07	0.80	1.43	0.38
Abril	-1.21	-0.77	0.10	-0.97
Mayo	-0.46	0.47	1.18	1.42
Junio	-1.22	-1.06	0.88	0.87
Julio	-2.28	-2.64	1.14	-0.32
Agosto	-	-	-	-
Septiembre	-	-	-	-
Octubre	0.55	2.54	3.27	2.50
Noviembre	0.31	2.22	2.70	1.95
Diciembre	-0.15	0.77	1.69	-0.72

⁷ Datos obtenidos de <https://datosclima.es/>.

Como se observa en la Tabla 6.2, cuando se realiza el cálculo de anomalías del año 1809 a partir de las medias mensuales del periodo 1805-1808 de las mismas series (es decir, la media mensual de este periodo para la temperatura del termómetro adjunto al barómetro y la del termómetro del aire por separado) se obtiene un mayor número de valores negativos y más bajos que cuando se calculan las anomalías mediante el año tipo mensual del periodo 1997-2021. En todos los casos se observa una gran diferencia entre la anomalía del mes de febrero y la del mes siguiente; es decir, hay un gran descenso medio de la temperatura de un mes con respecto al otro. Además, el valor de anomalía del mes de abril es uno de los más bajos en todos los casos. Aunque el mes de mayo presenta un valor de anomalía mayor que este último, en los meses de junio y julio vuelve a decaer. Cuando se calculan las anomalías tomando el periodo 1805-1808, el valor de anomalía negativa mayor se encuentra en el mes de julio.

Por otra parte, las erupciones volcánicas también afectan a la precipitación, siendo estas más escasas en la PI. Fischer et al. (2007) analizaron la precipitación posterior a 10 erupciones volcánicas para el periodo 1769-2000 y encontraron condiciones más secas en la PI en el invierno de la erupción y el posterior. Para poner esto de manifiesto, se ha representado en la Figura 6.2 la presión media diaria (línea negra) junto con los periodos en los que no se registró precipitación (barras grises) de la serie SF1799-1813 para el periodo 1805-1813.

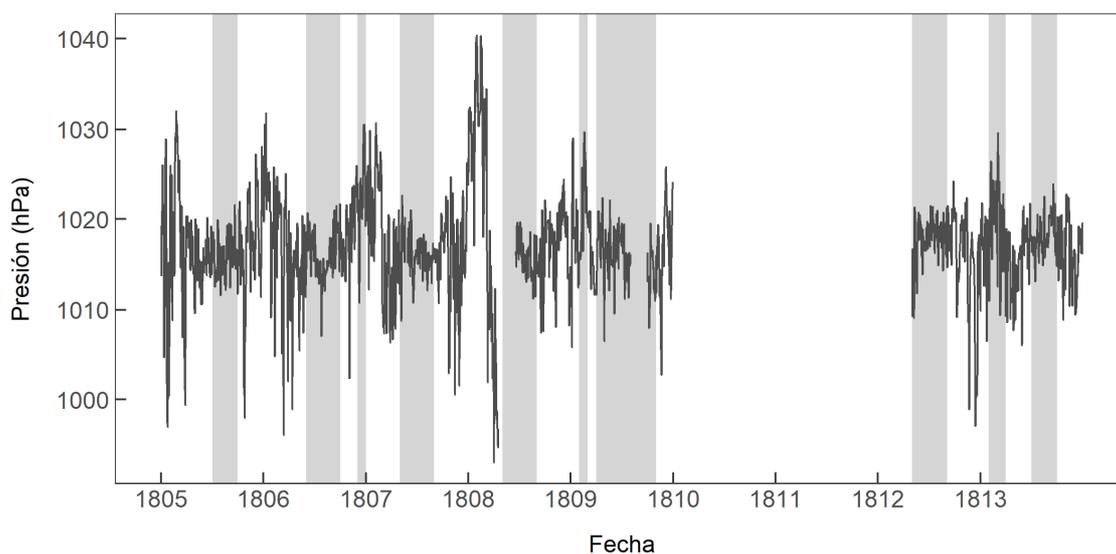


Figura 6.2. La línea negra representa la presión media diaria de los datos recuperados de San Fernando (SF1799-1913) para el periodo 1805-1813. Las barras grises indican los periodos en los que no se registró precipitación.

Como se aprecia en la Figura 6.2, en general no se registraba precipitación en los meses de verano y principios del otoño. Sin embargo, se puede observar cómo en el año 1809 hubo un periodo mayor en el que no se registró precipitación. De hecho, los únicos meses que anotaron valores de precipitación fueron enero, marzo, noviembre y diciembre. Los valores

de precipitación acumulada en los meses de noviembre y diciembre no sobrepasaron los 50 mm (39.09 y 36.96 mm, respectivamente), el mes de enero registró 82.82 mm y el mes de marzo 130.03 mm. Además, también se puede observar cómo los valores de la presión son más estables en el año 1809, no registrando bajadas de presión grandes.

En algunos de los testimonios de las grandes erupciones volcánicas recogidos en la sección 1.2. se habla, en algunas ocasiones, de neblinas, cambios de color en el disco solar o de atardeceres con colores más vivos. En los meses de verano, cuando las partículas de polvo en suspensión provenientes de África llega a los cielos del suroeste de España (Russo et al., 2020), se observan cielos calinosos y se pueden contemplar estos cambios de color mencionados en el cielo. Sin embargo, es más extraño encontrar estos cielos calinosos en los meses de invierno (Russo et al., 2020). En la descripción del estado del cielo de la serie de SF1799-1813 se ha encontrado el término “calinoso” en varios días de enero y febrero del año 1809. Concretamente, los días son: 29/01-02/02, 07-08/02, 27-28/02. También se ha encontrado un día “calinoso” en el mes de marzo, el día 21. Por tanto, todos estos resultados sugieren que los efectos de la erupción del volcán de 1809 se pudieron notar en San Fernando.

1.3.2. Erupción del Krakatoa

En la base de datos creada para las observaciones meteorológicas recuperadas de Extremadura (CliPastExtrem, v1.0), descrita en la sección 2 del Capítulo 5, se encuentran varias poblaciones en las que se registraron datos de temperatura para el periodo 1880-1889. En la Figura 6.3 se representan estas series de temperatura mensual.

Un descenso continuado de la temperatura mensual desde el año 1884 hasta el año 1885 para todas las estaciones representadas se aprecia en la Figura 6.3. Además, las estaciones

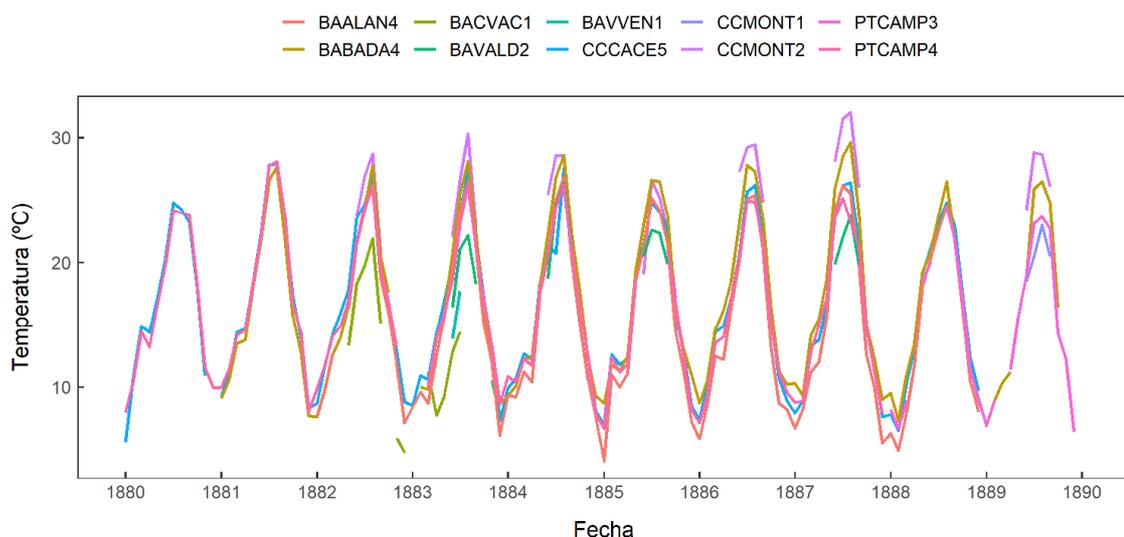


Figura 6.3. Temperatura media mensual registrada en distintas poblaciones de Extremadura para el periodo 1880-1889. Estos datos pertenecen a la base de datos CliPastExtrem (v1.0).

de BAALAN4, CACACE5 y PTCAMP4 registraron la temperatura media más baja durante el invierno de 1885 para ese periodo de años. Teniendo en cuenta que la erupción del Krakatoa se produjo a finales de agosto de 1883, estos cambios en la temperatura de las distintas estaciones representadas en la Figura 6.3 podrían ser debidos a esta erupción.

1.3.3. Erupción del Katmai

En la sección 3 del Capítulo 5 se mostró una serie de datos actinométricos (medida de la radiación solar) registrados en Cáceres para el periodo 1913-1920. En la Figura 5.4 se representan los datos diarios desestacionalizados actinométricos de Cáceres para el periodo 1913-1920. En esta figura se puede observar un pequeño descenso en los valores de principios de 1913 hasta 1914. Este descenso podría estar relacionado con la erupción del volcán Katmai en Alaska en junio de 1912.

2. El tiempo durante las guerras

2.1. Introducción

En ocasiones, el desarrollo de las guerras se ha visto influenciado por las inclemencias meteorológicas. Por ejemplo, Douglas y Lamb (1979) analizaron las condiciones meteorológicas que tuvieron lugar durante el desastre de la Armada Invencible en octubre de 1588 e identificaron una sucesión de anticiclones y ciclones que podrían ayudar a explicar el rumbo de la campaña y el naufragio de varias naves.

Otra de estas batallas que se vieron influenciadas por el tiempo fue la Batalla de Trafalgar, en la que la armada británica derrotó a la escuadra franco-española el 21 de octubre de 1805 frente a las costas del cabo Trafalgar (Barbate, Cádiz). Wheeler (1985) usó la información de 10 barcos involucrados en esta batalla, junto con observaciones de presión atmosférica de Inglaterra, para reconstruir las condiciones meteorológicas durante la batalla. Observó que predominaban las condiciones anticiclónicas; sin embargo, el día de la batalla expone que pudo haberse dado una DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos).

2.2. La borrasca durante la batalla de Trafalgar

Wheeler (1985) usó datos de presión de varias estaciones de Inglaterra al no encontrar datos cercanos al cabo de Trafalgar. Sin embargo, como se ha visto en secciones anteriores, en esta tesis se han recuperado datos de presión de San Fernando (situada alrededor de 35 km en línea recta desde el cabo Trafalgar) que incluyen el mes de octubre de 1805.

Se han calculado las anomalías de presión de la serie SF1799-1813 para el año 1805. Para ello, se ha tomado como referencia un periodo moderno; en concreto, se han usado

datos de Cádiz para el periodo 1955-2021⁸. Las anomalías se han representado en la Figura 6.4. Para ver en qué rango se sitúa la borrasca que acompañó a la batalla de Trafalgar, se ha calculado la media de la presión de Cádiz más 2 y 3 desviaciones estándar (líneas horizontales gris y negra, respectivamente).

Como se aprecia en la Figura 6.4, desde finales del mes de marzo de 1805 no se registró ninguna gran bajada de presión; fue la bajada de presión de octubre de 1805 la primera después de esta fecha. Esta anomalía de presión se encuentra por debajo del límite inferior del 99% de los datos. El día 21 comenzó a decaer la presión, y el mínimo se produjo el día 25. Durante la tercera semana de octubre de 1805 (en la que se encuentran los dos días anteriores señalados) se registró un valor de precipitación acumulada de 60.18 mm en la serie de SF1799-1813. La precipitación media mensual acumulada de San Fernando para el periodo 1997-2021 es de 60.8 mm, por lo que solo en esa tercera semana de octubre de 1805 se registró la precipitación media de ese mes.

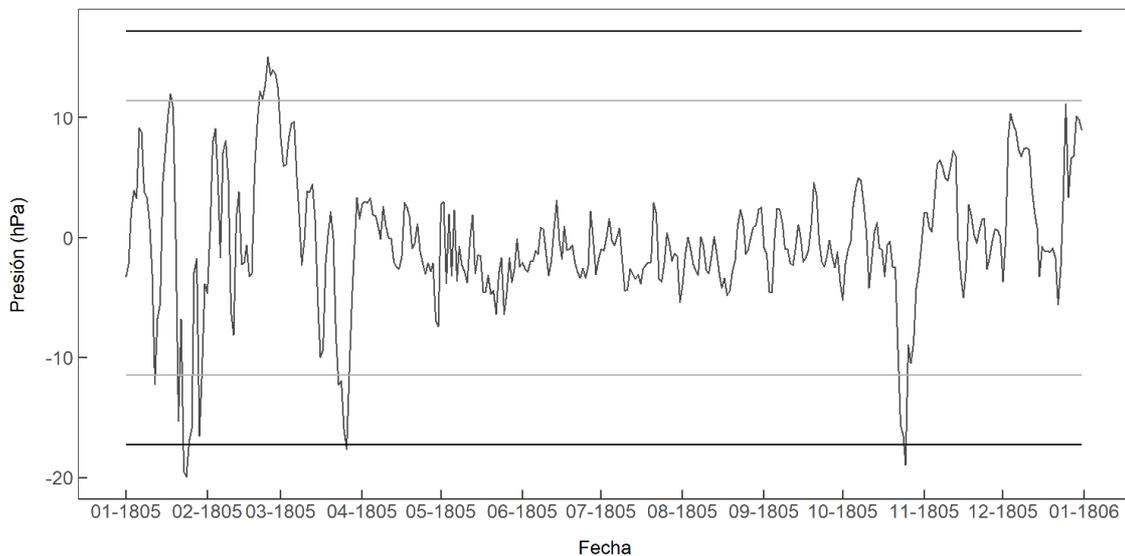


Figura 6.4. Anomalías de presión de la serie SF1799-1813 para el año 1805 calculadas a partir de la serie de Cádiz para el periodo 1955-1921. Las líneas horizontales gris y negra indican la anomalía media de la serie de Cádiz para el periodo 1955-1921 más 2 y 3 desviaciones estándar, respectivamente.

Como se ha dicho anteriormente, una de las explicaciones que propone Wheeler (1985) fue que el temporal que acompañó a la batalla de Trafalgar podría estar causado por una DANA. La DANA es un vórtice ciclónico aislado en la media y alta troposfera que se desarrolla a partir de vaguadas profundas en la corriente en chorro polar (Palmen y Newton, 1969). En los mapas isobáricos en los que se representa la altura geopotencial, la DANA se reconoce fácilmente al presentarse como un contorno cerrado aislado de la corriente en chorro (Nieto, 2005). La duración de la DANA es de unos pocos días, aunque en algunos casos puede llegar a durar más de tres semanas (Price y Vaughan, 1992). Aunque la DANA

⁸ Se pueden descargar en: <https://www.ecad.eu/>

es una situación muy puntual en el tiempo (es decir, de apenas unos días), la presión a nivel del mar y la altura geopotencial para 500 y 100 hPa se han representado a partir de los datos mensuales de reanálisis EKF400v2 desde septiembre a noviembre de 1805 (Figura 6.5). Como se puede apreciar en la Figura 6.5, la altura geopotencial para 500 y 100 hPa no presenta vaguadas ni aislamientos en ningún mes. Respecto a los datos de presión a nivel del mar, el anticiclón de las Azores está más debilitado en el mes de octubre, y se aprecia un valor más bajo de presión cerca del cabo de Trafalgar.

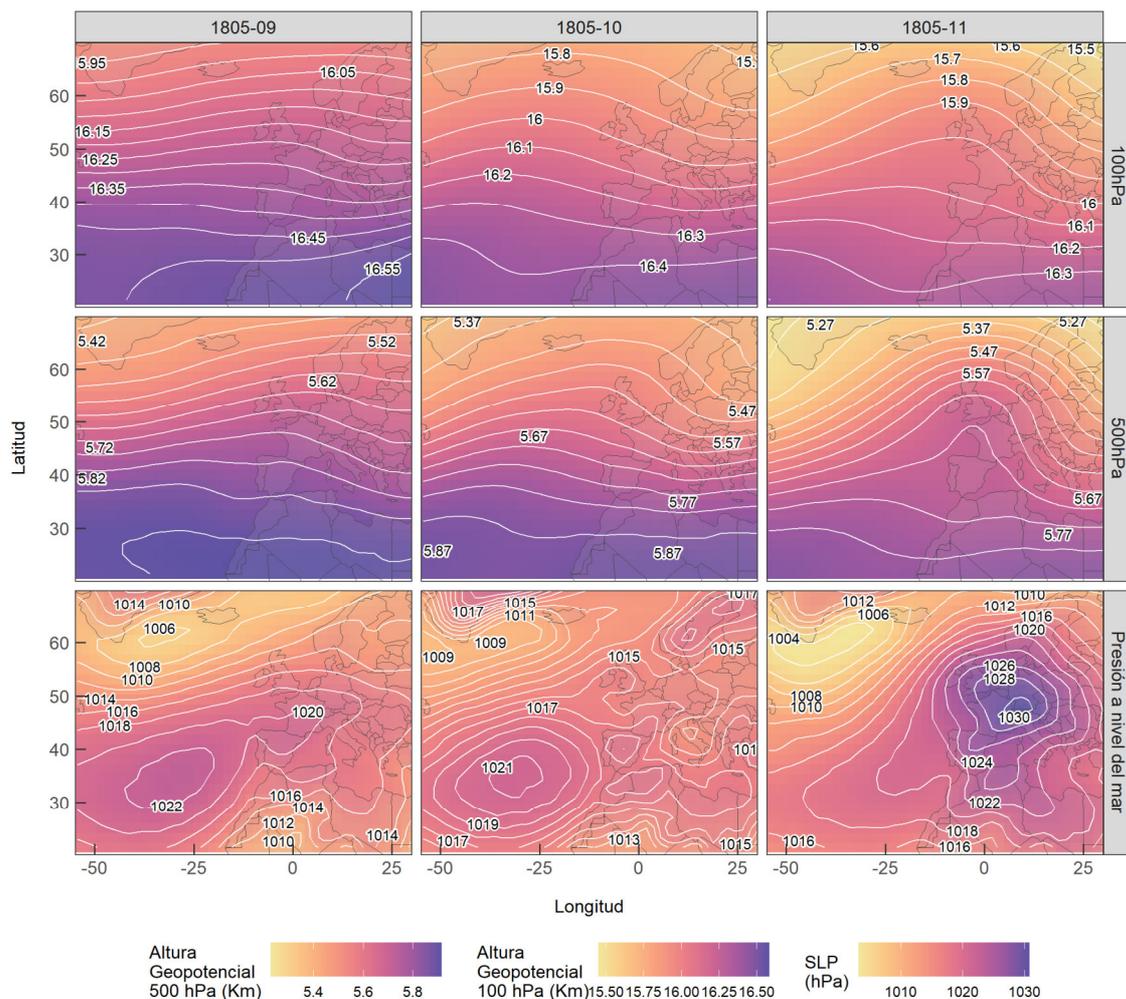


Figura 6.5. Presión a nivel del mar y altura geopotencial para 500 y 100 hPa de los datos de reanálisis EKF400v2 para los meses de septiembre a noviembre de 1805.

En resumen, es complicado analizar las condiciones meteorológicas que tuvieron lugar durante la batalla de Trafalgar con los datos recuperados y con los datos mensuales del reanálisis. Según las condiciones representadas en la Figura 6.5 no se trataría de una DANA al no presentarse como una vaguada o aislamiento en niveles altos, pero no puede afirmarse puesto que, como ya se ha dicho, la duración de una DANA es de unos pocos días y en la Figura 6.5 se representan valores mensuales. Respecto al análisis de los datos recuperados,

se aprecia una gran bajada de presión en días previos y durante la batalla, que llevó asociada una precipitación acumulada de 60.18 mm en solo una semana. Al no conocer el valor de la precipitación diaria, no se podría decir si ese valor estaría de acuerdo con una DANA o si se trató de una borrasca. En cualquier caso, el valor de 60.18 mm indica que fue un evento meteorológico fuera de lo común.

Conclusiones

Se resumen los principales resultados y conclusiones de la presente tesis doctoral:

- * Para la recuperación de las rogativas *pro-pluvia* se han consultado libros y diferentes periódicos y revistas (que se encuentran en formato digital). La ventaja de utilizar este tipo de fuentes documentales frente a los manuscritos eclesiásticos o los documentos municipales es la mejor preservación de la información en áreas rurales. En estas áreas, las fuentes documentales eclesiásticas y municipales no suelen estar disponibles o suelen estar perdidas. Además, los libros, periódicos y revistas cubren los siglos XIX y XX. Por tanto, estas fuentes documentales consultadas tienen un gran potencial para extender el conocimiento sobre las rogativas en la PI durante los siglos XIX y XX.
- * Se han recuperado 37 rogativas *pro-pluvia* celebradas en distintas poblaciones de Extremadura desde el año 1824 hasta el 1931. Finalmente, se han utilizado 21 rogativas celebradas en primavera para estudiar su relación con el índice NAO.
- * Se han analizado las anomalías mensuales del índice NAO para las 21 rogativas y los resultados muestran que el valor para el mes de febrero es estadísticamente significativo al 95% del nivel de confianza. Aunque los meses previos no son estadísticamente significativos, sí muestran anomalías negativas desde julio. Esto quiere decir que condiciones secas en el clima están presentes meses antes de la celebración de las rogativas.
- * Las rogativas *pro-pluvia* se corresponden con valores negativos del índice NAO en el mes n . Las rogativas *pro-pluvia* se asocian con valores positivos del índice NAO en el caso de los meses $n-1$, $n-2$ y $n-3$.
- * Los resultados del análisis de la relación entre las rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO en los meses $n-1$ y $n-2$ muestran que están correlacionadas, especialmente en el mes $n-2$.
- * Los resultados del análisis de la relación entre las rogativas *pro-pluvia* y el índice NAO indican que las rogativas *pro-pluvia* celebradas en primavera en Extremadura son un buen *proxy* para el índice NAO en el mes $n-2$.
- * Se han recuperado, en total, 145 rogativas *pro-pluvia* celebradas en distintas poblaciones de Extremadura entre los años 1504 y 1931. Estas rogativas forman parte de la base de datos INPRO.
- * Se ha rescatado el precio del trigo y de la cebada para las ciudades de Badajoz, Córdoba, Sevilla y Cádiz para el periodo 1792-1798. No se ha encontrado una clara relación entre el precio del cereal y la temperatura y precipitación de estas ciudades.
- * Se han recuperado 37 riadas catastróficas del río Guadiana desde el año 1500, ocurridas en el Puente de Palmas en Badajoz.

- ✱ Se han consultados distintos periódicos y libros para recuperar eventos de riadas, además de los documentos técnicos consultados. Los periódicos y los libros han sido fuentes documentales útiles para cubrir la falta de información de otras fuentes.
- ✱ La distribución mensual de las 37 riadas presenta ciclo estacional, repartidas en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.
- ✱ La distribución por décadas no es uniforme. Hay una clara diferencia entre el número de riadas en los siglos XVI-XVIII y el número de riadas en los siglos XIX-XX, siendo mayor el primero. La misma distribución se ha encontrado en otros estudios. La diferencia entre el número de riadas en unos siglos y en otros podría estar asociada, parcialmente, a la mala preservación de los documentos en los siglos XVI-XVIII y/o con cambios urbanos en la ciudad de Badajoz.
- ✱ Se han analizado las condiciones meteorológicas que han favorecido las riadas. La precipitación mensual y los valores mensuales de los índices NAO y EA han sido analizados para las 26 riadas catastróficas ocurridos en el periodo 1851-1985. Se ha encontrado un incremento (descenso) en la precipitación media (en el índice NAO medio) 3 meses antes de los grandes eventos de riadas. Los valores de los índices NAO y EA son, de media, negativos durante el mes en el que ocurren las riadas, así como 5 meses anteriores. Por tanto, parece que las grandes riadas ocurrieron cuando hay meses consecutivos de valores de precipitación más altos de los normal, conducido, en parte, por valores inusuales de los dos modos principales que gobiernan el clima de la PI (NAO y EA).
- ✱ Se han recuperado más de 750000 datos meteorológicos de 130 poblaciones de Extremadura distintas y de la localidad portuguesa de Campo Maior. El dato más antiguo se corresponde con el año 1826 y el más moderno con el año 1955. Se ha construido una base de datos llamada CliPastExtrem (v1.0) con estos datos.
- ✱ En varias series meteorológicas que pertenecen a la base de datos CliPastExtrem (v1.0) se aprecia un descenso en la temperatura para los años 1884 y 1885, que podría estar causado por la erupción del volcán Krakatoa en 1883.
- ✱ Se ha recuperado y digitalizado una serie datos actinométricos y de nubosidad registrada en Cáceres durante el periodo 1913-1920.
- ✱ La tendencia de la serie actinométrica se ha analizado para el periodo 1913-1920 y se ha encontrado un descenso estadísticamente significativo al 95% del nivel de confianza de (-0.16 ± 0.03) °C/año. Bajo condiciones de cielo claro (sin nubosidad), el valor de la pendiente es (-0.26 ± 0.04) °C/año, también estadísticamente significativa al 95% del nivel de confianza.
- ✱ Las tendencias de la serie actinométrica se han analizado por estaciones para el periodo 1913-1920. Las pendientes para las estaciones de verano, primavera y

otoño son negativas y estadísticamente significativas al 95% del nivel de confianza, tanto sin discriminación por nubosidad como para cielos claros.

- * La radiación solar que llega al suelo sufrió un descenso en la segunda década del siglo XX en Cáceres, siendo más evidente para los días con cielos claros. Este descenso está de acuerdo con lo observado en los análisis de tendencias a largo plazo de los datos de radiación solar en numerosos sitios de Europa entre finales del siglo XIX y principios del XX.
- * Se aprecia un descenso en los datos actinométricos de Cáceres para los años 1913 y 1914, que podría estar causado por la erupción del volcán Katmai en 1912.
- * Se ha recuperado una serie meteorológica registrada en San Fernando (Cádiz) para el periodo 1799-1813.
- * La dirección del viento predominante en San Fernando para el periodo 1799-1813 es SW. Respecto a los datos de estado del cielo, el 56.23% pertenece a “cielo claro”. La fuerza del viento predominante es “fresco” (6 en la escala de Beaufort).
- * En los años 1812 y 1813 se registraron los valores más altos de precipitación en San Fernando para el periodo 1799-1813.
- * Se aprecia un descenso de la temperatura y una precipitación más escasa en el año 1809 de la serie de San Fernando, que podría estar causado por la erupción del volcán de 1809.
- * Las anomalías de presión de los datos de San Fernando muestran que la anomalía de la borrasca que acompañó a la batalla de Trafalgar se encuentra por debajo del límite inferior del 99% de los datos. Por tanto, se trataría de un evento meteorológico fuera de lo común.
- * Se ha recuperado una serie meteorológica registrada en Almada (Portugal) para el periodo 1788-1813.

En trabajos futuros:

- * Se completará la digitalización del precio del trigo y de la cebada para distintas poblaciones del suroeste de la PI y se profundizará en el análisis de la relación entre estos y el clima.

Bibliografía

- Alcoforado, M. J., Nunes, M. de F., Garcia, J. C. y Taborda, J. P. (2000). Temperature and precipitation reconstruction in southern Portugal during the late Maunder Minimum (AD 1675-1715). *Holocene*, 10(3), 333-340. DOI: 10.1191/095968300674442959
- Alcoforado, M. J., Silva, L. P., Amorim, I., Fragoso, M. y Garcia, J. C. (2021). Historical floods of the Douro River in Porto, Portugal (1727-1799). *Climatic Change*, 165(17), 1-20. DOI: 10.1007/s10584-021-03039-7
- Alcoforado, M. J., Vaquero, J. M., Trigo, R. M. y Taborda, J. P. (2012). Early Portuguese meteorological measurements (18th century). *Climate of the Past*, 8, 353-371. DOI: 10.5194/cp-8-353-2012
- Aldrich, L. B. (1944). Smithsonian pyrheliometry and the andean volcanic eruptions of April 1932. *Smithsonian Miscellaneous Collections*, 104(6), 9.
- Allan, R., Brohan, P., Compo, G. P., Stone, R., Luterbacher, J. y Brönnimann, S. (2011). The international atmospheric circulation reconstructions over the earth (ACRE) initiative. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(11), 1421-1425. DOI: 10.1175/2011BAMS3218.1
- Allan, R., Endfield, G., Damodaran, V., Adamson, G., Hannaford, M., Carroll, F., Macdonald, N., Groom, N., Jones, J., ... Bliuc, A. M. (2016). Toward integrated historical climate research: the example of Atmospheric Circulation Reconstructions over the Earth. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(2), 164-174. DOI: 10.1002/wcc.379
- Allen, R. C. (2001). The great divergence in European wages and prices from the middle ages to the First World War. *Explorations in Economic History*, 38(4), 411-447. DOI: 10.1006/exeh.2001.0775
- Anduaga Egaña, A. (2012). *Meteorología, ideología y sociedad en la España contemporánea*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- Antón, M., Román, R., Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J. y Vaquero, J. M. (2017). Variability analysis of the reconstructed daily global solar radiation under all-sky and cloud-free conditions in Madrid during the period 1887–1950. *Atmospheric Research*, 191, 94-100. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.03.013
- Antón, M., Vaquero, J. M. y Aparicio, A. J. P. (2014). The controversial early brightening in the first half of 20th century: A contribution from pyrheliometer measurements in Madrid (Spain). *Global and Planetary Change*, 115, 71-75. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.01.013
- Aparicio, A. J. P., Antón, M., Gallego, M. C., Sanchez-Lorenzo, A. y Vaquero, J. M. (2019). Re-evaluation of trends in atmospheric column transparency from pyrheliometer measurements in Madrid (1910–1929). *Atmospheric Research*, 217, 165-171. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.11.003

- Aparicio, A. J. P., Gallego, M. C., Antón, M. y Vaquero, J. M. (2020). Relationship between solar activity and direct solar irradiance in Madrid (1910–1929). *Atmospheric Research*, 235(March 2019), 104766. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.104766
- Ashcroft, L., Coll, J. R., Gilabert, A., Domonkos, P., Brunet, M., Aguilar, E., Castella, M., Sigro, J., Harris, I., ... Jones, P. (2018). A rescued dataset of sub-daily meteorological observations for Europe and the southern Mediterranean region, 1877-2012. *Earth System Science Data*, 10(3), 1613-1635. DOI: 10.5194/essd-10-1613-2018
- Badescu, V., Rotar, N., Dumitrescu, A., Oprea, C. y Paulescu, M. (2023). Solar global irradiance from actinometric degree data for Montsouris (Paris) 1873–1877. *Theoretical and Applied Climatology*, 153, 539–559. DOI: 10.1007/s00704-023-04485-2
- Balasch, J. C., Pino, D., Ruiz-Bellet, J. L., Tuset, J., Barriendos, M., Castelltort, X. y Peña, J. C. (2019). The extreme floods in the Ebro River basin since 1600 CE. *Science of the Total Environment*, 646, 645-660. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.325
- Barnston, A. G. y Livezey, R. E. (1987). Classification, Seasonality and Persistence of Low-Frequency Atmospheric Circulation Patterns. *Monthly Weather Review*, 115(6), 1083-1126. DOI: 10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2
- Barriendos, M. (1994). *El clima histórico de Catalunya. Aproximación a sus características generales (ss. XV-XIX)*. Universidate de Barcelona.
- Barriendos, M. (1997). Climatic variations in the Iberian Peninsula during the late Maunder minimum (AD 1675-1715): An analysis of data from rogation ceremonies. *The Holocene*, 7(1), 105-111. DOI: 10.1177/095968369700700110
- Barriendos, M., Gómez, B. y Peña, J. C. (1997). Series meteorológicas instrumentales antiguas de Madrid y Barcelona (1780-1860). Características documentales y de observación. En J. Martín-Vide (Ed.), *Avances en climatología histórica en España*. (pp. 47-62). Oikos-Tau.
- Barriendos, M., Martín-Vide, J., Peña, J. C. y Rodríguez, R. (2002). Daily Meteorological Observations in Cádiz - San Fernando. Analysis of the Documentary Sources and the Instrumental Data Content (1786-1996). *Climatic Change*, 53, 151-170. DOI: 10.1023/A:1014991430122
- Barriendos, M. y Rodrigo, F. S. (2006). Study of historical flood events on Spanish rivers using documentary data. *Hydrological Sciences Journal*, 51(5), 765-783. DOI: 10.1623/hysj.51.5.765
- Barriendos, M., Ruiz-Bellet, J. L., Tuset, J., Mazon, J., Balasch, J. C., Pino, D. y Ayala, J. L. (2014). The «Prediflood» database of historical floods in Catalonia (NE Iberian Peninsula) AD 1035-2013, and its potential applications in flood analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 4807-4823. DOI: 10.5194/hess-18-4807-2014
- Bastos, A., Janssens, I. A., Gouveia, C. M., Trigo, R. M., Ciais, P., Chevallier, F., Peñuelas,

- J., Rödenbeck, C., Piao, S., ... Running, S. W. (2016). European land CO₂ sink influenced by NAO and East-Atlantic Pattern coupling. *Nature Communications*, 7(10315), 1-9. DOI: 10.1038/ncomms10315
- Bauernfeind, W. y Woitek, U. (1999). The influence of climatic change on price fluctuations in Germany during the 16th century price revolution. En *Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and Its Social Dimension* (pp. 303-321). Springer. DOI: 10.1007/978-94-015-9259-8_11
- Benito, G., Díez-Herrero, A. y Fernández de Villalta, M. (2003). Magnitude and frequency of flooding in the Tagus basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 58, 171-192. DOI: 10.1023/A:1023417102053
- Besson, M. L. (1927). *Sur l'actinomètre d'Arago*. Annal Serv Tech d'Hygiène de la Ville de Paris.
- Blöschl, G., Kiss, A., Viglione, A., Barriendos, M., Böhm, O., Brázdil, R., Coeur, D., Demarée, G., Llasat, M. C., ... Wetter, O. (2020). Current European flood-rich period exceptional compared with past 500 years. *Nature*, 583, 560-566. DOI: 10.1038/s41586-020-2478-3
- Brázdil, A., Flocas, A. A. y Sahsamanoglou, H. S. (1994). Fluctuation of sunshine duration in central and South-Eastern Europe. *International Journal of Climatology*, 14(9), 1017-1034. DOI: 10.1002/joc.3370140907
- Brázdil, R., Pfister, C., Wanner, H., Von Storch, H. y Luterbacher, J. (2005). Historical climatology in Europe - The state of the art. *Climatic Change*, 70, 363-430. DOI: 10.1007/s10584-005-5924-1
- Brázdil, R., Řezníčková, L., Valášek, H., Dolák, L. y Kotyza, O. (2016). Climatic effects and impacts of the 1815 eruption of Mount Tambora in the Czech Lands. *Climate of the Past*, 12(6), 1361-1374. DOI: 10.5194/cp-12-1361-2016
- Brázdil, R., Valášek, H. y Macková, J. (2003). Climate in the Czech lands during the 1780s in light of the daily weather records of parson Karel Bernard Hein of Hodonice (southwestern Moravia): Comparison of documentary and instrumental data. *Climatic Change*, 60(3), 297-327. DOI: 10.1023/A:1026045902062
- Breña Puyol, A. F. y Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y fundamentos de la hidrología superficial*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Brönnimann, S. (2015). *Climatic Changes Since 1700*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-19042-6
- Brönnimann, S., Brugnara, Y., Allan, R. J., Brunet, M., Compo, G. P., Crouthamel, R. I., Jones, P. D., Jourdain, S., Luterbacher, J., ... Wilkinson, C. W. (2018). A roadmap to climate data rescue services. *Geoscience Data Journal*, 5(1), 28-39. DOI: 10.1002/gdj3.56

- Brugnara, Y., Pfister, L., Villiger, L., Rohr, C., Alessandro Isotta, F. y Brönnimann, S. (2020). Early instrumental meteorological observations in Switzerland: 1708-1873. *Earth System Science Data*, 12(2), 1179-1190. DOI: 10.5194/essd-12-1179-2020
- Brunet, M. y Jones, P. (2011). Data rescue initiatives: Bringing historical climate data into the 21st century. *Climate Research*, 47, 29-40. DOI: 10.3354/cr00960
- Brunet, M., Saladié, O., Jones, P., Sigró, J., Aguilar, E., Moberg, A., Lister, D., Walther, A., Lopez, D. y Almarza, C. (2006). The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperatures series (SDATS) (1850-2003). *International Journal of Climatology*, 26(13), 1777-1802. DOI: 10.1002/joc.1338
- Brunetti, M., Lentini, G., Maugeri, M., Nanni, T., Auer, I., Böhm, R. y Schöner, W. (2009). Climate variability and change in the Greater Alpine Region over the last two centuries based on multi-variable analysis. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2197-2225. DOI: 10.1002/joc.1857
- Bullón, T. (2011). Relationships between precipitation and floods in the fluvial basins of Central Spain based on documentary sources from the end of the 16th century. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(8), 2215-2225. DOI: 10.5194/nhess-11-2215-2011
- Calvo, N., Gallego, D., García-Herrera, R., Gullón, A., Portela, M. J., Prieto, M. R. y Ribera, P. (2008). *El clima de Cádiz en la primera mitad del siglo XIX según los parte de la Vigía* (R. García-Herrera (ed.)). Servicio de Publicaciones de la Fundación Unicaja.
- Campbell, B. M. S. y Gráda, C. (2011). Harvest Shortfalls, Grain Prices, and Famines in Preindustrial England. *Journal of Economic History*, 71(4), 859-886. DOI: 10.1017/S0022050711002178
- Cardallaguet, M. (1997). *El Instituto Provincial de Segunda Enseñanza (ciento cincuenta años de historia educativa) (1839-1989)*. Instituto de Bachillerato El Brocense.
- Caso Amador, R. (2004). *El Santuario de Ntra. Sra. de los Remedios de Fregenal de la Sierra: Origen y Desarrollo Histórico*. Caja Rural de Almendralejo.
- Chafik, L., Nilsen, J. E. Ø. y Dangendorf, S. (2017). Impact of North Atlantic teleconnection patterns on northern European sea level. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3), 43. DOI: 10.3390/jmse5030043
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1988). *Applied Hidrology*. McGraw-Hill International Editions.
- Chuine, I., Yiou, P., Viovy, N., Seguin, B., Daux, V. y Le Roy Ladurie, E. (2004). Grape ripening as a past climate indicator. *Nature*, 432, 289-290. DOI: 10.1038/432289a
- Cole-Dai, J. (2010). Volcanoes and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(6), 824-839. DOI: 10.1002/wcc.76

- Comas-Bru, L. y Hernández, A. (2018). Reconciling North Atlantic climate modes: Revised monthly indices for the East Atlantic and the Scandinavian patterns beyond the 20th century. *Earth System Science Data*, 10(4), 2329-2344. DOI: 10.5194/essd-10-2329-2018
- Comas-Bru, L. y McDermott, F. (2014). Impacts of the EA and SCA patterns on the European twentieth century NAO-winter climate relationship. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(679), 354-363. DOI: 10.1002/qj.2158
- Cornes, R. C., Jones, P. D., Briffa, K. R. y Osborn, T. J. (2012). A daily series of mean sea-level pressure for Paris, 1670-2007. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1135-1150. DOI: 10.1002/joc.2349
- CRED. (2020). *Natural Disasters 2019: Now is the Time to Not Give up*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. URL: https://cred.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf
- Cruz Franco, P. A., Cortés Pérez, J. P. y Plata, A. R. (2018). *Veinte siglos de patrimonio de Extremadura en ocho puentes: documentación digital de las obras públicas*. Junta de Extremadura. Consejería de Economía e Infraestructuras y Universidad de Extremadura, Extremadura.
- CTEI. (1985). *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. Estudio de Inundaciones Históricas y mapa de riesgos potenciales en la Cuenca del Guadiana*. Comisión Técnica de Emergencias por Inundaciones y Dirección General de Obras Públicas (MOPT).
- Dankers, R. y Feyen, L. (2009). Flood hazard in Europe in an ensemble of regional climate scenarios. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(D16), 1-16. DOI: 10.1029/2008JD011523
- Díaz y Pérez, N. (1887). *España: sus monumentos y artes, su naturaleza e historia. Extremadura (Badajoz y Cáceres)*. Establecimiento Tipográfico-Editorial de Daniel Cortezo y Cia.
- Domínguez-Castro, F., Alcoforado, M. J., Bravo-Paredes, N., Garnier, E., Garza-Merodio, G., El Kenawy, A. M., Latorre, B., Noguera, I., Peña-Angulo, D., ... Vicente-Serrano, S. M. (2021). Dating historical droughts from religious ceremonies , the international pro pluvia rogation database. *Scientific Data*, 8(186), 1-8. DOI: 10.1038/s41597-021-00952-5
- Domínguez-Castro, F., de Miguel, J. C., Vaquero, J. M., Gallego, M. C. y García-Herrera, R. (2014). Climatic potential of Islamic Chronicles in Iberia: Extreme droughts (AD 711-1010). *The Holocene*, 24(3), 370-374. DOI: 10.1177/0959683613518591
- Domínguez-Castro, F. y García-Herrera, R. (2016). Documentary sources to investigate multidecadal variability of droughts. *Cuadernos de Investigacion Geografica*, 42(1), 13-27. DOI: 10.18172/cig.2936

- Domínguez-Castro, F., García-Herrera, R. y Vicente-Serrano, S. M. (2018). Wet and dry extremes in Quito (Ecuador) since the 17th century. *International Journal of Climatology*, 38(4), 2006-2014. DOI: 10.1002/joc.5312
- Domínguez-Castro, F., Ramos, A. M., García-Herrera, R. y Trigo, R. M. (2015). Iberian extreme precipitation 1855/1856: An analysis from early instrumental observations and documentary sources. *International Journal of Climatology*, 35(1), 142-153. DOI: 10.1002/joc.3973
- Domínguez-Castro, F., Ribera, P., García-Herrera, R., Vaquero, J. M., Barriendos, M., Cuadrat, J. M. y Moreno, J. M. (2012). Assessing extreme droughts in Spain during 1750-1850 from rogation ceremonies. *Climate of the Past*, 8(2), 705-722. DOI: 10.5194/cp-8-705-2012
- Domínguez-Castro, F., Santisteban, J. I., Barriendos, M. y Mediavilla, R. (2008). Reconstruction of drought episodes for central Spain from rogation ceremonies recorded at the Toledo Cathedral from 1506 to 1900: A methodological approach. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 230-242. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2008.06.002
- Domínguez-Castro, F., Trigo, R. M. y Vaquero, J. M. (2013). The first meteorological measurements in the Iberian Peninsula: Evaluating the storm of November 1724. *Climatic Change*, 118, 443-455. DOI: 10.1007/s10584-012-0628-9
- Domínguez-Castro, F., Vaquero, J. M., Gallego, M. C., Farrona, A. M. M., Antuña-Marrero, J. C., Cevallos, E. E., García-Herrera, R., de Guía, C., Mejía, R. D., ... Villacís, M. (2017). Early meteorological records from Latin- America and the Caribbean during the 18th and 19th centuries. *Scientific Data*, 4(170169), 1-10. DOI: 10.1038/sdata.2017.169
- Domínguez-Castro, F., Vaquero, J. M., Rodrigo, F. S., Farrona, A. M. M., Gallego, M. C., García-Herrera, R., Barriendos, M. y Sanchez-Lorenzo, A. (2014). Early Spanish meteorological records (1780-1850). *International Journal of Climatology*, 34(3), 593-603. DOI: 10.1002/joc.3709
- Domínguez-Castro, F., Vicente-Serrano, S. M., Tomás-Burguera, M., Peña-Gallardo, M., Beguería, S., El Kenawy, A., Luna, Y. y Morata, A. (2019). High spatial resolution climatology of drought events for Spain: 1961-2014. *International Journal of Climatology*, 39(13), 5046-5062. DOI: 10.1002/joc.6126
- Douglas, K. S. y Lamb, H. H. (1979). *Weather Observations and a Tentative Meteorological Analysis of the Period May to July 1588*. Climatic Research Unit Report No. 6a. University of East Anglia.
- Esper, J., Büntgen, U., Denzer, S., Krusic, P. J., Luterbacher, J., Schäfer, R., Schreg, R. y Werner, J. (2017). Environmental drivers of historical grain price variations in Europe. *Climate Research*, 72, 39-52. DOI: 10.3354/cr01449

- Farrona, A. M. M., Trigo, R. M., Gallego, M. C. y Vaquero, J. M. (2012). The meteorological observations of Bento Sanches Dorta, Rio de Janeiro, Brazil: 1781-1788. *Climatic Change*, *115*, 579-595. DOI: 10.1007/s10584-012-0467-8
- Fernández-Fernández, M. I., Gallego, M. C., Domínguez-Castro, F., Trigo, R. M., García, J. A., Vaquero, J. M., Moreno González, J. M. y Castillo Durán, J. (2014). The climate of Zafra from 1750 to 1840: History and description of weather observations. *Climatic Change*, *126*, 107-118. DOI: 10.1007/s10584-014-1201-5
- Fernández-Fernández, M. I., Gallego, M. C., Domínguez-Castro, F., Trigo, R. M. y Vaquero, J. M. (2015). The climate in Zafra from 1750 to 1840: precipitation. *Climatic Change*, *129*, 267-280. DOI: 10.1007/s10584-014-1315-9
- Fischer, E. A., Luterbacher, J., Zorita, E., Tett, S. F. B., Casty, C. y Wanner, H. (2007). European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium. *Geophysical Research Letters*, *34*(5), 1-6. DOI: 10.1029/2006GL027992
- Founda, D., Kalimeris, A. y Pierros, F. (2014). Multi annual variability and climatic signal analysis of sunshine duration at a large urban area of Mediterranean (Athens). *Urban Climate*, *10*(5), 815-830. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.09.008
- Fragoso, M., Carraça, M. G. y Alcoforado, M. J. (2018). Droughts in Portugal in the 18th century: A study based on newly found documentary data. *International Journal of Climatology*, *38*(15), 5522-5541. DOI: 10.1002/joc.5745
- Fragoso, M., Marques, D., Santos, J. A., Alcoforado, M. J., Amorim, I., Garcia, J. C., Silva, L. y Nunes, M. F. (2015). Climatic extremes in Portugal in the 1780s based on documentary and instrumental records. *Climate Research*, *66*, 141-159. DOI: 10.3354/cr01337
- Fragoso, M., Trigo, R. M., Zêzere, J. L. y Valente, M. A. (2010). The exceptional rainfall event in Lisbon on 18 February 2008. *Weather*, *65*(2), 31-35. DOI: 10.1002/wea.513
- Gallego, D., García-Herrera, R., Calvo, N. y Ribera, P. (2007). A new meteorological record for Cádiz (Spain) 1806-1852: Implications for climatic reconstructions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *112*(D12), 1-9. DOI: 10.1029/2007JD008517
- Gallego, M. C., García, J. A. y Vaquero, J. M. (2005). The NAO signal in daily rainfall series over the Iberian Peninsula. *Climate Research*, *29*, 103-109. DOI: 10.3354/cr029103
- Gao, C., Robock, A. y Ammann, C. (2008). Volcanic forcing of climate over the past 1500 years: An improved ice core-based index for climate models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *113*(D23), 1-15. DOI: 10.1029/2008JD010239
- García-Herrera, R., Barriopedro, D., Gallego, D., Mellado-Cano, J., Wheeler, D. y Wilkinson, C. (2018). Understanding weather and climate of the last 300 years from ships' logbooks. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *9*(6), 1-18. DOI:

- García-Herrera, R., Wheeler, D., Können, G. P., Koek, F. B., y Prieto, M. R.. (2003). *CLIWOC multilingual meteorological dictionary*. KNMI publication 205.
- García, R., Macias, A., Gallego, D.Hernández, E., Gimeno, L. y Ribera, P. (2003). Reconstruction of the Precipitation in the Canary Islands for the Period 1595–1836. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *84*, 1037–1040. DOI: 10.1175/BAMS-84-8-1037
- Garza Merodio, G. (2014). Caracterización de la Pequeña Edad de Hielo en el México central a través de fuentes documentales. *Investigaciones Geográficas*, *85*, 82-94. DOI: 10.14350/rig.41883
- Garza Merodio, G. G. (2007). Climatología histórica: Las ciudades mexicanas ante la sequía (siglos XVII al XIX). *Investigaciones Geograficas*, *63*, 77-92. URL: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112007000200006&lng=es&nrm=iso
- Gimeno, L., García, R., Trigo, R. M. y de la Torre, L. (2004). *La Oscilación del Atlántico Norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias*. Aica Ediciones.
- Gisler, O. (1985). Das Wetter zu Ende des 18. Jahrhunderts. *Geographica Helvetica*, *40*(4), 205-222. DOI: 10.5194/gh-40-205-1985
- Glaser, R., Riemann, D., Schönbein, J., Barriendos, M., Brázdil, R., Bertolin, C., Camuffo, D., Deutsch, M., Dobrovolný, P., ... Himmelsbach, I. (2010). The variability of European floods since AD 1500. *Climatic Change*, *101*, 235-256. DOI: 10.1007/s10584-010-9816-7
- González-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., Figueira, J. R., Vaquero, J. M., Trigo, R. M. y Gómez-Gesteira, M. (2021). Numerical reconstruction of historical extreme floods: The Guadiana event of 1876. *Journal of Hydrology*, *599*(126292), 1-12. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126292
- González González, F. J. (1992). *El Observatorio de San Fernando (1831-1924)* (M. de D. S. G. Técnica (ed.)). V.A. Impresores, S.A.
- González Rodríguez, A. (2019). *Badajoz cara al Guadiana. La Puerta y el Puente de Palmas (1332-2018)*. Fundación Caja Badajoz.
- Goodess, C. M. y Jones, P. D. (2002). Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall. *International Journal of Climatology*, *22*(13), 1593-1615. DOI: 10.1002/joc.810
- Gouveia, C., Trigo, R. M., DaCamara, C. C., Libonati, R. y Pereira, J. M. C. (2008). The North Atlantic Oscillation and European vegetation dynamics. *International Journal of Climatology*, *28*(14), 1835-1847. DOI: 10.1002/joc.1682

- Graft, H.-F., Kirchner, I., Robock, A. y Schult, I. (1993). Pinatubo eruption winter climate effects: model versus observations. *Climate Dynamics*, 9, 81-93. DOI: 10.1007/BF00210011
- Guevara-Murua, A., Williams, C. A., Hendy, E. J., Rust, A. C. y Cashman, K. V. (2014). Observations of a stratospheric aerosol veil from a tropical volcanic eruption in December 1808: Is this the Unknown ~1809 eruption? *Climate of the Past*, 10(5), 1707-1722. DOI: 10.5194/cp-10-1707-2014
- Guilmet, B. (1931). Observations actinométriques de l'Observatoire Central de l'Indochine a Phu-Liên. *Bull. Économ l'Indochine. Aric Elevage, Forêts*, 34, 1114B-1127B.
- Guiot, J., Nicault, A., Rathgeber, C., Edouard, J. L., Guibal, F., Pichard, G. y Till, C. (2005). Last-millennium summer-temperature variations in western Europe based on proxy data. *The Holocene*, 15(4), 489-500. DOI: 10.1191/0959683605hl819p
- Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Fotiadi, A., Pavlakis, K. G., Drakakis, E., Hatzidimitriou, D. y Vardavas, I. (2005). Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(10), 2847-2867. DOI: 10.5194/acp-5-2847-2005
- Hernández Tolosa, L. (1992). *Badajoz en el siglo XVIII. Libro de noticias de Don Leonardo Hernández Tolosa (edición facsímil)*. Real Academia de Extremadura de las Letras y las Artes.
- Herschel, J. F. W. (1844). *Tratado de astronomía*. Imprenta de la Sociedad Literaria y Tipográfica.
- Hildreth, W. y Fierstein, J. (2012). *The Novarupta-Katmai eruption of 1912-largest eruption of the twentieth century: Centennial perspectives*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1791. URL: <https://pubs.usgs.gov/pp/1791/>.
- Hoyt, D. V. (1979). Atmospheric transmission from the Smithsonian Astrophysical Observatory Pyrheliometric measurements from 1923 to 1957. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C8), 5018-5028. DOI: 10.1029/JC084iC08p05018
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), 676-679. DOI: 10.1126/science.269.5224.676
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press.
- Jerez, S. y Trigo, R. M. (2013). Time-scale and extent at which large-scale circulation modes determine the wind and solar potential in the Iberian Peninsula. *Environmental Research Letters*, 8(4), 1-11. DOI: 10.1088/1748-9326/8/4/044035
- Jones, P. D., Jonsson, T. y Wheeler, D. (1997). Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland.

- International Journal of Climatology*, 17(13), 1433-1450. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P
- Jones, P. D. y Mann, M. E. (2004). Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2), 1-42. DOI: 10.1029/2003RG000143
- Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B. E., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P. I., Pierros, F. y Nabat, P. (2018). Long-term series and trends in surface solar radiation in Athens, Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2395-2411. DOI: 10.5194/acp-18-2395-2018
- Kiss, A., Wilson, R. y Bariska, I. (2011). An experimental 392-year documentary-based multi-proxy (vine and grain) reconstruction of May-July temperatures for Kőszeg, West-Hungary. *International Journal of Biometeorology*, 55, 595-611. DOI: 10.1007/s00484-010-0367-4
- Kondratyev, K. (1984). Volcanoes and Climate. En *World Climate Research Programme* (N.º 166; World Climate Paper-54).
- Können, G. P. y Brandsma, T. (2005). Instrumental pressure observations from the end of the 17th century: Leiden (The Netherlands). *International Journal of Climatology*, 25(8), 1139-1145. DOI: 10.1002/joc.1192
- Lachat, D. y Wehrli, C. (2013). Dimming and brightening trends in direct solar irradiance from 1909 to 2010 over Davos, Switzerland: Proportions of aerosol and gaseous transmission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(8), 3285-3291. DOI: 10.1002/jgrd.50344
- Lafuente, A. y Sellés, M. (1988). *El Observatorio de Cádiz (1753-1831)*. Ministerio de Defensa, Instituto de Historia y Cultura Naval.
- Lamarche, V. C. (1975). Notes on Postglacial Climatic Changes and Possible Evidence for Long-Period Variations in the Solar Constant. En H. Zirin & J. Walter (Eds.), *The Solar Constant and the Earth's Atmosphere* (p. 169). URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1975scea.conf..169L>
- Lamb, H. H. (1977). *Climate: Present, Past and Future. Volume 2: Climatic History and the Future*. Routledge.
- Le Roy Ladurie, E., Daux, V. y Luterbacher, J. (2006). Le climat de Bourgogne et d'ailleurs XIVE-XXe siècle. *Histoire, économie & société*, 3, 421-436. DOI: 10.3917/hes.063.0421
- Ljungqvist, F. C., Seim, A., Tegel, W., Krusic, P. J., Baittinger, C., Belingard, C., Bernabei, M., Bonde, N., Borghaerts, P., ... Büntgen, U. (2022). Regional Patterns of Late Medieval and Early Modern European Building Activity Revealed by Felling Dates. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9(825751), 1-20. DOI: 10.3389/fevo.2021.825751
- Llasat-Botija, M., Cortès, M. y Llasat, M. C. (2018). FLOODUP. Una herramienta para

- aumentar la información y mejorar el conocimiento colectivo sobre eventos meteorológicos extremos. En J. P. Montávez Gómez, J. J. Gómez Navarro, J. M. López Romero, L. Palacios Peña, M. Turco, S. Jerez Rodríguez, R. Lorente, & P. Jiménez Guerrero (Eds.), *El clima: aire, agua, tierra y fuego* (pp. 645-654). Asociación Española de Climatología; Agencia Estatal de Meteorología. URL: <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9943>
- Llasat, M. C., Barriendos, M., Barrera, A. y Rigo, T. (2005). Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, *313*(1-2), 32-47. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.004
- Llasat, M. C., Barriendos, M., Rodríguez, R. y Martín Vide, J. (1999). Evolución de las inundaciones en Catalunya en los últimos quinientos años. *Ingeniería del agua*, *6*(4), 353-362. DOI: 10.4995/ia.1999.2796
- López-Moreno, J. I. y Vicente-Serrano, S. M. (2008). Positive and negative phases of the wintertime North Atlantic Oscillation and drought occurrence over Europe: A multitemporal-scale approach. *Journal of Climate*, *21*(6), 1220-1243. DOI: 10.1175/2007JCLI1739.1
- Macdonald, N. y Black, A. R. (2010). Reassessment of flood frequency using historical information for the River Ouse at York, UK (1200-2000). *Hydrological Sciences Journal*, *55*(7), 1152-1162. DOI: 10.1080/02626667.2010.508873
- Marié-Davy, M. H. (1875). Instructions pour les observations météorologiques. *Bull. Mens. l'Observatoire Mont.*, *IV*, 237-261.
- Matuszko, D. (2014). Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration. *International Journal of Climatology*, *34*(1), 228-234. DOI: 10.1002/joc.3681
- Medina, J. (2002). *El Plan Badajoz y el desarrollo económico de la provincia*. Tecnigraf Editores.
- Meier, N., Rutishauser, T., Pfister, C., Wanner, H. y Luterbacher, J. (2007). Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical Research Letters*, *34*(20), 1-6. DOI: 10.1029/2007GL031381
- Montero-Martín, J., Antón, M., Vaquero, J. M., Neto, J. y Sanchez-Lorenzo, A. (2021). Early sunshine duration and cloud cover records in Coimbra (Portugal) for the period 1891-1950. *International Journal of Climatology*, *41*(10), 4977-4986. DOI: 10.1002/joc.7111
- Moore, G. W. K. y Renfrew, I. A. (2012). Cold European winters: Interplay between the NAO and the East Atlantic mode. *Atmospheric Science Letters*, *13*(1), 1-8. DOI: 10.1002/asl.356

- Moreno, F. M., Solís, I., Barriendos, M. y Tejedor, E. (2020). Correlations between historical climate data and incidents of common bunt in Spanish wheat, 1755-1801. *Historia Agraria*, 82, 67-97. DOI: 10.26882/histagrar.082c08m
- Moreno, J. M., Aguiló, E., Alonso, S., Cobelas, M. Á., Anadón, R., Ballester, F., Benito, G., Catalán, J., Castro, M. de, ... Zazo, C. (2005). *Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático*. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente.
- Mühlbauer, S., Costa, A. C. y Caetano, M. (2016). A spatiotemporal analysis of droughts and the influence of North Atlantic Oscillation in the Iberian Peninsula based on MODIS imagery. *Theoretical and Applied Climatology*, 124, 703-721. DOI: 10.1007/s00704-015-1451-9
- Neukom, R., Barboza, L. A., Erb, M. P., Shi, F., Emile-Geay, J., Evans, M. N., Franke, J., Kaufman, D. S., Lücke, L., ... von Gunten, L. (2019). Consistent multidecadal variability in global temperature reconstructions and simulations over the Common Era. *Nature Geoscience*, 12, 643-649. DOI: 10.1038/s41561-019-0400-0
- Newhall, C. G. y Self, S. (1982). The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research*, 87(C2), 1231-1238. DOI: 10.1029/jc087ic02p01231
- Nieto, R. (2005). *Validación climática del modelo conceptual de DANA*. Universidad de Vigo.
- Nordli, P. Ø., Lie, Ø., Nesje, A. y Dahl, S. O. (2003). Spring-summer temperature reconstruction in western Norway 1734-2003: A data-synthesis approach. *International Journal of Climatology*, 23(15), 1821-1841. DOI: 10.1002/joc.980
- Ohvriil, H., Teral, H., Neiman, L., Kannel, M., Unstare, M., Tee, M., Russak, V., Okulov, O., Joëveer, A., ... Laulainen, N. (2009). Global dimming and brightening versus atmospheric column transparency, Europe, 1906-2007. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(D10), 1-17. DOI: 10.1029/2008JD010644
- OMM. (2018). *Guía de prácticas climatológicas* (Vol. 100). Organización Meteorológica Mundial. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027
- Ortega, J. (2007). *Paleocreencias, avenidas recientes e hidroclimatología en la cuenca media y baja del río Guadiana*. Universidad Complutense de Madrid.
- Ortega, J. A. y Garzón, G. (2009). A contribution to improved flood magnitude estimation in base of palaeoflood record and climatic implications - Guadiana River (Iberian Peninsula). *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(1), 229-239. DOI: 10.5194/nhess-9-229-2009
- Palmen, E. y Newton, C. W. (1969). *Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation*. Academic Press.

- Pappert, D., Barriendos, M., Brugnara, Y., Imfeld, N., Jourdain, S., Przybylak, R., Rohr, C. y Brönnimann, S. (2022). Statistical reconstruction of daily temperature and sea-level pressure in Europe for the severe winter 1788/89. *Climate of the Past*, 18, 2545-2565. DOI: 10.5194/cp-18-2545-2022
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. y McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007
- Pfister, C. y Brázdil, R. (2006). Social vulnerability to climate in the «Little Ice Age»: An example from Central Europe in the early 1770s. *Climate of the Past*, 2(2), 115-129. DOI: 10.5194/cp-2-115-2006
- Piervitali, E. y Colacino, M. (2001). Evidence of drought in western Sicily during the period 1565-1915 from liturgical offices. *Climatic Change*, 49, 225-238. DOI: 10.1023/A:1010746612289
- Pozo-Vazquez, D., Santos-Alamillos, F. J., Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A. y Tovar-Pescador, J. (2011). The Impact of the NAO on the Solar and Wind Energy Resources in the Mediterranean Area. En S. M. Vicente-Serrano & R. M. Trigo (Eds.), *Hydrological, Socioeconomic and Ecological Impacts of the North Atlantic Oscillation in the Mediterranean Region* (Vol. 46, Número December 2015, pp. 213-231). Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-1372-7
- Price, J. D. y Vaughan, G. (1992). Statistical studies of cut-off-lows systems. *Annales Geophysicae*, 10, 96-102. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:124313770>
- Pujazón, C. (1899). *Resumen de las observaciones pluviométricas efectuadas en los años 1805 a 1899*. Instituto y Observatorio de Marina.
- Queralt, S., Hernández, E., Barriopedro, D., Gallego, D., Ribera, P. y Casanova, C. (2009). North Atlantic Oscillation influence and weather types associated with winter total and extreme precipitation events in Spain. *Atmospheric Research*, 94(4), 675-683. DOI: 10.1016/j.atmosres.2009.09.005
- Raible, C. C., Brönnimann, S., Auchmann, R., Brohan, P., Frölicher, T. L., Graf, H. F., Jones, P., Luterbacher, J., Muthers, S., ... Wegmann, M. (2016). Tambora 1815 as a test case for high impact volcanic eruptions: Earth system effects. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(4), 569-589. DOI: 10.1002/wcc.407
- Robock, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191-219. DOI: 10.1029/1998RG000054
- Rodrigo, F. S. (2002). Changes in climate variability and seasonal rainfall extremes: A case study from San Fernando (Spain), 1821-2000. *Theoretical and Applied Climatology*, 72, 193-207. DOI: 10.1007/s007040200020
- Rodrigo, F. S. (2012). Completing the early instrumental weather record from Cádiz

- (Southern Spain): New data from 1799 to 1803. *Climatic Change*, 111, 697-704. DOI: 10.1007/s10584-011-0174-x
- Rodrigo, F. S. (2019). Early meteorological data in southern Spain during the Dalton Minimum. *International Journal of Climatology*, 39(8), 3593-3607. DOI: 10.1002/joc.6041
- Rodrigo, F. S. y Barriendos, M. (2008). Reconstruction of seasonal and annual rainfall variability in the Iberian peninsula (16th-20th centuries) from documentary data. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 243-257. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.004
- Rodrigo, F. S., Esteban-Parra, M. J., Pozo-Vázquez, D. y Castro-Díez, Y. (1999). A 500-year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology*, 19(11), 1233-1253. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199909)19:11<1233::AID-JOC413>3.0.CO;2-L
- Rodrigo, F. S., Esteban Parra, M. J. y Castro Diez, Y. (1995). Reconstruction of total annual rainfall in Andalusia (Southern Spain) during the 16th and 17th centuries from documentary sources. *Theoretical and Applied Climatology*, 52, 207-218. DOI: 10.1007/BF00864044
- Rodríguez-Puebla, C., Encinas, A. H., Nieto, S. y Garmendia, J. (1998). Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 18(3), 299-316. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(19980315)18:3<299::AID-JOC247>3.0.CO;2-L
- Rodríguez, R., Barriendos, M., Jones, P. D., Martín-Vide, J. y Peña, J. C. (2001). Long pressure series for Barcelona (Spain). Daily reconstruction and monthly homogenization. *International Journal of Climatology*, 21(13), 1693-1704. DOI: 10.1002/joc.696
- Rojas, R., Feyen, L. y Watkiss, P. (2013). Climate change and river floods in the European Union: Socio-economic consequences and the costs and benefits of adaptation. *Global Environmental Change*, 23(6), 1737-1751. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2013.08.006
- Russak, V. (2009). Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955-2007). *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(D10), 1-6. DOI: 10.1029/2008JD010613
- Russo, A., Sousa, P. M., Durão, R. M., Ramos, A. M., Salvador, P., Linares, C., Díaz, J. y Trigo, R. M. (2020). Saharan dust intrusions in the Iberian Peninsula: Predominant synoptic conditions. *Science of the Total Environment*, 717(137041), 1-11. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137041
- Sánchez-García, C., Schulte, L., Carvalho, F. y Peña, J. C. (2019). A 500-year flood history of the arid environments of southeastern Spain. The case of the Almanzora River. *Global and Planetary Change*, 181(102987), 1-15. DOI:

10.1016/j.gloplacha.2019.102987

- Sanchez-Lorenzo, A. y Wild, M. (2012). Decadal variations in estimated surface solar radiation over Switzerland since the late 19th century. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(18), 8635-8644. DOI: 10.5194/acp-12-8635-2012
- Sanchez-Lorenzo, A., Wild, M. y Trentmann, J. (2013). Validation and stability assessment of the monthly mean CM SAF surface solar radiation dataset over Europe against a homogenized surface dataset (1983-2005). *Remote Sensing of Environment*, 134, 355-366. DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.012
- Schröder, T., van't Hoff, J., López-Sáez, J. A., Viehberg, F., Melles, M. y Reicherter, K. (2018). Holocene climatic and environmental evolution on the southwestern Iberian Peninsula: A high-resolution multi-proxy study from Lake Medina (Cádiz, SW Spain). *Quaternary Science Reviews*, 198, 208-225. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.08.030
- Serrano Naharro, V. y Serrano González de Murillo, J. L. (1992). *Historia de Cabeza del Buey*. González González, S.
- Sigl, M., McConnell, J. R., Layman, L., Maselli, O., McGwire, K., Pasteris, D., Dahl-Jensen, D., Steffensen, J. P., Vinther, B., ... Kipfstuhl, S. (2013). A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(3), 1151-1169. DOI: 10.1029/2012JD018603
- Sigl, M., Winstrup, M., McConnell, J. R., Welten, K. C., Plunkett, G., Ludlow, F., Büntgen, U., Caffee, M., Chellman, N., ... Woodruff, T. E. (2015). Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 523, 543-549. DOI: 10.1038/nature14565
- Slonosky, V. C., Jones, P. D. y Davies, T. D. (2001). Instrumental pressure observations and atmospheric circulation from the 17th and 18th centuries: London and Paris. *International Journal of Climatology*, 21(3), 285-298. DOI: 10.1002/joc.611
- Söderberg, J. (2006). Grain Prices in Cairo and Europe in the Middle Ages. *Research in Economic History*, 24(06), 189-216. DOI: 10.1016/S0363-3268(06)24006-0
- Solano de Figueroa, J. (1929). *Historia eclesiástica de la ciudad y obispado de Badajoz*. Imprenta del Hospicio provincial.
- Souriau, A. y Yiou, P. (2001). Grape harvest dates for checking NAO paleoreconstructions. *Geophysical Research Letters*, 28(20), 3895-3898. DOI: 10.1029/2001GL012870
- Sousa, R. (1987). *Notas para una Climatología de Cádiz*. Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones.
- Stanhill, G. y Achiman, O. (2017). Early global radiation measurements: a review. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1665-1671. DOI: 10.1002/joc.4826

- Stanhill, G. y Cohen, S. (2001). Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P.M. Midgley (Eds.), *Agricultural and Forest Meteorology* (Vol. 107, Número 4). DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00241-0
- Stanhill, G. y Cohen, S. (2005). Solar radiation changes in the United States during the twentieth century: Evidence from sunshine duration measurements. *Journal of Climate*, 18(10), 1503-1512. DOI: 10.1175/JCLI3354.1
- Stanhill, G. y Cohen, S. (2008). Solar radiation changes in Japan during the 20th century: Evidence from sunshine duration measurements. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 86(1), 57-67. DOI: 10.2151/jmsj.86.57
- Steirou, E., Gerlitz, L., Apel, H. y Merz, B. (2017). Links between large-scale circulation patterns and streamflow in Central Europe: A review. *Journal of Hydrology*, 549, 484-500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.04.003
- Stothers, R. B. (2001). Major optical depth perturbations to the stratosphere from volcanic eruptions: Stellar extinction period, 1961-1978. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D3), 2993-3003. DOI: 10.1029/2000JD900652
- Thorarinsson, S. (1979). On the Damage Caused by Volcanic Eruptions with Special Reference to Tephra and Gases. En P. D. Sheets y D. K. Graysen (Eds.), *Volcanic Activity and Human Ecology* (pp. 125-159). Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-639120-6.50010_8
- Thordarson, T. y Self, S. (2003). Atmospheric and environmental effects of the 1783-1784 Laki eruption: A review and reassessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), AAC 7-1-AAC 7-29. DOI: 10.1029/2001jd002042
- Timmreck, C., Toohey, M., Zanchettin, D., Brönnimann, S., Lundstadt, E. y Wilson, R. (2021). The unidentified volcanic eruption of 1809: why it remains a climatic cold case. *Climate of the Past Discussions*, 1-39. DOI: 10.5194/cp-2021-4
- Trigo, R. M., Osborn, T. J. y Corte-Real, J. M. (2002). The North Atlantic Oscillation influence on Europe: Climate impacts and associated physical mechanisms. *Climate Research*, 20(1), 9-17. DOI: 10.3354/cr020009
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. y Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24(8), 925-944. DOI: 10.1002/joc.1048
- Trigo, R. M., Valente, M. A., Trigo, I. F., Miranda, P. M. A., Ramos, A. M., Paredes, D. y García-Herrera, R. (2008). The impact of North Atlantic wind and cyclone trends on

- European precipitation and significant wave height in the Atlantic. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 212-234. DOI: 10.1196/annals.1446.014
- Trigo, R. M., Vaquero, J. M., Alcoforado, M. J., Barriendos, M., Taborda, J., Garcia-Herrera, R. y Luterbacher, J. (2009). Iberia in 1816, the year without a summer. *International Journal of Climatology*, 29(1), 99-115. DOI: 10.1002/joc.1693
- Trigo, R. M., Vaquero, J. M. y Stothers, R. B. (2010). Witnessing the impact of the 1783-1784 Laki eruption in the Southern Hemisphere. *Climatic Change*, 99, 535-546. DOI: 10.1007/s10584-009-9676-1
- Valler, V., Franke, J., Brugnara, Y. y Brönnimann, S. (2021). An updated global atmospheric paleo-reanalysis covering the last 400 years. *Geoscience Data Journal*, 9, 89-107. DOI: 10.1002/gdj3.121
- Vaquero, J. M., Bravo-Paredes, N., Obregón, M. A., Carrasco, V. M. S., Valente, M. A., Trigo, R. M., Domínguez-Castro, F., Montero-Martín, J., Vaquero-Martínez, J., ... Gallego, M. C. (2022). Recovery of early meteorological records from Extremadura region (SW Iberia): The ‘CliPastExtrem’ (v1.0) database. *Geoscience Data Journal*, 9, 207-220. DOI: 10.1002/gdj3.131
- Vaquero, J. M. y Gallego, M. C. (2000). Una red meteorológica privada en el Badajoz decimonónico. *Revista Española de Física*, 14(4), 58-60.
- Vaquero, J. M., Gallego, M. C. y García, J. A. (2001). The First Known Instrumental Meteorological Observations in Extremadura (Spain): Badajoz (1830). En M. B. India y D. L. Bonillo (Eds.), *Detecting and Modelling Regional Climate Change* (pp. 43-52). Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-04313-4_5
- Vaquero, J. M., García-Herrera, R., Wheeler, D., Chenoweth, M. y Mock, C. J. (2008). A historical analog of 2005 Hurricane Vince. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(2), 191-202. DOI: 10.1175/BAMS-89-2-191
- Vicente-Serrano, S. M. y Cuadrat, J. M. (2007). North Atlantic oscillation control of droughts in north-east Spain: Evaluation since 1600 A.D. *Climatic Change*, 85, 357-379. DOI: 10.1007/s10584-007-9285-9
- Warren, J. F. (2013). *Climate Change and the Impact of Drought on Human Affairs and Human History in the Philippines, 1582 to 2009* (N.º 174; Working Paper (Asia Research Centre)). URL: <http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/50346>
- Wheeler, D. (1985). The Weather at the Battle of Trafalgar. *Weather*, 40(11), 338-346. DOI: 10.1002/j.1477-8696.1985.tb03726.x
- Wheeler, D. (1995). Early instrumental weather data from Cadiz: A study of late eighteenth and early nineteenth century records. *International Journal of Climatology*, 15(7), 801-810. DOI: 10.1002/joc.3370150707

- Wild, M. (2005). From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at Earth's Surface. *Science*, *308*(5723), 847-850. DOI: 10.1126/science.1103215
- Wild, M., Trüssel, B., Ohmura, A., Long, C. N., König-Langlo, G., Dutton, E. G. y Tsvetkov, A. (2009). Global dimming and brightening: An update beyond 2000. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *114*(D10), 1-14. DOI: 10.1029/2008JD011382
- Woollings, T., Hannachi, A., Hoskins, B. y Turner, A. (2010). A regime view of the North Atlantic oscillation and its response to anthropogenic forcing. *Journal of Climate*, *23*(6), 1291-1307. DOI: 10.1175/2009JCLI3087.1
- Zhang, D. D., Lee, H. F., Wang, C., Li, B., Pei, Q., Zhang, J. y An, Y. (2011). The causality analysis of climate change and large-scale human crisis. *Proceedings of the national academy of sciences*, *108*(42), 17296-17301. DOI: 10.1073/pnas.1104268108
- Zorita, E., Kharin, V. y von Storch, H. (1992). The Atmospheric Circulation and Sea Surface Temperature in the North Atlantic Area in Winter: Their Interaction and Relevance for Iberian Precipitation. *Journal of Climate*, *5*(10), 1097-1108. DOI: 10.1175/1520-0442(1992)005<1097:TACASS>2.0.CO;2
- Zubiate, L., McDermott, F., Sweeney, C. y O'Malley, M. (2017). Spatial variability in winter NAO-wind speed relationships in western Europe linked to concomitant states of the East Atlantic and Scandinavian patterns. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *143*(702), 552-562. DOI: 10.1002/qj.2943

Publicaciones

- Bravo-Paredes, N., Gallego, M. C., Antón, M., Núñez, M. y Vaquero, J. M. (2019). Analysis of actinometric measurements under all-sky and cloud-free conditions in Cáceres (Spain) for the period 1913–1920. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 71(1), 1-8. DOI: 10.1080/16000889.2019.1663597
- Bravo-Paredes, N., Gallego, M. C., Domínguez-Castro, F., García, J. A. y Vaquero, J. M. (2020). Pro-Pluvia Rogation Ceremonies in Extremadura (Spain): Are They A Good Proxy of Winter NAO? *Atmosphere*, 11(282), 1-15. DOI: 10.3390/atmos11030282
- Bravo-Paredes, N., Gallego, M. C., Vaquero, J. M. y Trigo, R. M. (2021). The catastrophic floods in the Guadiana River basin since 1500 CE. *Science of the Total Environment*, 797, 149141. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149141
- Domínguez-Castro, F., Alcoforado, M. J., Bravo-Paredes, N., Garnier, E., Garza-Merodio, G., El Kenawy, A. M., Latorre, B., Noguera, I., Peña-Angulo, D., ... Vicente-Serrano, S. M. (2021). Dating historical droughts from religious ceremonies , the international pro pluvia rogation database. *Scientific Data*, 8(186), 1-8. DOI: 10.1038/s41597-021-00952-5
- Vaquero, J. M., Bravo-Paredes, N., Obregón, M. A., Carrasco, V. M. S., Valente, M. A., Trigo, R. M., Domínguez-Castro, F., Montero-Martín, J., Vaquero-Martínez, J., ... Gallego, M. C. (2022). Recovery of early meteorological records from Extremadura region (SW Iberia): The ‘CliPastExtrem’ (v1.0) database. *Geoscience Data Journal*, 9, 207-220. DOI: 10.1002/gdj3.131
- Bravo-Paredes, N., Gallego, M. C., Trigo, R. M. y Vaquero, J. M. (2023). Earliest meteorological readings in San Fernando (Cádiz, Spain). *Climate of the Past*, 19(7), 1397-1408. DOI: 10.5194/cp-19-1397-2023.
- Bravo-Paredes, N., Gallego, M. C., Trigo, R. M. y Vaquero, J. M. Early meteorological observations in Almada (Portugal) for the period 1788-1813 by medical doctors. *Climate* [submitted].

Apéndice A: Tablas del Capítulo 5

Tabla A.1. Las 145 rogativas *pro-pluvia* celebradas en Extremadura pertenecientes a la base de datos INPRO (Domínguez-Castro et al., 2021). Para consultar la fuente documental, ver la Tabla A.2.

Año	Mes	Día	Población	Tipo de fuente	Fuente (ID)
1504			Fregenal de la Sierra	Primaria	1
1506	4	27	Fregenal de la Sierra	Primaria	1
1560	3		Feria	Primaria	1
1570	3		Feria	Primaria	1
1608			Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1626	5		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1635	5		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1641	4	24	Fregenal de la Sierra	Primaria	1
1641	5	3	Cáceres	Secundaria	4
1654	5		Cáceres	Secundaria	4
1673	10	20	Cáceres	Secundaria	4
1675	11	22	Cáceres	Secundaria	4
1678	11	7	Cáceres	Secundaria	4
1679	5	28	Cáceres	Secundaria	4
1680	3	23	Cáceres	Secundaria	4
1683	3	20	Cáceres	Secundaria	4
1683			Higuera la real	Secundaria	5
1685	5	3	Zafra*	Primaria	1
1689	3	14	Cáceres	Secundaria	4
1691	5	10	Cáceres	Secundaria	4
1694	3	8	Cáceres	Secundaria	4
1697	12	15	Cáceres	Secundaria	4
1698	5	9	Zafra*	Primaria	1
1698	5	11	Cáceres	Secundaria	4
1699	5	1	Cáceres	Secundaria	4
1700	4	18	Cáceres	Secundaria	4
1715	3	17	Zafra	Primaria	1
1718	5	3	Zafra	Primaria	1
1734	3	31	Zafra*	Primaria	1
1734			Cáceres	Secundaria	4
1734	5		Higuera la real	Secundaria	5
1734			Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1735	4		Higuera la real	Secundaria	5
1736	5		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1737	4		Fregenal de la Sierra	Primaria	1
1737			Zafra*	Primaria	1
1737	3	31	Cáceres	Secundaria	4
1738	4	24	Zafra	Primaria	1
1743	5		Zafra*	Primaria	1

1743			Cáceres	Secundaria	4
1749			Cáceres	Secundaria	4
1750			Barcarrota	Primaria	1
1750	4	12	Higuera la real	Secundaria	5
1750			Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1752	4	9	Zafra	Primaria	1
1752	4	16	Cáceres	Secundaria	4
1752	11	30	Cáceres	Secundaria	4
1752	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1753	4	23	Zafra	Primaria	1
1753	5	3	Higuera la real	Secundaria	5
1755	12	7	Cáceres	Secundaria	4
1756	4	16	Cáceres	Secundaria	4
1757			Cáceres	Secundaria	4
1760	4	23	Zafra*	Primaria	1
1760	9	22	La Zarza	Primaria	2
1760	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1763	4	26	Badajoz	Secundaria	3
1764	4	12	Zafra*	Primaria	1
1764	4	27	Badajoz	Secundaria	3
1764	11	8	Badajoz	Secundaria	3
1764	11	17	Cáceres	Secundaria	4
1764	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1765	4	18	Badajoz	Secundaria	3
1765	5	3	Badajoz	Secundaria	3
1765	11	17	Badajoz	Secundaria	3
1765	5	7	Cáceres	Secundaria	4
1767	11	15	Badajoz	Secundaria	3
1767	11	3	Cáceres	Secundaria	4
1768	4	28	Badajoz	Secundaria	3
1770	2	17	Badajoz	Secundaria	3
1770	4	26	Badajoz	Secundaria	3
1770	3	4	Cáceres	Secundaria	4
1772	5	12	Badajoz	Secundaria	3
1773	5	14	Zafra*	Primaria	1
1773	4	25	Badajoz	Secundaria	3
1773	4	29	Cáceres	Secundaria	4
1775	4	20	Zafra*	Primaria	1
1775	5	11	Badajoz	Secundaria	3
1775	4	26	Cáceres	Secundaria	4
1775	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1779	4	8	Badajoz	Secundaria	3
1779	10	21	Badajoz	Secundaria	3
1779	4	3	Cáceres	Secundaria	4

1780	4	20	Zafra	Primaria	1
1780	4	21	Badajoz	Secundaria	3
1781	3	10	Zafra*	Primaria	1
1781	11	25	Badajoz	Secundaria	3
1781	11	18	Cáceres	Secundaria	4
1782	4	30	Cáceres	Secundaria	4
1788	3	30	Zafra*	Primaria	1
1789	5	3	Zafra*	Primaria	1
1790	3	7	Cáceres	Secundaria	4
1791	3	27	Cáceres	Secundaria	4
1793	3	8	Cáceres	Secundaria	4
1793	10	13	Cáceres	Secundaria	4
1793	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1794	4	23	Cáceres	Secundaria	4
1798	2	2	Cáceres	Secundaria	4
1803	5	5	Zafra	Primaria	1
1804	10	8	Zafra*	Primaria	1
1808	4	27	Zafra*	Primaria	1
1817	4		Zafra*	Primaria	1
1824	4	27	Fregenal de la Sierra	Primaria	1
1824	5	2	Zafra*	Primaria	1
1835	3	24	Cáceres	Secundaria	16
1846	10		Olivenza	Secundaria	8
1849	3		Fregenal de la Sierra*	Primaria	1
1849	3	16	La Zarza	Primaria	2
1849	3		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1859	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1859	3		Olivenza	Secundaria	8
1867	5	8	Badajoz	Secundaria	14
1868			Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1868	3	22	Cabeza del Buey	Secundaria	20
1869	4	25	Talaván	Secundaria	16
1872			Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1876	12		Badajoz	Secundaria	21
1881	4	1	La Zarza	Primaria	2
1882	12		Olivenza	Secundaria	8
1891	5		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1896	4	10	Zafra*	Primaria	1
1896	5		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1896	4	9	Badajoz	Secundaria	9
1903	4		Cáceres	Secundaria	7
1905	4		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1905	3	30	Azuaga	Secundaria	12
1905	4	15	La Haba	Secundaria	12

1907	4	20	Zafra	Primaria	1
1907	3		Varias poblaciones	Secundaria	17
1917	12		Fregenal de la Sierra	Secundaria	6
1917	11	21	Badajoz	Secundaria	9
1917	12	7	Don Benito	Secundaria	10
1917	12	4	Alburquerque	Secundaria	10
1917	12	16	Hervás	Secundaria	19
1925	5	17	Reina	Secundaria	10
1925	5		Fuente del Arco	Secundaria	10
1925	5	6	Coria	Secundaria	15
1927	4	25	Cilleros	Secundaria	13
1927	4	30	Coria	Secundaria	18
1929	4	20	Magacela	Secundaria	11
1929	4		La Albuera	Secundaria	11
1929	4	22	Arroyo de San Serván	Secundaria	11
1929	4	9	Coria	Secundaria	18
1929	4	15	Alcántara	Secundaria	18
1931	3		Miajadas	Secundaria	18

Tabla A.2. ID de la fuente documental consultada en la Tabla A.1.

ID	Fuente documental
1	Archivo Histórico Municipal de Zafra; Archivo del Convento de Santa Clara de Zafra; Archivo Parroquia Nuestra Señora de la Candelaria de Zafra. (Zafra)
2	Libro de acuerdos y elecciones de alcalde de mayordomo y jurados de la cofradía de Nra. Sra. de la Soledad. (La Zarza)
3	Hernández Tolosa, L. (1992). Badajoz en el s.XVIII. Libro de Noticias de Don Leonardo Hernández Tolosa. Real Academia de Extremadura de las Letras y las Artes, Trujillo. ISBN: 9788460083344
4	Orti Belmonte, M. A. (1973). Historia del culto y del santuario de Nuestra Señora de la Montaña, patrona de Cáceres. Edit. Extremadura, Cáceres.
5	López Fuentes, J. A. (2009). Historia del Colegio de la Compañía de Jesús de la villa de Higuera la Real (Badajoz). Ayuntamiento de Higuera la Real, Higuera la Real.
6	Caso Amador, R. (2004). El santuario de Ntra. Sra. de los Remedios de Fregenal de la Sierra: origen y desarrollo histórico. Caja Rural de Almodralejo: Almodralejo, España. ISBN 84-609-0592-6.
7	Revista: Blanco y Negro
8	Núñez, H. Las crisis de subsistencias durante la primera mitad del siglo XIX en Olivenza. Revista de estudios extremeños, 2013, 64, 491–522. Núñez, H. Las crisis de subsistencias durante la segunda mitad del siglo XIX en Olivenza. Revista de estudios extremeños, 2014, 70, 831–870.
9	Periódico: La región extremeña: diario republicano
10	Periódico: Correo de la mañana
11	Periódico: Correo extremeño
12	Periódico: Nuevo diario de Badajoz: periódico político y de intereses generales
13	Periódico: Nuevo día: diario de la provincia de Cáceres
14	Periódico: Crónica de Badajoz: periódico de intereses morales y materiales, de literatura, artes, modas y anuncios
15	Periódico: La montaña: diario de Cáceres

16	Periódico: Boletín oficial de la provincia de Cáceres
17	Periódico: El adarve: periódico político, literario y de noticias
18	Periódico: Nuevo día: diario de la provincia de Cáceres
19	Periódico: El noticiero: diario de Cáceres
20	Serrano Naharro, V.; Serrano González de Murillo, J. L. (1992). Historia de Cabeza del Buey. Cabeza del Buey, Badajoz, España. ISBN 84-604-3637-3.
21	Revista: Revista Contemporánea

Apéndice B: Figuras del Capítulo 5

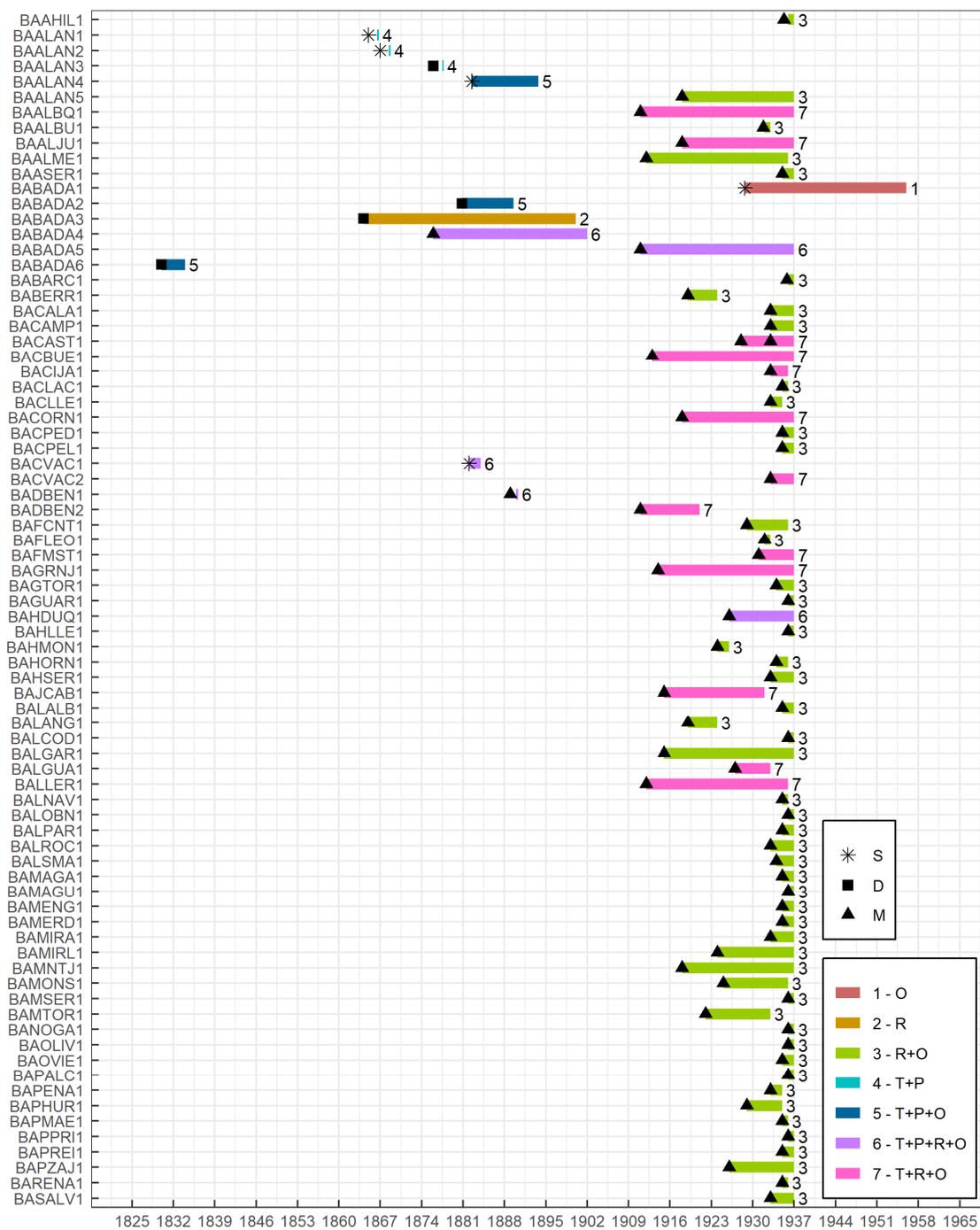


Figura B.1. Periodo de observación cubierto por cada estación. También se muestran las variables meteorológicas registradas en cada una y la resolución temporal, que se indica por S (subdiario), D (diario), M (mensual), Dc (décadas), Y (año). Las letras en la leyenda a color indican las variables meteorológicas registradas: temperatura (T), presión (P), lluvia (R), otros (O).

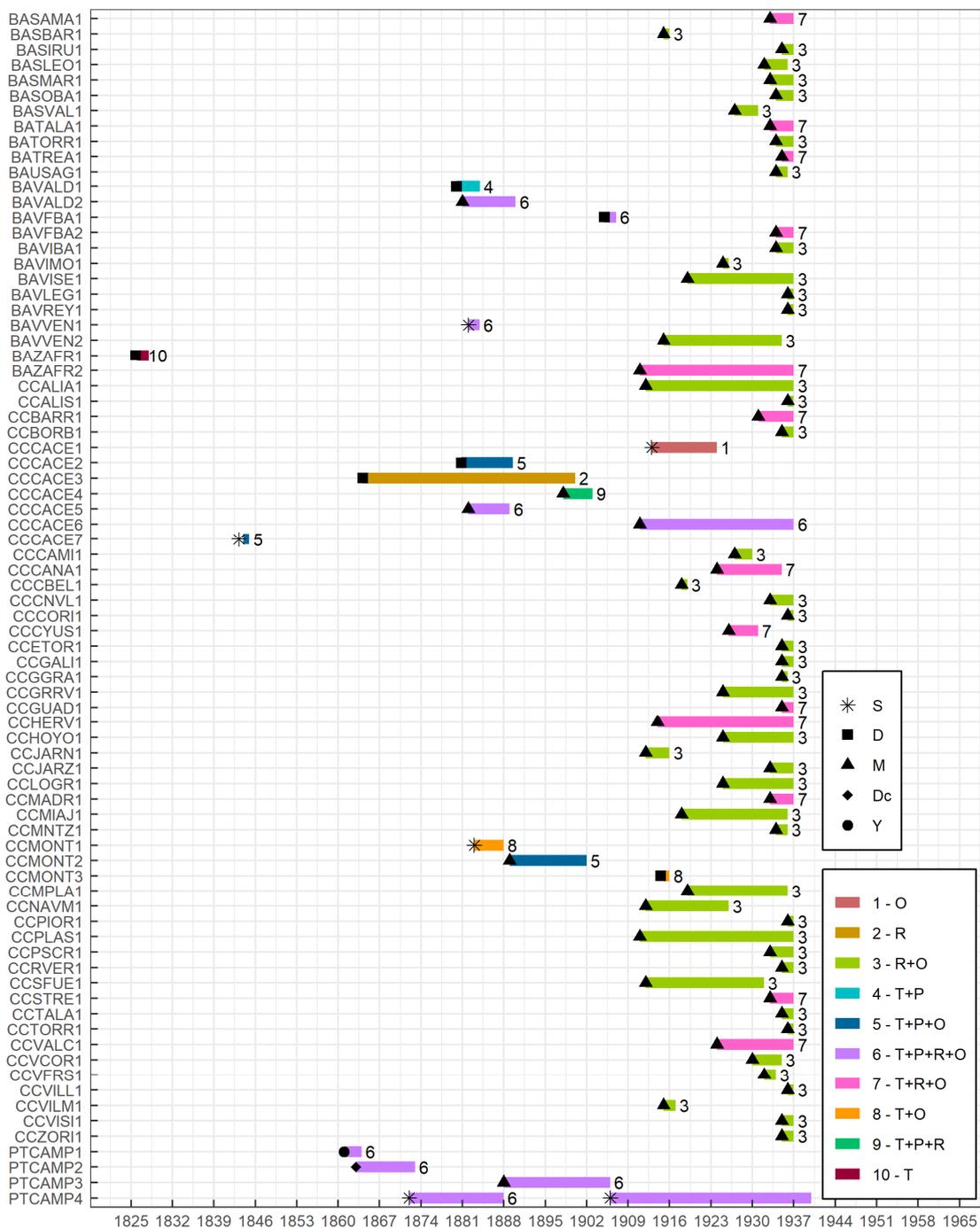


Figura B.1. Continuación.

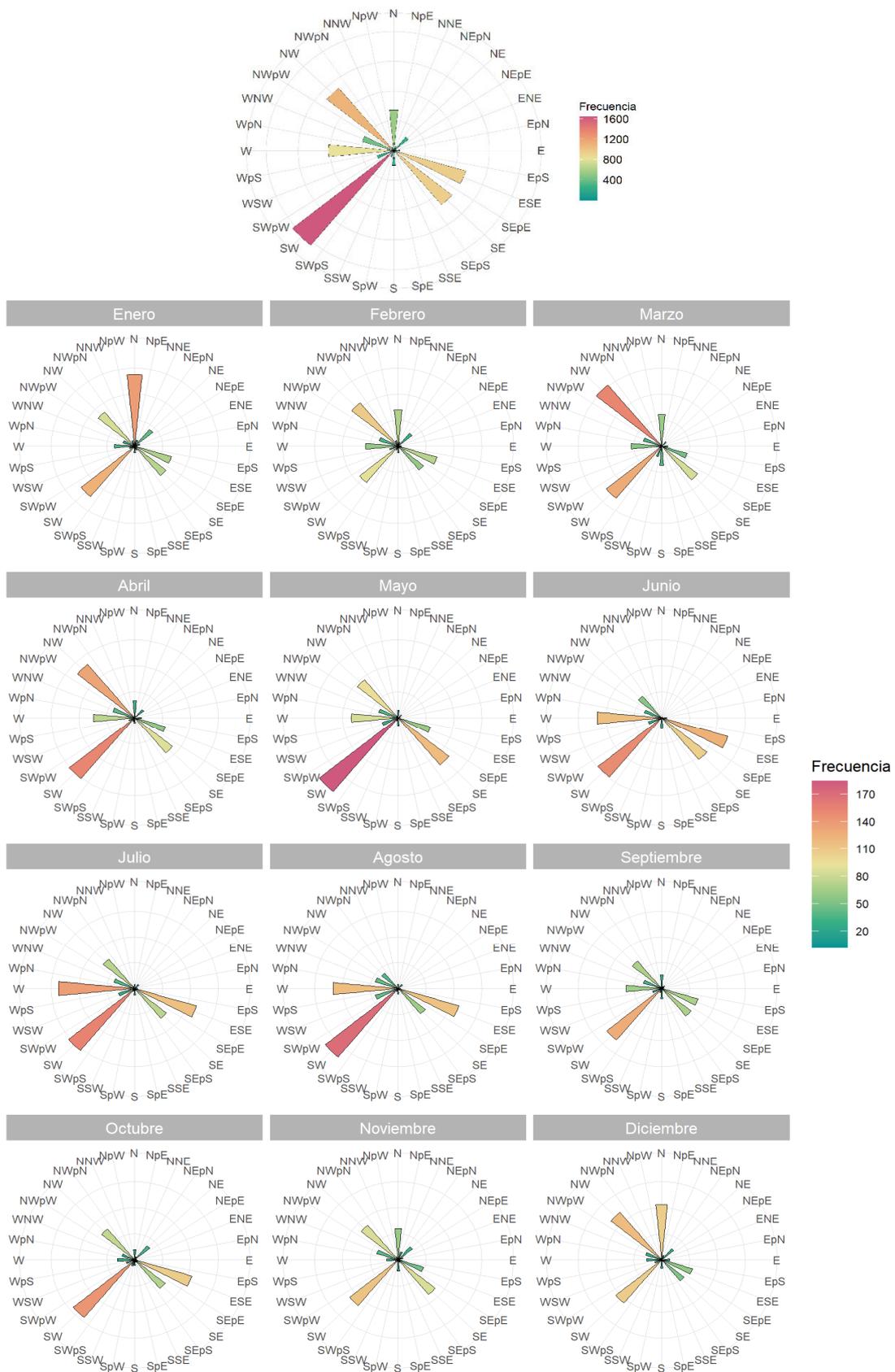


Figura B.2. Frecuencia de la dirección de los vientos de la serie recuperada SF1799-1813 representada por la rosa de los vientos para el periodo 1799-1813 para cada mes y en total (rosa de los vientos superior).