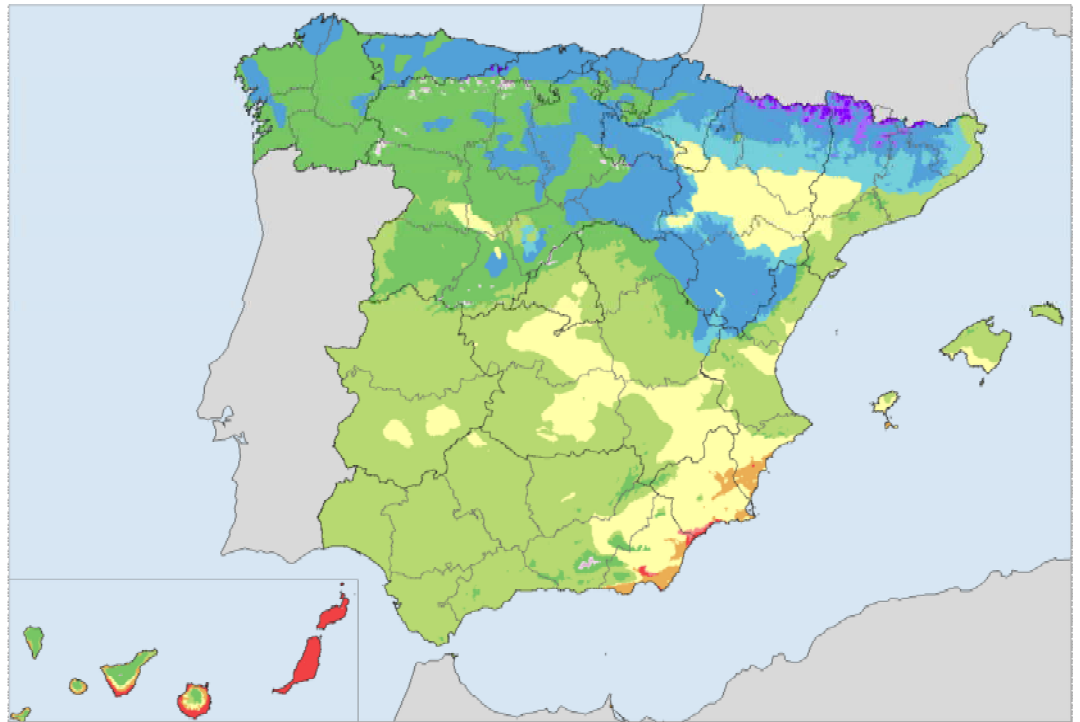


Evolución de los climas de Köppen en España en el periodo 1951-2020

Nota técnica 37 de AEMET



Andrés Chazarra Bernabé
Belinda Lorenzo Mariño
Ramiro Romero Fresneda
José Vicente Moreno García



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

AEMet
Agencia Estatal de Meteorología

EVOLUCIÓN DE LOS CLIMAS DE KÖPPEN EN ESPAÑA EN EL PERIODO 1951-2020

Nota técnica 37 de AEMET

Versión 1.1

Andrés CHAZARRA BERNABÉ, Belinda LORENZO MARIÑO, Ramiro ROMERO
FRESNEDA, José Vicente MORENO GARCÍA

*Área de Climatología y Aplicaciones Operativas
Agencia Estatal de Meteorología*

achazarrab@aemet.es, blorenzom@aemet.es, rromerof@aemet.es, jmorenog@aemet.es



Madrid, 2022

AUTORES

Andrés Chazarra Bernabé
Belinda Lorenzo Mariño
Ramiro Romero Fresneda
José Vicente Moreno García

Área de Climatología y Aplicaciones Operativas
AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA

PORTADA

Elaboración propia. La imagen central corresponde al mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger para el periodo 1951-2020, realizado siguiendo la metodología descrita en la presente publicación, a partir de las rejillas mensuales de temperatura y precipitación generadas en el Área de Climatología y Aplicaciones Operativas.

AGRADECIMIENTOS

A María Teresa Huarte Ituláin, por su colaboración en la revisión y validación de las rejillas de precipitación, a César Rodríguez Ballesteros, por su trabajo en el archivo de las rejillas, y a Peio Oriá Iriarte, por su detallada revisión de la publicación.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2022

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-22-011-4
<https://doi.org/10.31978/666-22-011-4>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>

Índice

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Introducción | 7 |
| 2 | Clasificación climática de Köppen-Geiger..... | 8 |
| 3 | Datos y metodología..... | 10 |
| 3.1 | Rejillas mensuales y anuales de temperatura y precipitación 1951-2020..... | 10 |
| 3.2 | Metodología..... | 12 |
| 4 | Resultados | 13 |
| 4.1 | Clasificación de Köppen-Geiger en los periodos de referencia de 30 años del periodo de estudio 1951-2020..... | 13 |
| 4.1.a | <i>Tipos principales de clima (primera letra).....</i> | <i>13</i> |
| 4.1.b | <i>Tipos de clima principales y secundarios (dos letras).....</i> | <i>15</i> |
| 4.1.c | <i>Tipos de clima (tres letras)</i> | <i>17</i> |
| 4.1.d | <i>Cambios observados en los tipos principales de clima en los diferentes periodos de referencia.....</i> | <i>19</i> |
| 4.2 | Evolución de los tipos de clima en ventanas móviles de 30 años..... | 21 |
| 4.2.a | <i>Península ibérica y Baleares</i> | <i>22</i> |
| 4.2.b | <i>Canarias.....</i> | <i>27</i> |
| 5 | Análisis de los resultados y conclusiones..... | 29 |
| 6 | Referencias | 33 |

Índice de figuras

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Zonas geográficas (en rojo) consideradas para la generación de las rejillas: la primera comprende el territorio peninsular español y Baleares y la segunda las islas Canarias..... | 11 |
| Figura 2. Mapa geográfico de la zona de estudio..... | 11 |
| Figura 3. Principales tipos de clima (primera letra) de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020..... | 14 |
| Figura 4. Tipos de clima (dos primeras letras) de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020..... | 16 |
| Figura 5. Tipos de clima de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020..... | 18 |
| Figura 6. Zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en cada periodo de referencia respecto del anterior..... | 19 |
| Figura 7. Zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en el último periodo de referencia (1991-2020) en comparación con los anteriores periodos de referencia..... | 20 |
| Figura 8. Porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando la primera (arriba) y las dos primeras letras (debajo) en los distintos periodos de referencia, para las dos zonas geográficas consideradas..... | 21 |
| Figura 9. Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años..... | 23 |
| Figura 10. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (dos letras) en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años..... | 25 |
| Figura 11. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (tres letras) en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años..... | 26 |
| Figura 12. Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años..... | 27 |
| Figura 13. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (dos letras) en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años..... | 28 |
| Figura 14. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (tres letras) en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años..... | 29 |
| Figura 15. Evolución de la temperatura media anual y su tendencia en las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020..... | 30 |
| Figura 16. Evolución de la precipitación anual media y su tendencia en las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020..... | 31 |

Índice de tablas

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Descripción de símbolos de los tipos de clima de Köppen y criterios utilizados para definirlos (adaptado de Peel et al., 2007 ^[18])..... | 9 |
| Tabla 2. Tendencias observadas para cada tipo de clima en la España peninsular y Baleares (izquierda) y Canarias (derecha) en el periodo de estudio, considerando medias móviles simples de 30 años. Se han representado en negrita las tendencias significativas al 5 % pero no al 1 %, y en negrita y cursiva las significativas al 1 %..... | 22 |

Abreviaturas

- **AEMET**: Agencia Estatal de Meteorología
- **GIS**: Geographic Information System
- **IM**: Instituto de Meteorología de Portugal
- **IPCC**: Intergovernmental Panel on Climate Change
- **SAGA**: System for Automated Geoscientific Analyses
- **WMO**: World Meteorological Organization

1 Introducción

Según Essenwanger, una clasificación climática es una agrupación de condiciones atmosféricas en localizaciones que muestran condiciones climáticas similares (tipos de clima), que están separadas por límites definidos que se aplican a uno o más elementos meteorológicos (Essenwanger, 2001)^[10]. Las clasificaciones climáticas permiten sintetizar y categorizar de forma relativamente sencilla las diferentes condiciones climáticas que podemos encontrar en cualquier lugar del planeta.

De entre las numerosas clasificaciones climáticas que existen, sin duda la más extendida es la clasificación de Köppen, especialmente la versión formulada en 1936, generalmente conocida como de Köppen-Geiger. A pesar del tiempo transcurrido desde su publicación, sigue actualmente vigente al resultar sencilla de aplicar y de interpretar, siendo además medioambientalmente consistente gracias a la buena correlación que existe entre los tipos de clima que define y las principales zonas de vegetación que se observan en la Tierra.

En las últimas décadas, la clasificación de Köppen-Geiger ha sido también utilizada con frecuencia en estudios de evaluación de impacto del cambio climático, con el objeto de estudiar tanto las variaciones experimentadas por los tipos de clima en el pasado como las que cabe esperar en el futuro en función de los distintos escenarios previstos.

En el presente trabajo se muestran y analizan las variaciones observadas en la extensión ocupada por cada uno de los diferentes tipos de clima de Köppen-Geiger en España en el periodo comprendido entre 1951 y 2020. Para ello, se ha aplicado el esquema de la clasificación a las rejillas mensuales de temperatura y precipitación de alta resolución recientemente generadas en el Área de Climatología y Aplicaciones Operativas, utilizando sistemas de información geográfica.

Los resultados ponen en evidencia una progresiva expansión de los climas áridos y un retroceso de los climas templados y fríos en España durante el periodo de estudio. Estos resultados sintetizan los efectos del calentamiento global observado en las últimas décadas en la distribución de los climas en nuestro territorio.

2 Clasificación climática de Köppen-Geiger

A pesar de haber transcurrido más de cien años desde que el climatólogo ruso-alemán Wladimir Köppen formulara la primera versión de su célebre clasificación climática, sigue siendo actualmente la clasificación más utilizada para delimitar y estudiar las zonas climáticas en todo el mundo (Kottek et al., 2006)^[17]. Su uso es habitual en libros y estudios climáticos del ámbito académico, así como en trabajos publicados por investigadores de un amplio rango de disciplinas, sirviendo como base para la regionalización climática de variables y la evaluación de las salidas de modelos climáticos globales (Peel et al., 2007)^[18], habiéndose empleado con frecuencia en estudios de impacto del cambio climático (Beck et al., 2018)^[4].

Basada principalmente en la relación existente entre el clima y la distribución de la vegetación, la clasificación de Köppen define distintos tipos de clima a partir de los valores medios mensuales y anuales de temperatura y precipitación, estableciendo umbrales para la delimitación de los distintos tipos de clima (Essenwanger, 2001)^[10]. Su relativa facilidad de cálculo y la buena correlación existente entre los tipos de clima definidos y la distribución de la vegetación natural han favorecido que sea una de las clasificaciones climáticas más sencillas de aplicar e interpretar y que siga vigente hoy en día (Chazarra, 2012)^[6].

La primera versión de la clasificación fue publicada en 1918 (Köppen, 1918)^[15], si bien hay diversos trabajos anteriores de Köppen que pueden considerarse como precursores de su clasificación (Rubel y Kottek, 2011)^[22], como los de 1884 y 1900 (Köppen, 1884; 1900)^{[13] [14]}. En su primera versión, establece un código de tres letras para la identificación de cada tipo principal de clima. La primera letra distingue los cinco grupos principales de climas: A, zona tórrida; B, zona árida; C, zona templada; D, zona fría; E, zona polar. Estos climas se corresponden con las cinco zonas principales de vegetación establecidas por el botánico francés De Candolle a finales del siglo XIX, las cuales estaban basadas, a su vez, en las zonas climáticas descritas ya en la antigua Grecia (Sanderson, 1999)^[23]. La delimitación de cada una de las cinco zonas principales se realiza teniendo en cuenta los valores medios anuales y mensuales de temperatura y precipitación. La clasificación incluye, además, una segunda y una tercera letras para caracterizar la precipitación y la temperatura, respectivamente.

Köppen trabajó durante muchos años con los datos de temperatura y precipitación disponibles a nivel mundial para establecer valores umbrales que permitieran ajustar, de la forma más precisa posible, las isóneas de estas variables a las principales zonas de vegetación, publicando sucesivas modificaciones de su clasificación a lo largo de su vida.

En el presente trabajo se ha seguido el esquema propuesto por Köppen en su última revisión de 1936 (Köppen, 1936)^[16], conocido también como clasificación de Köppen-Geiger, con la única salvedad de la temperatura umbral que separa los climas templados (tipo C) y fríos (tipo D), para la cual se ha escogido el valor de 0 °C propuesto por Russell, Trewartha, Critchfield y otros autores en lugar de los -3 °C de la clasificación original (Essenwanger, 2001)^[10]. Este esquema es idéntico al empleado en los mapas climáticos publicados por la Agencia Estatal de Meteorología para el territorio español correspondientes al periodo de referencia 1981-2010 (Chazarra et al., 2018)^[7], y a los publicados en el Atlas Climático de España y Portugal, correspondientes al periodo 1971-2000 (AEMET e IM, 2011; 2012)^{[1] [2]}. Asimismo, este esquema coincide exactamente con el utilizado en la clasificación a nivel mundial publicada en 2007 por Peel (Peel et al., 2007)^[18], la cual se ha utilizado como referencia en numerosos trabajos posteriores.

En la siguiente tabla se describen los símbolos de los tipos de clima de Köppen-Geiger y los criterios utilizados para definirlos:

| 1ª letra | 2ª letra | 3ª letra | Descripción | Criterio (*) |
|----------|----------|-------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| A | | | Tropical | $T_f \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | f | | - Selva | $P_s \geq 60 \text{ mm}$ |
| | m | | - Monzónico | No Af & $P_s \geq 100 - P_a/25$ |
| | w | | - Sabana | No Af & $P_s < 100 - P_a/25$ |
| B | | | Árido | $P_a < 10 P_u$ |
| | W | | - Desierto | $P_a < 5 P_u$ |
| | S | | - Estepa | $P_a \geq 5 P_u$ |
| | | h | - Cálido | $T_a \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | | k | - Frío | $T_a < 18 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| C | | | Templado | $T_c > 10 \text{ }^\circ\text{C}$ & $0^\circ\text{C} < T_f < 18^\circ\text{C}$ |
| | s | | - Verano seco | $P_{vs} < 40 \text{ mm}$ & $P_{vs} < P_{ih}/3$ |
| | w | | - Invierno seco | $P_{is} < P_{vh}/10$ |
| | f | | - Sin estación seca | No Cs ni Cw |
| | | a | - Verano caluroso | $T_c \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | | b | - Verano templado | No a & $T_{m10} \geq 4$ |
| | | c | - Verano frío | No a ni b & $1 \leq T_{m10} < 4$ |
| D | | | Frío | $T_f \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ & $T_c > 10 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | s | | - Verano seco | $P_{vs} < 40$ & $P_{vs} < P_{ih}/3$ |
| | w | | - Invierno seco | $P_{is} < P_{vh}/10$ |
| | f | | - Sin estación seca | No Ds ni Dw |
| | | a | Verano caluroso | $T_c \geq 22 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | | b | Verano templado | No a & $T_{m10} \geq 4$ |
| | | c | Verano frío | No a ni b ni d |
| | d | Invierno muy frío | No a ni b & $T_f \leq -38 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
| E | | | Polar | $T_c < 10 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | T | | - Tundra | $T_c > 0 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | F | | - Glacial | $T_c \leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$ |

(*) T_f = temperatura media del mes más frío, P_s = precipitación media del mes más seco, T_a = temperatura anual media, P_a = precipitación anual media, P_u = precipitación umbral (si al menos el 70 % de P_a ocurre en el invierno entonces $P_u = 2 T_a$; si al menos el 70 % de P_a ocurre en el verano entonces $P_u = 2 T_a + 28$; en el resto de casos $P_u = 2 T_a + 14$), T_c = temperatura media del mes más cálido, P_{vs} = precipitación media del mes más seco del verano, P_{ih} = precipitación media del mes más lluvioso del invierno, P_{is} = precipitación media del mes más seco del invierno, P_{vh} = precipitación media del mes más lluvioso del verano, T_{m10} = número de meses con temperatura media $> 10 \text{ }^\circ\text{C}$. El verano/invierno se define como el semestre más cálido/frío formado por los meses ONDEFM o AMJJAS. Las temperaturas se expresan en $^\circ\text{C}$ y las precipitaciones en mm.

Tabla 1. Descripción de símbolos de los tipos de clima de Köppen y criterios utilizados para definirlos (adaptado de Peel et al., 2007^[18]).

A la hora de realizar la clasificación, los climas áridos B deben identificarse en primer lugar ya que, como se aprecia en la

| 1ª letra | 2ª letra | 3ª letra | Descripción | Criterio (*) |
|----------|----------|----------|-------------|--------------------------------------|
| A | | | Tropical | $T_f \geq 18 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | f | | - Selva | $P_s \geq 60 \text{ mm}$ |
| | m | | - Monzónico | No Af & $P_s \geq 100 - P_a/25$ |
| | w | | - Sabana | No Af & $P_s < 100 - P_a/25$ |
| B | | | Árido | $P_a < 10 P_u$ |

| | | | |
|---|---|---------------------|-----------------------------------------------------------------|
| | W | - Desierto | $P_a < 5 P_u$ |
| | S | - Estepa | $P_a \geq 5 P_u$ |
| | h | - Cálido | $T_a \geq 18 \text{ °C}$ |
| | k | - Frío | $T_a < 18 \text{ °C}$ |
| C | | Templado | $T_c > 10 \text{ °C} \ \& \ 0 \text{ °C} < T_f < 18 \text{ °C}$ |
| | s | - Verano seco | $P_{vs} < 40 \text{ mm} \ \& \ P_{vs} < P_{ih}/3$ |
| | w | - Invierno seco | $P_{is} < P_{vh}/10$ |
| | f | - Sin estación seca | No Cs ni Cw |
| | a | - Verano caluroso | $T_c \geq 22 \text{ °C}$ |
| | b | - Verano templado | No a & $T_{m10} \geq 4$ |
| | c | - Verano frío | No a ni b & $1 \leq T_{m10} < 4$ |
| D | | Frío | $T_f \leq 0 \text{ °C} \ \& \ T_c > 10 \text{ °C}$ |
| | s | - Verano seco | $P_{vs} < 40 \ \& \ P_{vs} < P_{ih}/3$ |
| | w | - Invierno seco | $P_{is} < P_{vh}/10$ |
| | f | - Sin estación seca | No Ds ni Dw |
| | a | Verano caluroso | $T_c \geq 22 \text{ °C}$ |
| | b | Verano templado | No a & $T_{m10} \geq 4$ |
| | d | Verano frío | No a ni b ni d |
| | d | Invierno muy frío | No a ni b & $T_f \leq -38 \text{ °C}$ |
| E | | Polar | $T_c < 10 \text{ °C}$ |
| | T | - Tundra | $T_c > 0 \text{ °C}$ |
| | F | - Glacial | $T_c \leq 0 \text{ °C}$ |

(*) T_f = temperatura media del mes más frío, P_s = precipitación media del mes más seco, T_a = temperatura anual media, P_a = precipitación anual media, P_u = precipitación umbral (si al menos el 70 % de P_a ocurre en el invierno entonces $P_u = 2 T_a$; si al menos el 70 % de P_a ocurre en el verano entonces $P_u = 2 T_a + 28$; en el resto de casos $P_u = 2 T_a + 14$), T_c = temperatura media del mes más cálido, P_{vs} = precipitación media del mes más seco del verano, P_{ih} = precipitación media del mes más lluvioso del invierno, P_{is} = precipitación media del mes más seco del invierno, P_{vh} = precipitación media del mes más lluvioso del verano, T_{m10} = número de meses con temperatura media $> 10 \text{ °C}$. El verano/invierno se define como el semestre más cálido/frío formado por los meses ONDEFM o AMJJAS. Las temperaturas se expresan en $^{\circ}\text{C}$ y las precipitaciones en mm.

Tabla 1, todas las localizaciones en las que se cumplen los requisitos del tipo B verificarán a la vez las condiciones exigidas en uno de los otros tipos (A, C, D o E), debiendo asignarse en esos casos siempre el tipo B.

Teniendo en cuenta la descripción anterior, resultan 30 tipos de clima posibles: 3 climas tropicales (Af, Am y Aw), 4 áridos (BWh, BWk, BSh y BSk), 9 templados (Csa, Csb, Csc, Cfa, Cfb, Cfc, Cwa, Cwb y Cwc), 12 fríos (Dsa, Dsb, Dsc, Dsd, Dfa, Dfb, Dfc, Dfd, Dwa, Dw b, Dwc y Dwd) y 2 polares (ET y EF).

3 Datos y metodología

3.1 Rejillas mensuales y anuales de temperatura y precipitación 1951-2020

En el presente estudio se han utilizado las rejillas históricas mensuales y anuales de temperatura media y precipitación acumulada generadas en el Área de Climatología y Aplicaciones Operativas de la Agencia Estatal de Meteorología, descritas en las notas técnicas de AEMET nº 31 *Análisis de las temperaturas en España en el periodo 1961-2018* (Chazarra et al., 2020)^[8] y nº 32 *Comportamiento de las precipitaciones en España y periodos de sequía (periodo 1961-2018)* (Romero et al., 2020)^[21].

En las publicaciones anteriores se detalla el proceso seguido para la generación de las rejillas, desde la selección y el control de calidad de los datos hasta el proceso de interpolación espacial utilizado para cada variable. Los datos empleados fueron los registros históricos mensuales de temperatura y precipitación almacenados en el Banco Nacional de Datos Climatológicos de la Agencia Estatal de Meteorología. Para la interpolación espacial de los datos de temperatura se empleó un modelo de regresión múltiple con la altitud, la latitud, la longitud y la distancia a la costa como variables independientes, sumando a continuación el campo de los residuos de la regresión interpolado mediante krigeado ordinario. Los datos de precipitación se interpolaron utilizando un krigeado ordinario.

El periodo considerado en Chazarra et al., 2020^[8] y Romero et al., 2020^[21] fue el 1961-2018, habiéndose limitado el estudio a fechas posteriores a 1961 al haberse observado que la calidad de las rejillas descendía de forma apreciable antes de esta fecha, especialmente en el caso de la precipitación, debido a la disminución del número y de la calidad de los datos disponibles. No obstante, en el presente estudio se ha considerado conveniente comenzar en 1951 para incluir así el periodo de referencia 1951-1980 completo, por lo que se han generado las rejillas del decenio 1951-1960 siguiendo exactamente la misma metodología, a pesar de que la calidad de las rejillas de los primeros años pueda resultar inferior. Para la fecha de finalización, se ha prolongado el estudio hasta 2020 para incluir también el periodo de referencia 1990-2020 completo. De esta manera, en el presente trabajo se analiza un periodo de setenta años, desde 1951 hasta 2020, que abarca cinco periodos de referencia de 30 años completos: 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1990-2020.

Se han considerado dos zonas de estudio (Figura 1), análogas a las de Chazarra et al., 2020^[8] y Romero et al., 2020^[21], correspondiendo la primera a la España peninsular y Baleares, y la segunda al archipiélago canario.

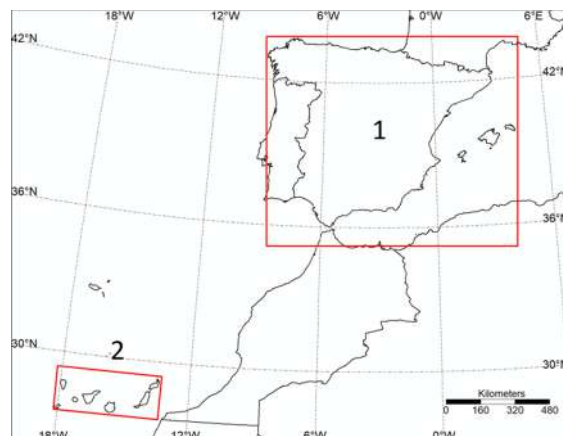


Figura 1. Zonas geográficas (en rojo) consideradas para la generación de las rejillas: la primera comprende el territorio peninsular español y Baleares y la segunda las islas Canarias.

Adicionalmente, en la Figura 2 se ha representado un mapa con la localización de los accidentes geográficos mencionados a lo largo del presente trabajo.



Figura 2. Mapa con la localización de los accidentes geográficos mencionados en el presente trabajo.

En cuanto a la resolución, se ha escogido un tamaño de celda de 1 km tanto para la temperatura como para la precipitación. En el caso de la temperatura, esta resolución coincide con la empleada en las rejillas descritas en Chazarra et al., 2020^[8]. En cambio, el tamaño de celda de las rejillas de precipitación descritas en Romero et al., 2020^[21] es de 5 km para la España peninsular y Baleares y de 2 km para Canarias. Esta resolución se había escogido teniendo en cuenta el número de estaciones disponibles y el método de interpolación espacial seguido, que no permite utilizar la altitud como variable adicional para mejorar la precisión de las rejillas de precipitación, como sí ocurre en el caso de la temperatura. No obstante, para evitar un pixelado excesivo en los mapas resultantes de la clasificación climática de Köppen-Geiger y una pérdida de detalle que puede ser relevante en la descripción de los climas en regiones de montaña y en zonas de transición entre diferentes tipos de clima, se optó por utilizar una resolución de 1 km también para la precipitación, generando las rejillas mediante interpolación espacial de los datos siguiendo exactamente la metodología descrita en Romero et al., 2020^[21], pero a una mayor resolución.

3.2 Metodología

La delimitación de las zonas climáticas se realizó aplicando el esquema de la clasificación de Köppen-Geiger a las rejillas de temperatura y precipitación anteriormente descritas, aplicando técnicas de álgebra de mapas mediante sistemas de información geográfica.

El software utilizado fue el sistema de información geográfica libre SAGA GIS (versión 6.3.0) (Conrad et al., 2015)^[9], automatizando las tareas mediante programas realizados en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2021)^[19]. Entre los paquetes empleados se encuentran RSAGA (Brenning et al., 2018)^[5], tmap (Tennekes, 2018)^[24] y raster (Hijmans, 2021)^[11].

Con el fin de evaluar la evolución de los climas a lo largo del periodo de estudio 1951-2020, se aplicó la clasificación climática a los sucesivos periodos de 30 años que comienzan el primer año de cada década: 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020. Estos periodos coinciden con los periodos de referencia establecidos por la Organización Meteorológica Mundial para el cálculo de los valores normales estándar (WMO, 2017)^[25] siendo, por tanto, los periodos habitualmente considerados en la generación de mapas de clasificaciones climáticas (AEMET e IM, 2011; 2012; Chazarra et al., 2018)^{[1] [2] [7]}.

Además, para analizar con más precisión la evolución temporal de los climas, se generaron las clasificaciones climáticas de Köppen-Geiger utilizando ventanas móviles simples de 30 años dentro del periodo 1951-2020, de forma similar a la realizada en otros trabajos previos en los que se estudia la evolución de los climas utilizando esta clasificación (Beck et al., 2005; Chazarra, 2012)^{[3] [6]}. Se analizaron a continuación las tendencias observadas en las superficies ocupadas por cada tipo de clima y su significación estadística aplicando las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall.

4 Resultados

En este apartado se analizan los resultados obtenidos siguiendo la metodología anteriormente descrita.

4.1 Clasificación de Köppen-Geiger en los periodos de referencia de 30 años del periodo de estudio 1951-2020

Se muestran a continuación los mapas de la clasificación climática de Köppen-Geiger obtenidos para los periodos de referencia de 30 años comprendidos en el periodo de estudio 1951-2020. Se han representado los mapas correspondientes a la primera letra, las dos primeras y las tres letras de la clasificación.

4.1.a Tipos principales de clima (primera letra)

El tipo A (clima tropical) no se observa en el territorio Español en ninguno de los periodos de referencia.

El tipo B (clima árido) se localiza en una amplia región del sureste de la península, en zonas de ambas mesetas, sur de Extremadura, valle del Ebro, en puntos de Baleares y, dentro del archipiélago canario, en Lanzarote, Fuerteventura y sur de Tenerife y Gran Canaria. En la Figura 3 se puede observar a simple vista el progresivo crecimiento experimentado por este clima en la península ibérica en los sucesivos periodos de referencia analizados, ganando terreno a costa del clima templado (tipo C). En los periodos 1951-1980 y 1961-1990 hay dos zonas áridas separadas en la meseta sur y en el sureste que se expanden progresivamente hasta conectarse entre sí y formar una extensa zona árida a partir del periodo 1971-2000. Resulta también evidente el crecimiento en los sucesivos periodos de la zona árida del valle del Ebro. Asimismo, llama la atención el progresivo crecimiento de las pequeñas zonas aisladas de clima tipo B que existen en el sur de Extremadura en el periodo 1951-1980, que llegan a conectarse entre sí en el periodo 1991-2020. En la meseta norte, donde en el primer periodo de referencia hay únicamente una pequeña zona con clima tipo B en su región central, se observa también una expansión considerable de este clima a lo largo del periodo de estudio. En Baleares y Canarias también se observa un crecimiento del tipo B a costa del tipo C, si bien resulta más moderado que en el territorio peninsular. En el noreste de la isla de Ibiza, se observa incluso una expansión del tipo C a expensas del B a partir del periodo 1971-2000.

El tipo C (clima templado) es el que abarca, con diferencia, una mayor extensión en el territorio español en todos los periodos de referencia, extendiéndose por la mayor parte de las zonas de baja y media altitud, quedando excluido de las zonas áridas anteriormente comentadas y de las regiones montañosas más elevadas. En las zonas de montaña se observa una progresiva expansión del tipo C a costa del tipo D, que queda relegado a zonas cada vez más altas en los sucesivos periodos de referencia. No obstante, resulta evidente la progresiva disminución del área neta ocupada por este clima debido al avance del clima tipo B en zonas de baja y media altitud.

El tipo D (clima frío) se observa únicamente en zonas de montaña del Pirineo, cordillera Cantábrica, sistemas Central e Ibérico, Sierra Nevada y en la cumbre del Teide. Este clima muestra un evidente retroceso en los sucesivos periodos de referencia analizados, habiendo sido reemplazado por el tipo C en las zonas en las que ha desaparecido.

Por último, el tipo E (clima polar) se observa únicamente en las cimas más altas del Pirineo en los dos primeros periodos de referencia, pasando a desaparecer completamente del territorio español a partir del periodo 1981-2010, al menos para la resolución considerada en este estudio (rejillas con un tamaño de celda de 1 km).

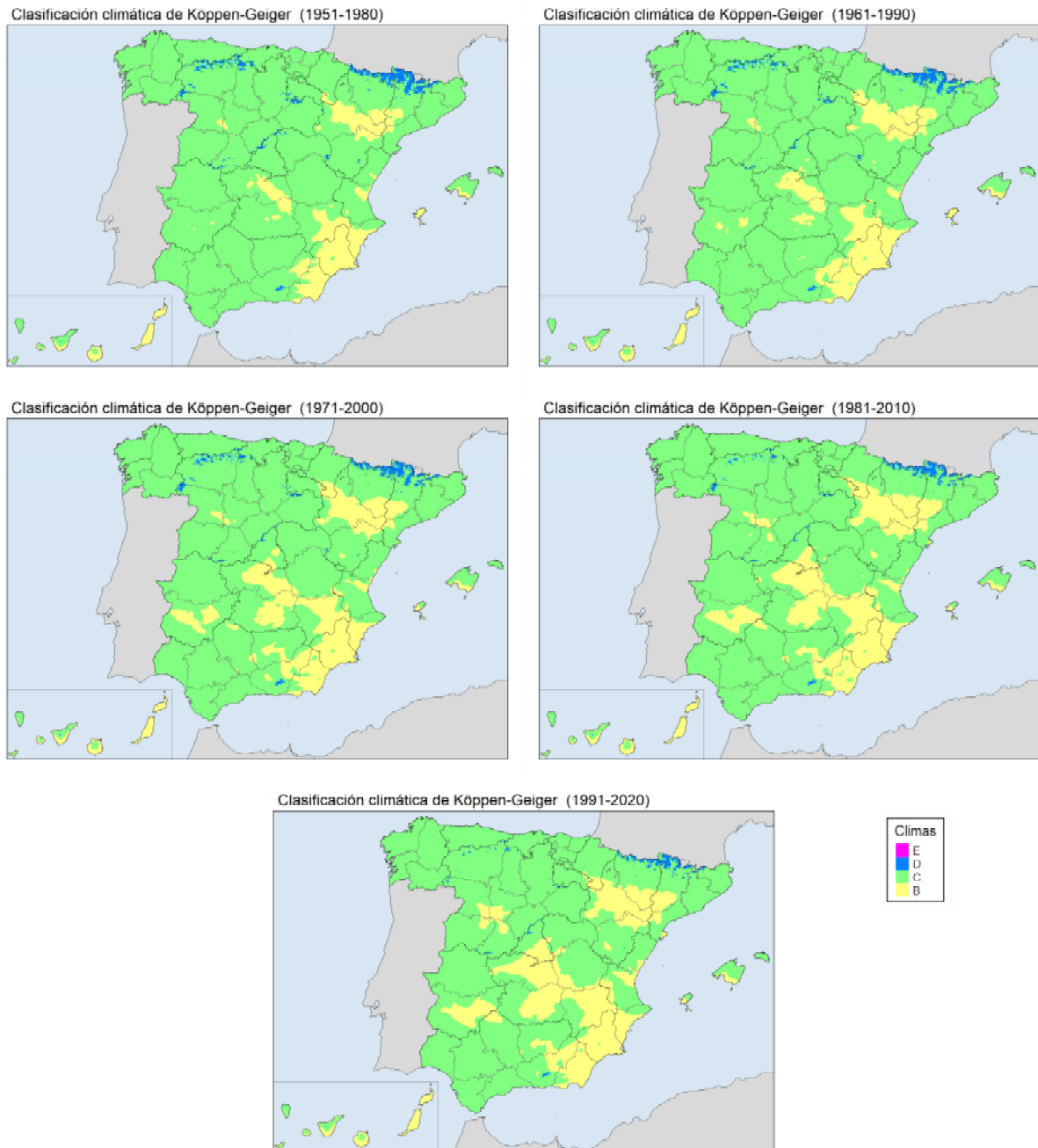


Figura 3. Principales tipos de clima (primera letra) de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020.

4.1.b Tipos de clima principales y secundarios (dos letras)

Considerando las dos primeras letras de la clasificación, se observa (Figura 4) que la mayor parte del territorio con clima árido corresponde al tipo BS (estepa), quedando el tipo BW (desierto) restringido a pequeñas zonas del sureste peninsular y a gran parte de las islas de Lanzarote, Fuerteventura y sur de Tenerife y Gran Canaria. A simple vista, resulta evidente la expansión del tipo BS en los sucesivos periodos de referencia analizados. El tipo BW muestra, en conjunto, un ligero crecimiento, si bien se alternan periodos de expansión con otros de contracción dentro del periodo de estudio.

En cuanto a los climas templados, el tipo Cs (templado con verano seco) es el que ocupa, con diferencia, una mayor extensión, quedando el tipo Cf (templado sin estación seca) restringido a zonas del tercio norte y del cuadrante noreste de la península. El tipo Cw (templado con invierno seco) no se observa en el territorio español en ninguno de los periodos de referencia. Tanto el tipo Cs como el Cf evidencian una disminución neta de su territorio en el periodo de estudio, si bien el tipo Cf muestra una expansión temporal durante el periodo 1971-2000, al ganar territorio a expensas del tipo Cs en la meseta norte y Galicia.

Dentro de los climas continentales, el tipo Ds (frío con verano seco) se observa en zonas montañosas de la cordillera Cantábrica, los sistemas Central e Ibérico y Sierra Nevada, mientras que el tipo Df (frío sin estación seca) se localiza en el Pirineo y en zonas de la cordillera Cantábrica y sistema Ibérico. El tipo Dw (frío con invierno seco) no se observa en ninguno de los periodos analizados. Tanto el tipo Ds como el Df muestran un decrecimiento progresivo de su superficie en los sucesivos periodos de referencia del periodo de estudio.

En cuanto a los climas polares, el único observado es el tipo ET (tundra), que permanece en las cimas más altas del Pirineo en los dos primeros periodos de referencia, desapareciendo completamente a partir del periodo 1981-2010.

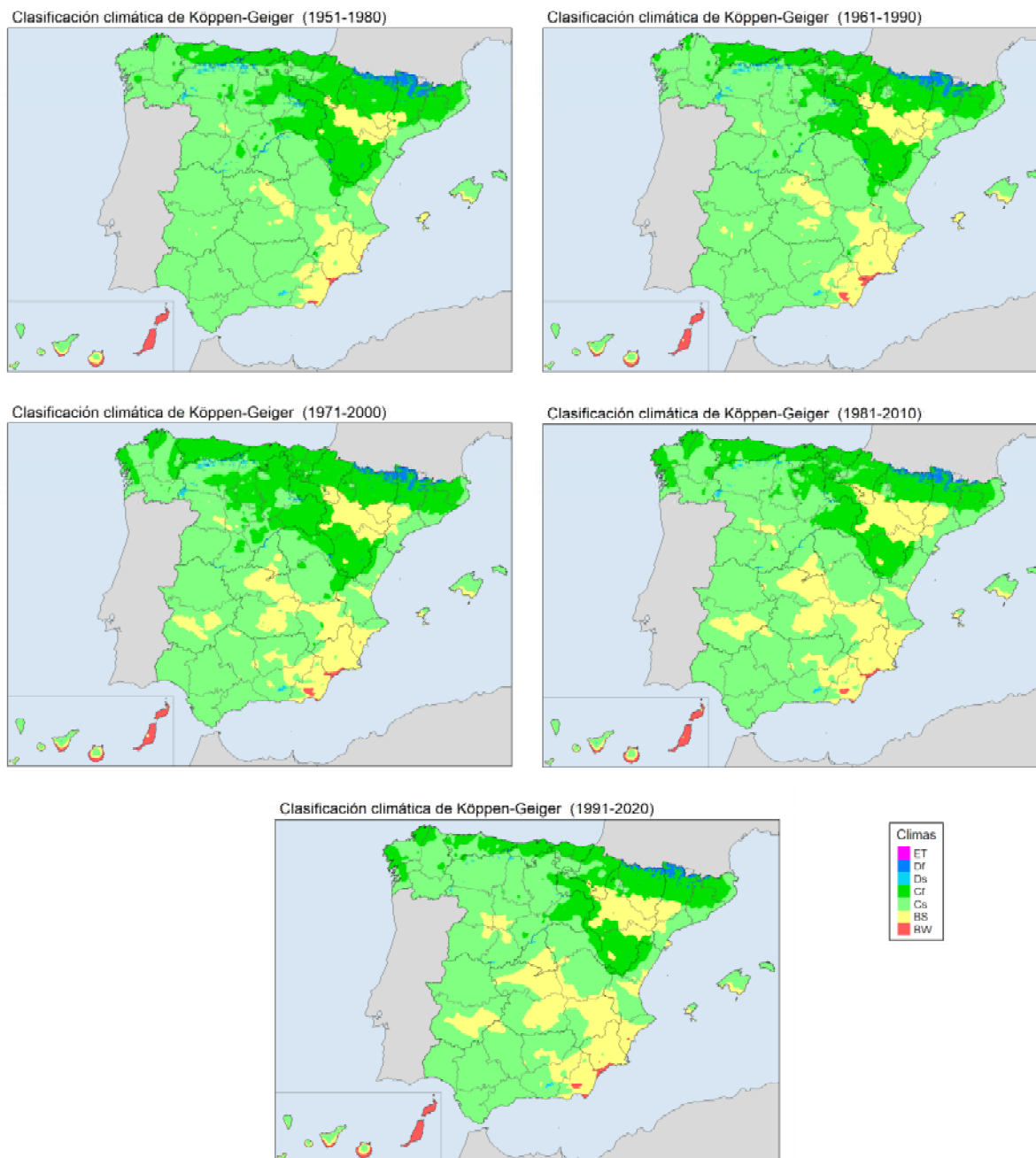


Figura 4. Tipos de clima (dos primeras letras) de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020.

4.1.c Tipos de clima (tres letras)

En el territorio español se observan los cuatro tipos de clima áridos de la clasificación climática (Figura 5). El tipo BSk (estepa fría) es el clima árido que ocupa una mayor superficie, extendiéndose por amplias zonas del sureste, centro y noreste de la península, así como en Ibiza, suroeste de Mallorca y en zonas de altitud media de Gran Canaria y del sur de Tenerife. El tipo BSh (estepa cálida) se localiza en pequeñas áreas del cuadrante sureste peninsular y de Canarias. Tanto el tipo BSk como el BSh presentan un crecimiento evidente en los sucesivos periodos de referencia.

El tipo BWh (desierto cálido) se observa en las islas de Lanzarote y Fuerteventura, en el sur de Tenerife y Gran Canaria, y en pequeñas zonas cercanas a la costa de las provincias de Almería, Murcia y Alicante. El tipo BWk (desierto frío) se localiza únicamente en pequeñas áreas de las provincias de Almería y Murcia. La superficie ocupada por los tipos BWh y BWk en el sureste peninsular muestra un ligero crecimiento neto, aunque con evidentes fluctuaciones en los distintos periodos de referencia, mientras que en Canarias se observa una expansión del tipo BWh y una disminución del área ocupada por el tipo BWk.

En cuanto a los climas templados, en España se observan los tipos Csa, Csb, Csc, Cfa, Cfb y Cfc. El tipo Csa (templado con verano seco y caluroso) es el que abarca una mayor superficie, extendiéndose por amplias zonas de la mitad sur peninsular, la costa del noreste de la península, las islas Baleares y pequeñas áreas de las islas Canarias, exceptuando Lanzarote y Fuerteventura. Este tipo de clima presenta un evidente retroceso en la España peninsular debido a la expansión de los climas áridos en los sucesivos periodos de 30 años analizados. El tipo Csb (templado con verano seco y templado) se localiza principalmente en zonas de Galicia, meseta norte, sistemas Central e Ibérico, cordilleras béticas y en las zonas medias y altas de las islas Canarias. Este clima muestra fluctuaciones en su extensión en la España peninsular, con un mínimo en el periodo 1971-2000. El tipo Csc (templado con verano seco y fresco) se observa únicamente de forma testimonial en las laderas del Teide durante el periodo de referencia 1971-2000.

El tipo Cfa (templado sin estación seca con verano caluroso) se observa principalmente en el noreste de la península, en una franja de altitud media que bordea los Pirineos y el sistema Ibérico. El tipo Cfb (templado sin estación seca con verano templado) se observa en zonas de Galicia, regiones cantábricas, sistema Ibérico y Pirineos, localizándose también en el este de la meseta norte en algunos periodos. Tanto el tipo Cfa como el Cfb muestran oscilaciones en su superficie en los distintos periodos, con una disminución neta de su extensión en el conjunto del periodo de estudio. El tipo Cfc (templado sin estación seca con verano frío) se localiza únicamente de forma testimonial en algunos puntos de la cordillera cantábrica.

Dentro de los climas fríos, se observan los tipos Dsb, Dsc, Dfb y Dfc. Los tipos Dsb (frío con verano seco y templado) y Dsc (frío con verano seco y fresco) se localizan en pequeñas áreas de alta montaña de la cordillera Cantábrica, sistemas Ibérico y Central, Sierra Nevada y en las zonas más altas del Teide, mientras que los tipos Dfb (frío sin estación seca con verano templado) y Dfc (frío sin estación seca con verano fresco) se observan en áreas de alta montaña de los Pirineos y en algunas pequeñas zonas de alta montaña de la cordillera Cantábrica y del sistema Ibérico. Estos cuatro climas muestran una evidente disminución de su superficie en los sucesivos periodos de referencia.

Por último, como ya se ha indicado en el apartado anterior, el único clima polar que se observa es el tipo ET (tundra), que se localiza en las cimas más altas del Pirineo tan solo en los dos primeros periodos de referencia, desapareciendo completamente a partir del periodo 1981-2010.

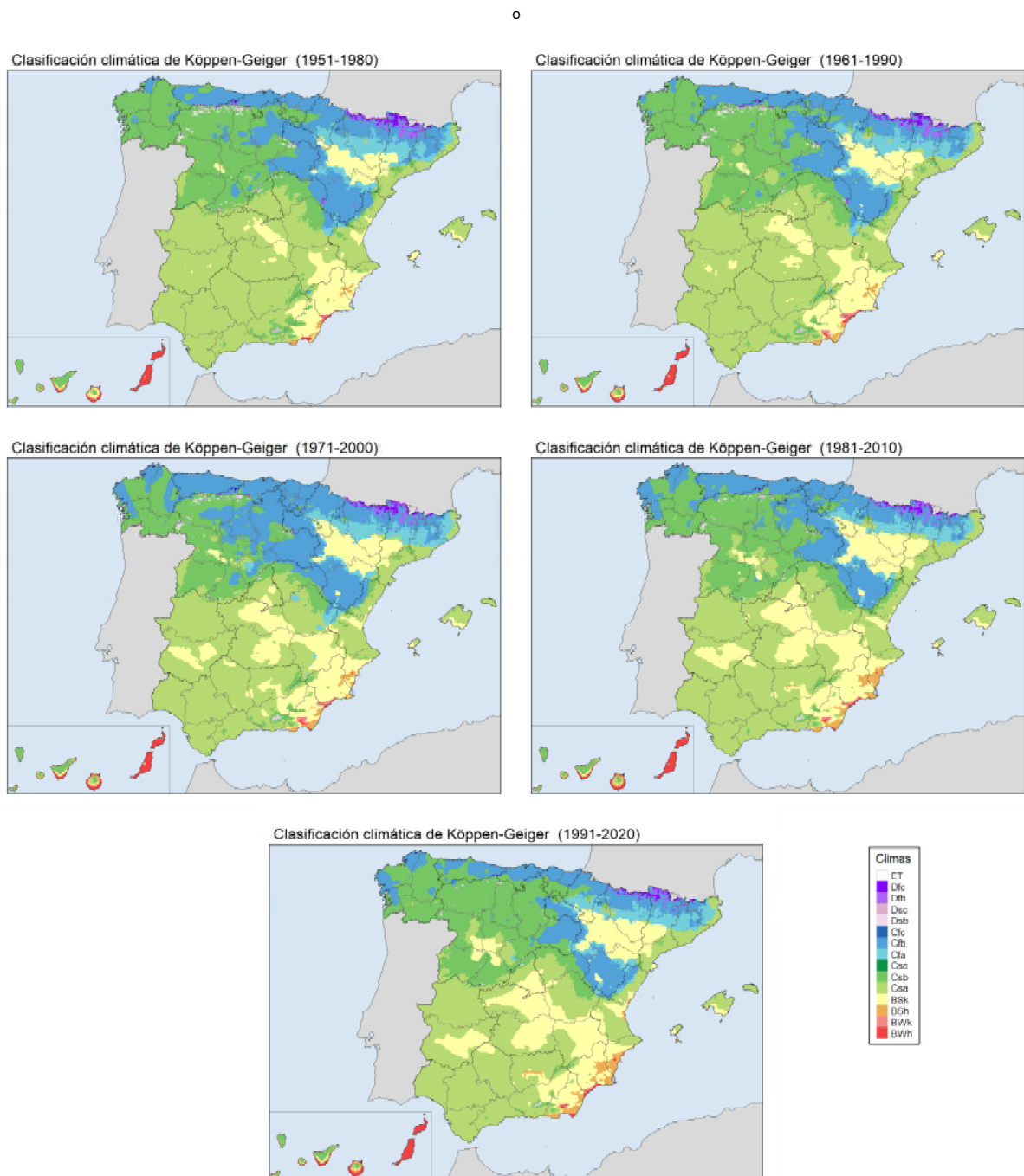


Figura 5. Tipos de clima de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1991-2020.

4.1.d Cambios observados en los tipos principales de clima en los diferentes periodos de referencia

Para delimitar con mayor precisión las zonas en las que se han producido cambios sustanciales de clima en los distintos periodos de referencia, se han representado en la Figura 6, en color gris, las zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en cada periodo de referencia respecto del anterior periodo. Como se aprecia en la figura, la mayor parte de la superficie en la que se han registrado cambios corresponde a zonas en las que los climas templados (tipo C) han dado paso a climas áridos (tipo B). En zonas de montaña, los cambios se deben a la transición de climas fríos (tipo D) a templados (tipo C) y, en menor medida, de climas polares (tipo E) a fríos (tipo D).

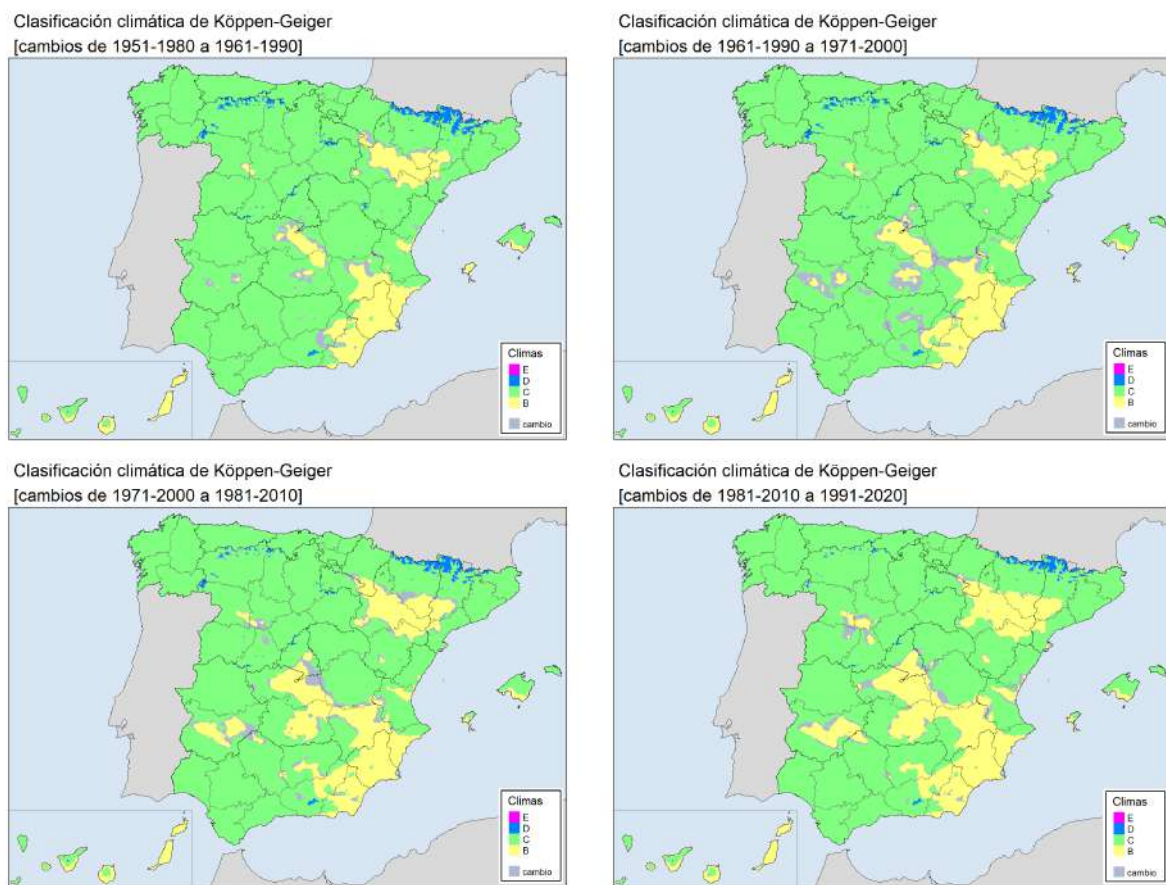


Figura 6. Zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en cada periodo de referencia respecto del anterior.

Asimismo, en la Figura 7 se han representado, en color gris, las zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en el último periodo de referencia (1991-2020) en comparación con cada uno de los anteriores periodos de referencia analizados (1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1990-2020). Nuevamente, la mayor parte de los cambios se deben al paso de climas templados (tipo C) a climas áridos (tipo B), salvo en zonas de montaña, donde predomina el cambio de climas fríos (tipo D) a climas templados (tipo C).

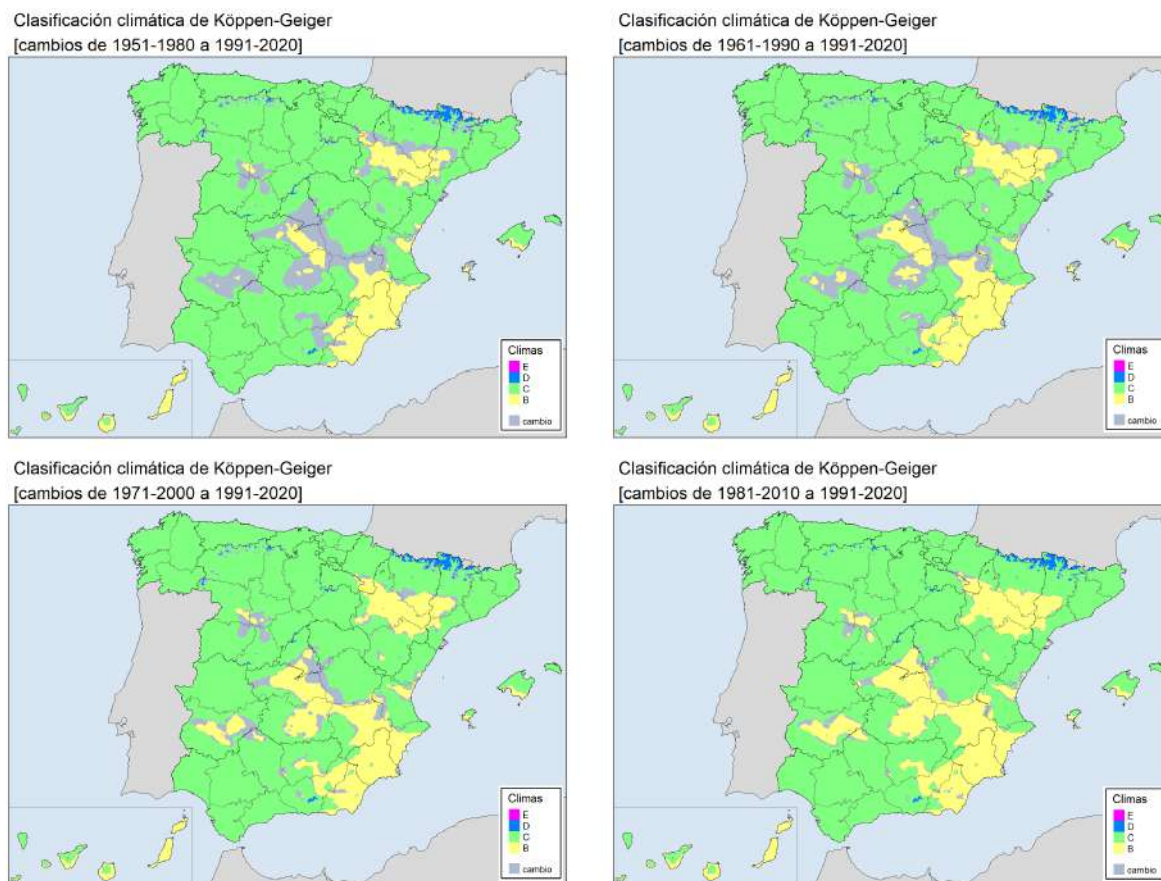


Figura 7. Zonas en las que ha cambiado el tipo principal de clima en el último periodo de referencia (1991-2020) en comparación con los anteriores periodos de referencia.

En la Figura 8 se ha representado de forma gráfica el porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando la primera y las dos primeras letras en cada periodo de referencia, para las dos zonas geográficas. El tipo E no se ha representado por ocupar una superficie insignificante en comparación con la del resto de climas. En esta figura se aprecia con claridad el avance de los climas áridos (tipo B) y el retroceso de los climas templados (tipo C) y fríos (tipo D), siendo más evidente este avance en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares, en la que el tipo B duplica su extensión. Considerando las dos primeras letras de la clasificación, el mayor avance corresponde al clima BS (estepa) en la España peninsular y Baleares, que pasa de un 10.3 % a un 21.3 % de la superficie, y al BW (desierto) en las islas Canarias, que crece del 43.3 % al 48.1 %.

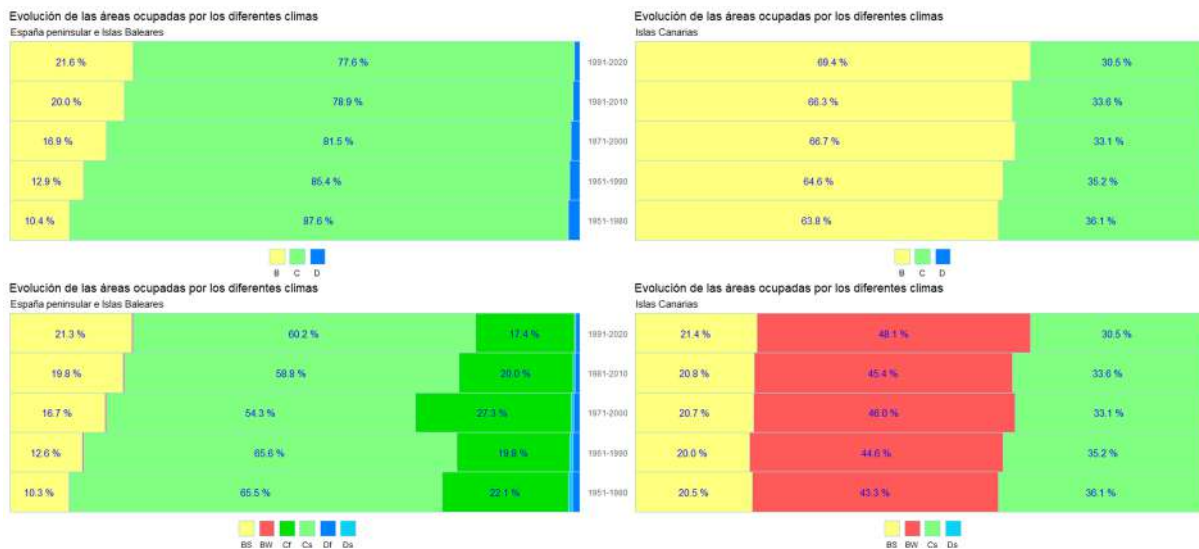


Figura 8. Porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando la primera (arriba) y las dos primeras letras (debajo) en los distintos periodos de referencia, para las dos zonas geográficas consideradas.

4.2 Evolución de los tipos de clima en ventanas móviles de 30 años

En este apartado se muestran los gráficos con el tanto por ciento de la superficie ocupada por cada tipo de clima a lo largo del periodo 1951-2020 considerando medias móviles simples de 30 años. En los gráficos, cada ventana de 30 años está designada por el último de los años que comprende, siendo el valor representado la media aritmética de los 30 valores anteriores. Se muestran los resultados para cada una de las dos zonas de estudio: la correspondiente a la España peninsular y las islas Baleares, por una parte, y la zona del archipiélago canario, por otra.

Para analizar la significación estadística de las tendencias que se observan a simple vista, se aplicaron las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall a las superficies ocupadas por cada tipo de clima en cada zona de estudio (Tabla 2). En la tabla, se han representado en **negrita** las tendencias significativas al 5 % pero no al 1 %, y en **negrita y cursiva** las significativas al 1 %.

| Clima | Tendencia (km ² /año) | |
|-------|----------------------------------|----------------------------|
| | Península y Baleares | Canarias |
| B | <i>1510.8 ± 67.3</i> | <i>6.0 ± 1.0</i> |
| BW | -1.3 ± 6.3 | <i>4.1 ± 1.0</i> |
| BWh | <i>6.0 ± 2.3</i> | <i>6.0 ± 0.9</i> |
| BWk | -7.3 ± 4.4 | <i>-1.9 ± 0.2</i> |
| BS | <i>1512.1 ± 65.3</i> | <i>1.9 ± 0.4</i> |
| BSh | <i>148.8 ± 6.5</i> | <i>11.5 ± 0.6</i> |
| BSk | <i>1363.3 ± 67.1</i> | <i>-9.6 ± 0.7</i> |
| C | <i>-1385.5 ± 67.1</i> | <i>-6.0 ± 0.9</i> |
| Cs | <i>-793.3 ± 256.3</i> | <i>-6.0 ± 0.9</i> |
| Csa | <i>-582.5 ± 78.2</i> | <i>6.9 ± 1.0</i> |
| Csb | -211.0 ± 198.0 | <i>-12.8 ± 0.9</i> |
| Csc | | <i>-0.08 ± 0.03</i> |
| Cf | <i>-592.2 ± 215.1</i> | |
| Cfa | <i>-169.7 ± 29.3</i> | |
| Cfb | -422.5 ± 209.2 | |
| Cfc | 0.03 ± 0.09 | |
| D | <i>-124.8 ± 4.8</i> | -0.05 ± 0.02 |
| Ds | <i>-51.2 ± 2.8</i> | -0.05 ± 0.02 |
| Dsb | <i>-43.2 ± 2.8</i> | <i>0.17 ± 0.03</i> |
| Dsc | <i>-8.0 ± 0.5</i> | <i>-0.22 ± 0.04</i> |
| Df | <i>-73.6 ± 2.6</i> | |
| Dfb | <i>-53.7 ± 3.3</i> | |
| Dfc | <i>-19.9 ± 1.5</i> | |
| E | <i>-0.6 ± 0.1</i> | |
| ET | <i>-0.6 ± 0.1</i> | |

Tabla 2. Tendencias observadas para cada tipo de clima en la España peninsular y Baleares (izquierda) y Canarias (derecha) en el periodo de estudio, considerando medias móviles simples de 30 años. Se han representado en negrita las tendencias significativas al 5 % pero no al 1 %, y en negrita y cursiva las significativas al 1 %.

4.2.a Península ibérica y Baleares

Como se observa en la Figura 9, los climas áridos (tipo B) han experimentado una notable expansión en la España peninsular y Baleares en el periodo de estudio, pasando de alrededor de un 11 % del territorio en los primeros años hasta cerca de un 21 % al final, habiendo prácticamente duplicado su extensión. El crecimiento del tipo B se concentra principalmente en las décadas de los años 1990 y 2000, mientras que la extensión de este clima se ha mantenido prácticamente constante en los periodos anteriores y posteriores. Se observa una tendencia creciente a lo largo del periodo de estudio de 1510.8 km²/año, que resulta significativa al 1 % al aplicar las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall.

Los climas templados (tipo C) muestran un comportamiento casi exactamente opuesto al de los climas áridos, habiendo disminuido su extensión por el avance de los climas tipo B desde aproximadamente un 87 % de la superficie hasta cerca de un 78 % al final del periodo de estudio,

con una tendencia de $-1385.5 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %. Este decrecimiento se ha concentrado principalmente en la última década del siglo XX y la primera del siglo XXI.

Los climas fríos (tipo D) muestran también un retroceso evidente, habiendo disminuido su extensión desde alrededor de un 2 % hasta menos de un 1 %, con una tendencia de $-124.8 \text{ km}^2/\text{año}$ que resulta significativa al 1 %. En este caso, el decrecimiento ha resultado constante a lo largo del periodo de estudio.

Los climas polares (tipo E), que se localizaban de forma testimonial en las cumbres más altas de los Pirineos durante los primeros años del periodo de estudio, muestran un rápido retroceso hasta desaparecer completamente a mediados de los años 1990. La tendencia a lo largo del periodo de estudio es de $-0.6 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %.

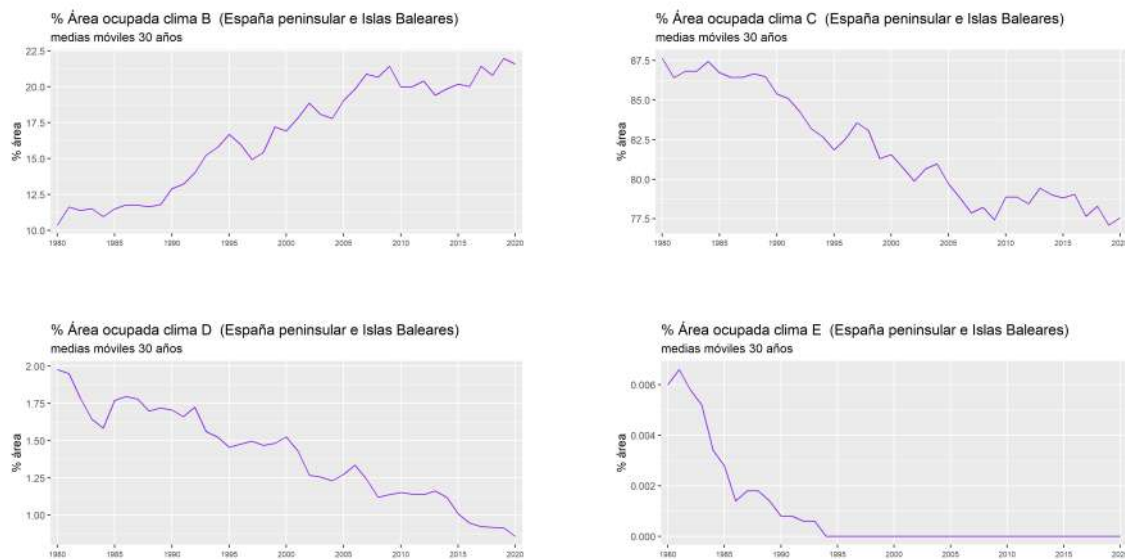


Figura 9. Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años.

En la Figura 10 se ha representado la evolución del porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando las dos primeras letras de la clasificación.

Dentro de los climas áridos, el clima BS (estepa) es el que ocupa, con gran diferencia, una mayor extensión, mostrando un comportamiento prácticamente igual al comentado previamente para el tipo B. Su extensión se ha duplicado durante el periodo de estudio, al pasar de un 10 % a más del 20 %, habiéndose producido este crecimiento principalmente en los decenios de los años 1990 y 2000. Resulta una tendencia de $1512.1 \text{ km}^2/\text{año}$ para este clima, estadísticamente significativa al 1 %. El clima BW (desierto) ocupa una superficie residual en la península ibérica, en torno al 0.3 % del territorio, mostrando oscilaciones en el periodo de estudio pero sin que se observe una tendencia significativa al 5 %.

El clima templado con verano seco (tipo Cs) muestra un retroceso neto en el periodo de estudio, habiendo pasado de alrededor de un 65 % de la superficie en los primeros años a valores en torno al 60 % al final, resultando una tendencia de $-793.3 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %. Este decrecimiento no ha sido constante, sino que presenta una marcada oscilación, con un mínimo en la ventana que finaliza en 1999, en la que la superficie ocupada fue de tan solo el 53 %. El clima templado sin

estación seca (tipo Cf) también muestra un retroceso neto, pasando de alrededor de un 22 % de la superficie a alrededor de un 17 % al final del periodo, resultando una tendencia de $-592.2 \text{ km}^2/\text{año}$ que es significativa al 1 %. Se observa en este caso una oscilación opuesta a la del tipo Cs, con un máximo en la ventana 1970-1999, en la que el tipo Cf abarcó una superficie cercana al 28 %. Del análisis de las gráficas se deduce que hubo una expansión del tipo Cf a costa del Cs en los años 1990, que posteriormente se revertiría en los años 2000 y en la primera mitad de los 2010.

Los climas fríos con verano seco (tipo Ds) y sin estación seca (tipo Df) muestran ambos un decrecimiento constante durante el periodo de estudio, pasando del 0.7 % a cerca del 0.2 % en el caso del tipo Ds, y de alrededor del 1.3 % a cerca del 0.7 % en el del tipo Df, con tendencias de $-51.2 \text{ km}^2/\text{año}$ y $-73.6 \text{ km}^2/\text{año}$, respectivamente, que son significativas al 1 % en ambos casos.

El clima ET (tundra) muestra una rápida disminución de su área, pasando del 0.006 % al comienzo del periodo de estudio hasta su total desaparición a mediados de los años 1990, con una tendencia de $-0.6 \text{ km}^2/\text{año}$ que resulta significativa al 1 %.

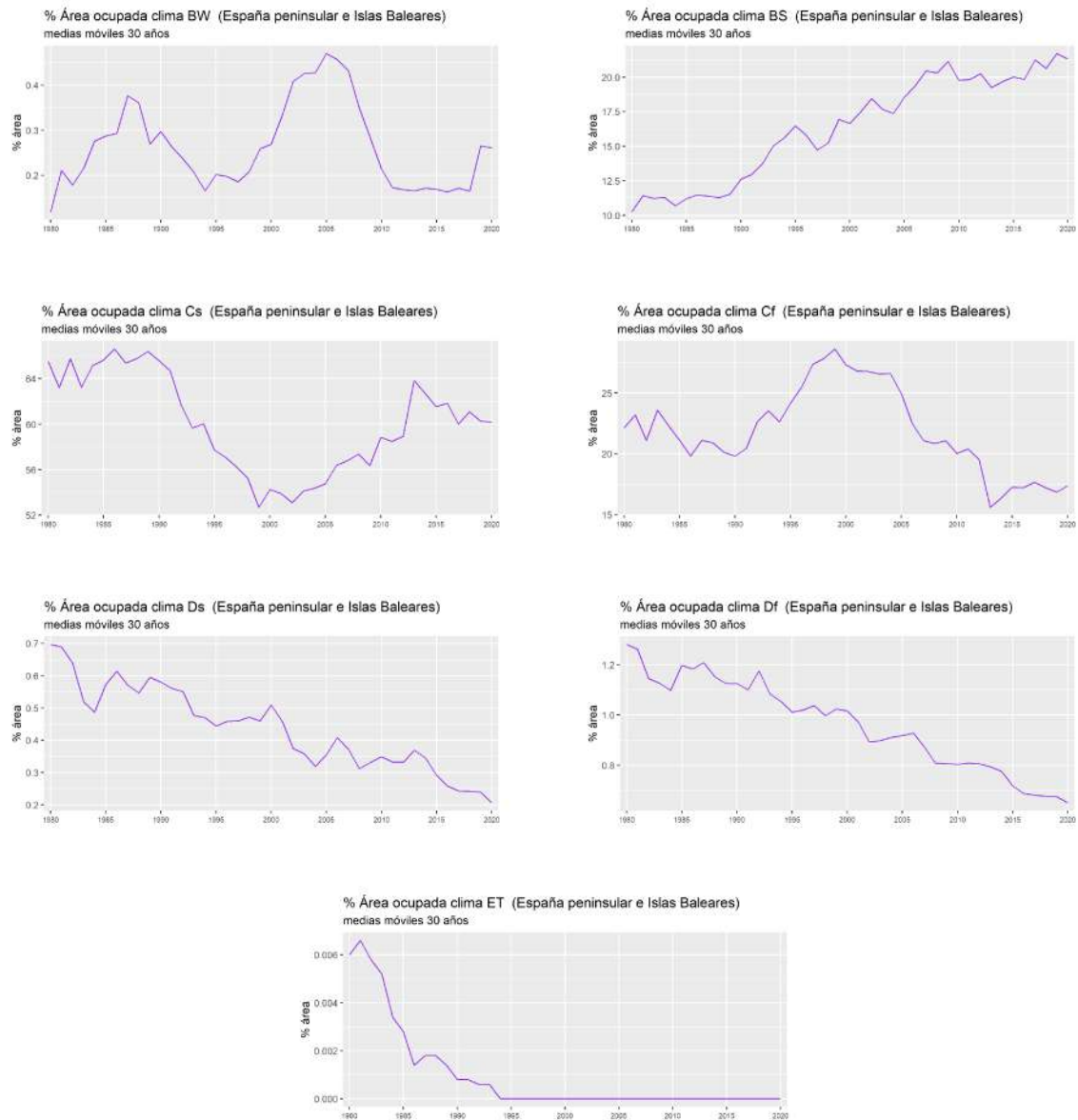


Figura 10. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (dos letras) en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años.

Por último, en la Figura 11 se ha representado la evolución del porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando las tres letras de la clasificación.

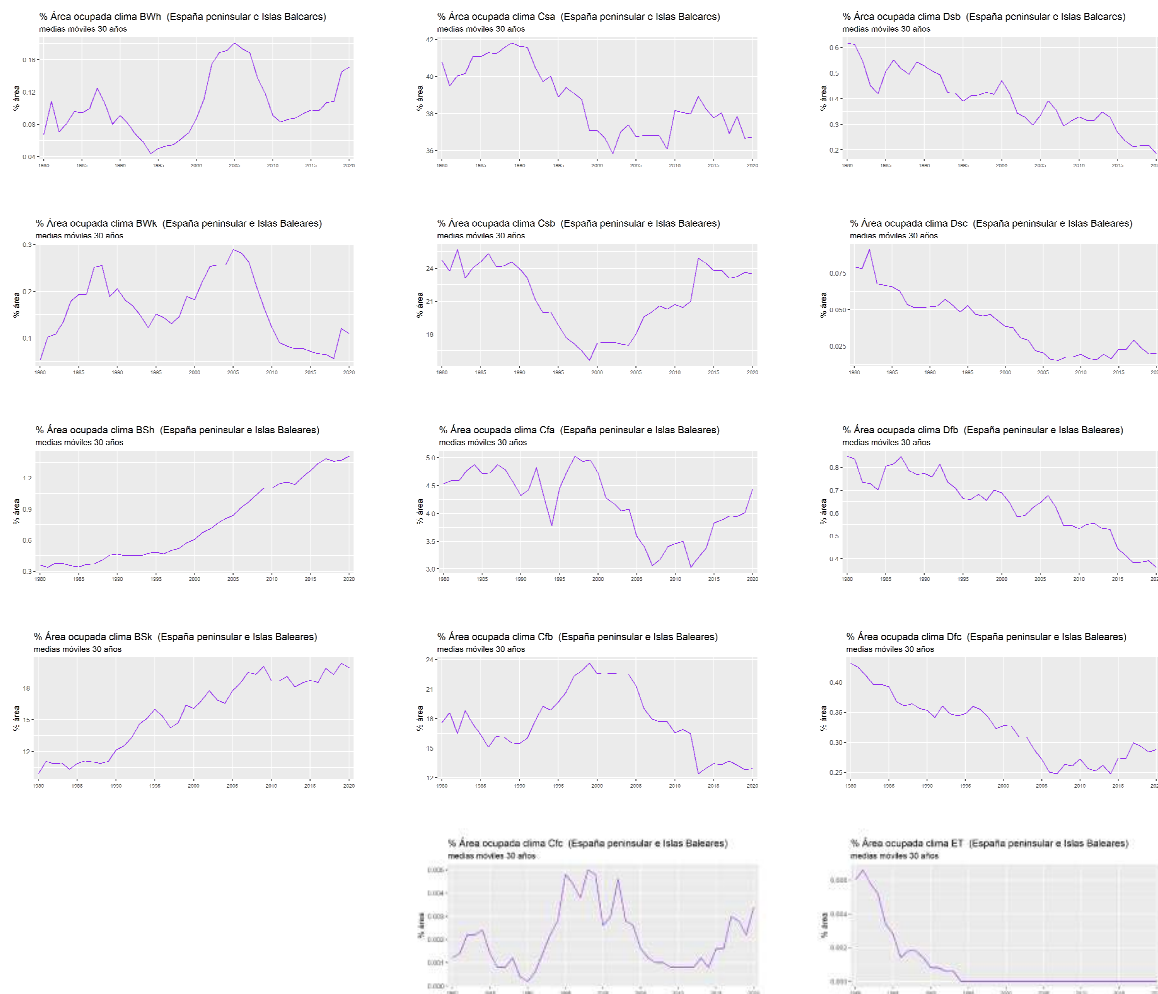


Figura 11. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (tres letras) en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años.

Los climas BSh (estepa cálida) y BSk (estepa fría) muestran ambos un crecimiento progresivo en el periodo de estudio que resulta más marcado en los años centrales, con tendencias significativas al 1% de $148.8 \text{ km}^2/\text{año}$ y $1363.3 \text{ km}^2/\text{año}$, respectivamente. Los climas BWh (desierto cálido) y BWk (desierto frío), los cuales ocupan áreas mucho menores, presentan marcadas oscilaciones, resultando una ligera tendencia creciente de $6.0 \text{ km}^2/\text{año}$ que resulta significativa al 5% pero no al 1% en el caso del tipo BWh, mientras que el clima BWk no muestra una tendencia significativa al 5%.

El clima Csa (templado con verano seco y caluroso) muestra una disminución neta en su área debida al avance de los climas áridos, pasando de un 41% a un 37%, que se concentra principalmente en los años 1990, resultando en conjunto una tendencia de $-582.5 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1%. El tipo Csb muestra también un retroceso en los años 1990, pasando de un 24% a un 17%, si bien en la década de 2000 y en la primera mitad de los años 2010 volvió a aumentar su superficie hasta situarse nuevamente alrededor de un 24% al final del periodo de estudio, no observándose una tendencia significativa al 5% en el conjunto del periodo de estudio.

De entre los climas templados sin estación seca, el tipo Cfb (templado sin estación seca con verano templado) es el que ocupa, con gran diferencia, una mayor extensión, mostrando un

comportamiento similar al descrito anteriormente para el tipo Cf, con una disminución neta de un 18 % a un 13 % de la superficie, aunque con una marcada oscilación a lo largo del periodo de estudio, sin que la tendencia decreciente observada resulte significativa al 5 %. Los tipos Cfa (templado sin estación seca con verano caluroso) y Cfc (templado sin estación seca con verano fresco) muestran ambos también oscilaciones en su superficie, observándose una tendencia decreciente para el tipo Cfa de $-169.7 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %, sin que se observen tendencias significativas al 5 % en el caso del Cfc.

Los climas fríos presentes en la zona de estudio, tipos Dsb (frío con verano seco y templado), Dsc (frío con verano seco y fresco), Dfb (frío sin estación seca y verano templado) y Dfc (frío sin estación seca y verano fresco), muestran todos ellos un descenso más o menos constante en su superficie a lo largo del periodo de estudio, resultando tendencias decrecientes significativas al 1 % de $-43.2 \text{ km}^2/\text{año}$, $-8.0 \text{ km}^2/\text{año}$, $-53.7 \text{ km}^2/\text{año}$ y $-19.9 \text{ km}^2/\text{año}$, respectivamente.

Como ya se ha comentado anteriormente, el clima ET (tundra) muestra una rápida disminución de su área, pasando del 0.006 % de la superficie al comienzo del periodo de estudio hasta su total desaparición a mediados de los años 1990, con una tendencia decreciente de $-0.6 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %.

4.2.b Canarias

En Canarias, los climas áridos (tipo B) muestran también un crecimiento a costa de los climas templados (tipo C) (Figura 12), si bien este crecimiento resulta más moderado que en el territorio peninsular: el tipo B pasa de alrededor de un 64 % de la superficie al comienzo del periodo de estudio hasta alrededor de un 69 % al final de dicho periodo, resultando una tendencia creciente de $6.0 \text{ km}^2/\text{año}$, significativa al 1 %. Paralelamente, el tipo C retrocede desde un 36 % hasta menos de un 31 %, con una tendencia decreciente de $-6.0 \text{ km}^2/\text{año}$ que es significativa al 1 %. Los climas fríos (tipo D), localizados únicamente en las zonas más altas del Teide, también disminuyen en extensión, pasando de un 0.2 % de la superficie a poco más de un 0.1 %, si bien esta tendencia no resulta significativa al 5 %.

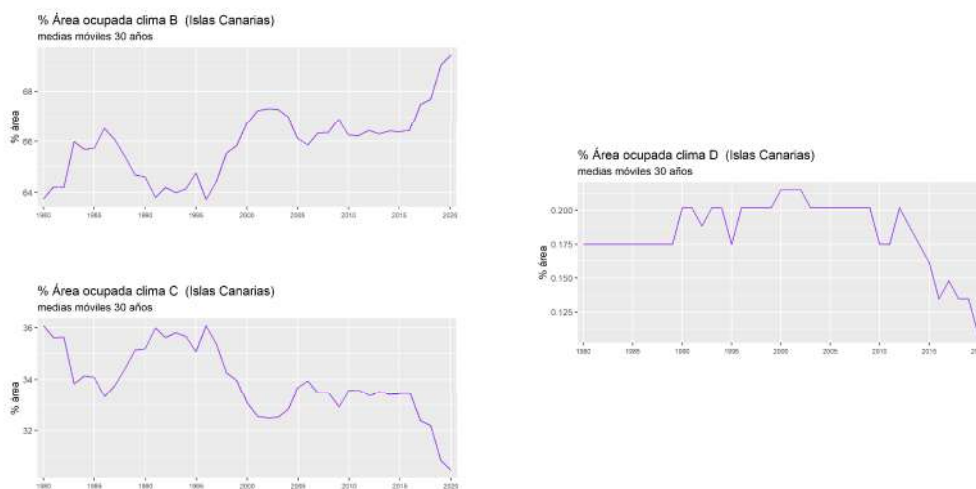


Figura 12. Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años.

Considerando las dos primeras letras de la clasificación (Figura 13), vemos que el tipo BW (desierto) presenta un avance claro, pasando de un 43 % a un 48 % de la superficie, mientras que el tipo BS (estepa) muestra un ligero crecimiento neto, pasando de un 20.5 % de la superficie a cerca de 21.5 %, resultando tendencias crecientes significativas al 1 % de 4.1 km²/año y 1.9 km²/año, respectivamente. Los tipos Cs y Ds tienen un comportamiento idéntico al de los tipos C y D anteriormente descritos, al ser los únicos climas templados y fríos presentes en Canarias, respectivamente.

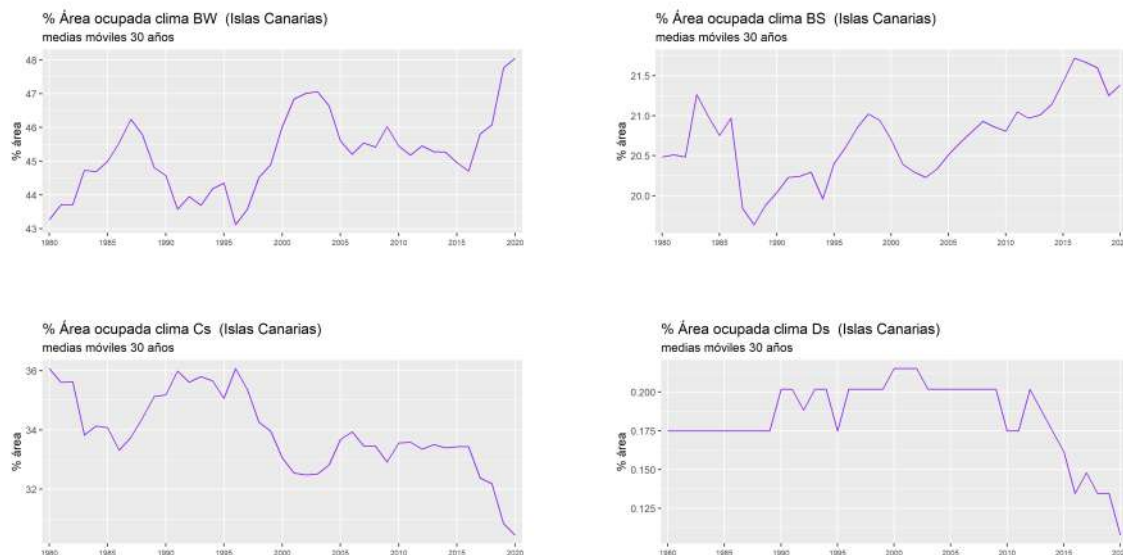


Figura 13. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (dos letras) en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años.

Por último, en la Figura 14 se ha representado la evolución en Canarias del porcentaje de superficie ocupada por cada tipo de clima considerando las tres letras de la clasificación.

En cuanto a climas áridos, se observa un incremento del área ocupada por los tipos BWh (desierto cálido) y BSh (estepa cálida), que pasan del 42 % al 48 % y del 11 % al 15 % de la superficie, con tendencias significativas al 1 % de 6.0 km²/año y 11.5 km²/año, respectivamente. En cambio, hay una disminución del área de los tipos BWk (desierto frío) y BSk (estepa fría), que reducen su extensión del 1 % al 0.1 % y del 10 % al 6 %, con tendencias de -1.9 km²/año y -9.6 km²/año, respectivamente, que son significativas al 1 % en ambos casos.

El tipo Csa (templado con verano seco y caluroso) presenta un ligero incremento neto en su superficie, pasando del 8 % al 9 %, aunque con marcadas oscilaciones a lo largo del periodo de estudio, resultando una tendencia creciente significativa al 1 % de 6.9 km²/año. El tipo Csb (templado con verano seco y fresco) reduce considerablemente su extensión, pasando del 28 % al 21 %, retroceso que se observa a partir de la mitad de los años 1990, con una tendencia de -12.8 km²/año que es significativa al 1 %. El tipo Csc (templado con verano seco y fresco) se localiza solo de forma residual en las laderas del Teide en la primera mitad del periodo de estudio, mostrando una ligera tendencia decreciente de -0.08 km²/año que resulta significativa al 5 % pero no al 1 %.

En cuanto a los climas fríos, se observa una ligera expansión del tipo Dsb (frío con verano seco y templado) y un retroceso del tipo Dsc (frío con verano seco y fresco), cambios que se producen en

la segunda mitad del periodo de estudio, resultando tendencias de $0.17 \text{ km}^2/\text{año}$ y $-0.22 \text{ km}^2/\text{año}$, respectivamente, significativas al 1 % en ambos casos.



Figura 14. Evolución del área ocupada por cada tipo de clima (tres letras) en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años.

5 Análisis de los resultados y conclusiones

Los resultados anteriores ponen de manifiesto un avance progresivo y estadísticamente significativo de los climas áridos (tipo B) a costa de los climas templados (tipo C) en todo el territorio español durante el periodo de estudio 1951-2020, y un retroceso de los climas fríos (tipo D) en la España peninsular y Baleares, que son reemplazados a su vez por climas templados. El avance estimado de los climas áridos (tipo B) en el territorio español es de unos $1517 \text{ km}^2/\text{año}$, mientras que los climas templados (tipo C) y fríos (tipo D) han retrocedido a un ritmo de $1392 \text{ km}^2/\text{año}$ y $125 \text{ km}^2/\text{año}$, respectivamente.

También resulta destacable la rápida disminución del área ocupada por el clima ET (tundra) que se localizaba en las cumbres más altas del Pirineo, hasta su total desaparición a mediados de los años 1990 para la resolución considerada en el estudio (celdas de 1 km). Este resultado concuerda con el notable descenso observado en la superficie glaciar del Pirineo durante el periodo de estudio 1951-2020, cercano al 80 %, y que se ha acelerado notablemente a partir de la década de 1980 (Rico et al., 2017)^[20], confirmando el acelerado declive de los glaciares de montaña del Pirineo durante el final del siglo XX y la primera década del siglo XXI.

Los resultados obtenidos sintetizan los efectos del calentamiento global observado en las últimas décadas en la distribución de los climas y de la vegetación en España, y son consistentes con los cambios observados a escala global durante el periodo analizado. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021)^[12], cada una de las cuatro últimas décadas ha sido sucesivamente más cálida que cualquier otra década anterior desde 1850. La temperatura global en superficie en las dos primeras décadas del siglo XXI (2001-2020) fue 0.99 °C (0.84 a 1.10 °C) más alta que en 1850-1900, mientras que en la década 2011-2020 fue 1.09 °C (0.95 a 1.20 °C) más alta que en 1850-1900, con mayores incrementos sobre la superficie

terrestre, de 1.59 °C (1.34 a 1.83 °C), que sobre los océanos, de 0.88 °C (0.68 a 1.01 °C). Asimismo, según este informe los cambios observados en la biosfera desde 1970 a escala global son consistentes con el calentamiento global: las zonas climáticas se han desplazado hacia los polos en ambos hemisferios, y la estación de crecimiento se ha alargado en promedio de uno a dos días por década desde los años 1950 en la zona extratropical del hemisferio norte (*alta confianza*).

Para ayudar a interpretar los resultados, en la Figura 15 se ha representado la evolución de la temperatura anual media y su tendencia en cada una de las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020, valores obtenidos a partir de las rejillas de temperatura utilizadas en el presente estudio. Se observa una tendencia creciente en el conjunto del periodo analizado de 0.19 ± 0.03 °C/decenio en la España peninsular y Baleares y de 0.18 ± 0.03 °C/decenio en las islas Canarias, y que resulta significativa al 1% en ambos casos al aplicar las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall. Estos valores son similares a los obtenidos para el periodo 1961-2018 en la publicación *Análisis de las temperaturas en España en el periodo 1961-2018* (Chazarra et al., 2020)^[8].

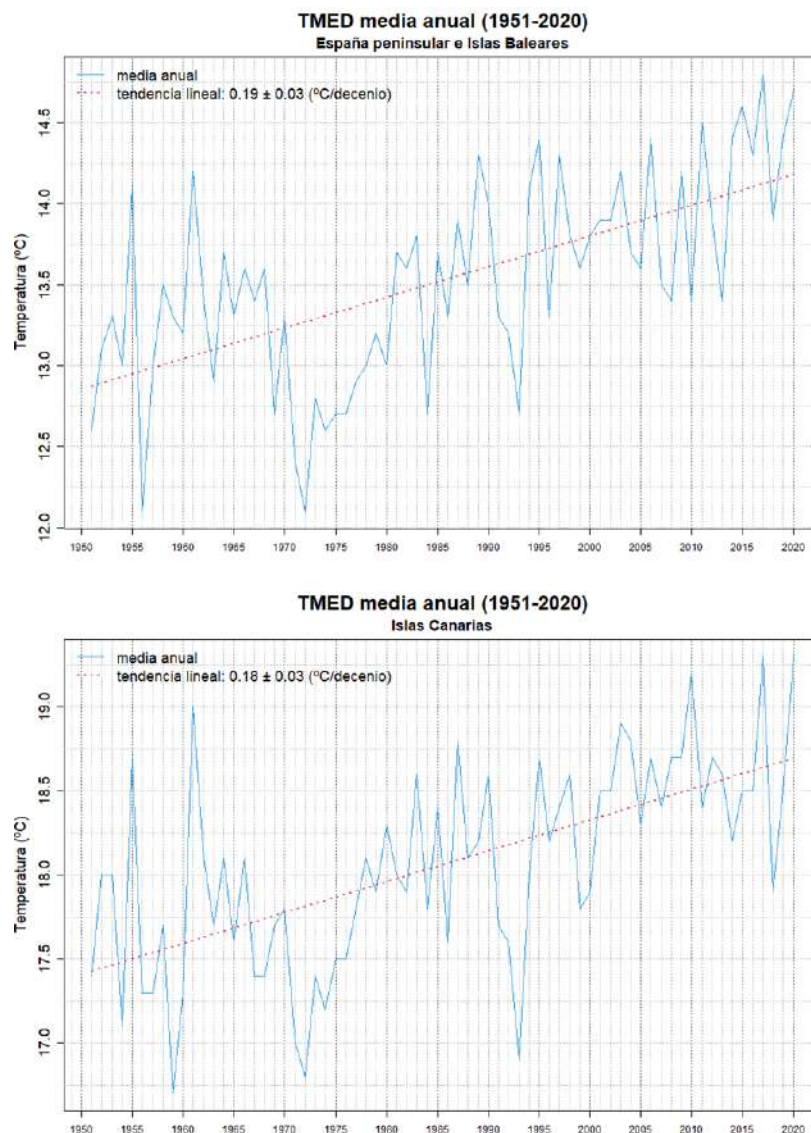


Figura 15. Evolución de la temperatura media anual y su tendencia en las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020.

En cuanto a la precipitación, la otra variable considerada en la clasificación de Köppen-Geiger, en la Figura 16 se ha representado la evolución de la precipitación media anual y su tendencia en cada una de las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020, valores obtenidos a partir de las rejillas de precipitación. Se observa una ligera tendencia decreciente en el conjunto del periodo analizado, que es de -12.80 ± 6.43 mm/decenio en la España peninsular y Baleares y de -7.07 ± 4.99 mm/decenio en las islas Canarias. Sin embargo, estas tendencias no resultan significativas al 5 % al aplicar las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall y presentan, además, un margen de error considerable.

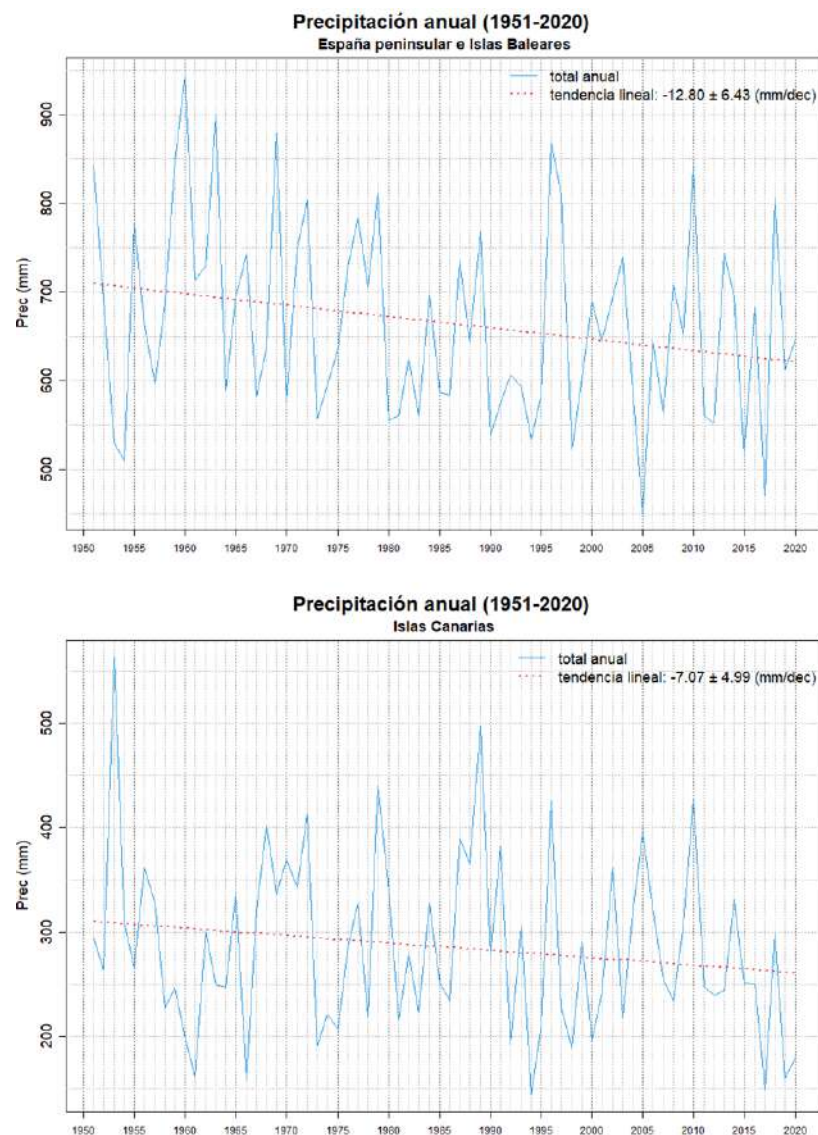


Figura 16. Evolución de la precipitación anual media y su tendencia en las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020.

Del análisis anterior se desprende que el retroceso observado de los climas fríos (tipo D) y polares (tipo E), cuya delimitación se realiza teniendo en cuenta la temperatura media del mes más frío y

del más cálido, es una consecuencia directa del calentamiento observado durante el periodo de estudio en España.

En cuanto a los climas áridos (tipo B), en cuya delimitación se tiene en cuenta tanto la temperatura como la precipitación, se puede concluir que, en el caso de España, el avance observado es debido principalmente al significativo aumento experimentado por las temperaturas y, en menor medida, a una ligera disminución de las precipitaciones, si bien este descenso no resulta estadísticamente significativo y debe considerarse con precaución. La mayor evaporación que se produce como consecuencia del aumento térmico, al no estar compensada por un aumento de las precipitaciones, que incluso han descendido ligeramente, da lugar a una disminución del agua disponible para las plantas, lo cual que se traduce en un avance de los climas áridos (tipo B) a costa de los templados (tipo C) en la clasificación de Köppen-Geiger.

6 Referencias

- [1] Agencia Estatal de Meteorología & Instituto de Meteorología de Portugal. (2011). Atlas climático ibérico. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000). Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/784-11-002-5
- [2] Agencia Estatal de Meteorología & Instituto de Meteorología de Portugal. (2012). Atlas climático de los archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000). Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/281-12-006-X
- [3] Beck, C., Grieser, J., Kottek, M., Rubel, F., & Rudolf, B. (2005). Characterizing Global Climate Change by means of Köppen. En *Klimastatusbericht 2005* (págs. 139-149). DWD. Obtenido de https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb2005_pdf/10_2005.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [4] Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 180214. doi:10.1038/sdata.2018.214
- [5] Brenning, A., Bangs, D., & Marc, B. (2018). RSAGA: SAGA Geoprocessing and Terrain Analysis. R package version 1.3.0. Obtenido de <https://CRAN.R-project.org/package=RSAGA>
- [6] Chazarra, A. (2012). Variabilidad de los climas de Köppen en la España peninsular y Baleares en el periodo 1951-2010. XXXII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española y XIII Encuentro Hispano Luso de Meteorología. Alcobendas (Madrid): Asociación Meteorológica Española. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.11765/5774>
- [7] Chazarra, A., Flórez, E., Peraza, B., Tohá, T., Lorenzo, B., Criado, E., . . . Botey, R. (2018). Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2010). Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/014-18-004-2
- [8] Chazarra, A., Lorenzo, B., Rodríguez, C., & Botey, R. (2020). Análisis de las temperaturas en España en el periodo 1961-2018. Volumen 1: Rejillas mensuales de temperatura 1961-2018 (Nota técnica 31.1, versión 2.0 ed.). Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/666-20-003-4
- [9] Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., . . . Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci. Model Dev.*, 8, 1991-2007. doi:10.5194/gmd-8-1991-2015
- [10] Essenwanger, O. M. (2001). *Classification of Climates* (Vol. World Survey of Climatology 1C: General Climatology). (H. E. Landsberg, Ed.) Amsterdam: Elsevier.
- [11] Hijmans, R. J. (2021). raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.5-2. Obtenido de <https://CRAN.R-project.org/package=raster>
- [12] IPCC. (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, . . . B. Zhou, Edits.) IPCC. Obtenido de https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf
- [13] Köppen, W. (1884). Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet, *Meteorol. Z.* 1, 215-226. (The thermal zones of the earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world), 20(3), 351-360. (E. Volken, & S. Brönnimann, Trads.) *Meteorologische Zeitschrift*. doi:10.1127/0941-2948/2011/105

- [14] Köppen, W. (1900). Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugsweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, 6, 593–611, 657–679. Obtenido de http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1900.pdf
- [15] Köppen, W. (1918). Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193-203, 243-248. Obtenido de http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1918.pdf
- [16] Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate (Vols. 1, Parte C, en *Handbuch der Klimatologie*). (W. Köppen, & G. Geiger, Edits.) Berlin: Gebrüder Borntraeger. Obtenido de http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf
- [17] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi:10.1127/0941-2948/2006/0130
- [18] Peel, M., Finlayson, B., & McMahon, T. (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
- [19] R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Obtenido de <https://www.R-project.org/>
- [20] Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., & López-Moreno, J. I. (2017). Current glacier area in the Pyrenees: an updated assessment 2016. *Pirineos*, 172, e029. doi:10.3989/Pirineos.2017.172004
- [21] Romero, R., Moreno, J. V., Martínez, L., Huarte, M. T., Rodríguez, C., & Botey, R. (2020). Comportamiento de las precipitaciones en España y periodos de sequía (periodo 1961-2018) (Nota técnica 32 ed.). Agencia Estatal de Meteorología. doi:10.31978/666-20-006-0
- [22] Rubel, F., & Kottek, M. (2011). Comments on: "The thermal zones of the Earth" by Wladimir Köppen (1884). *Meteorologische Zeitschrift*, 20(3), 361–365. doi:10.1127/0941-2948/2011/0285
- [23] Sanderson, M. (1999). The Classification of Climates from Pythagoras to Köppen. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(4), 669-674. doi:10.1175/1520-0477(1999)080<0669:TCOCFP>2.0.CO;2
- [24] Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, 84(6), 1-39. doi:10.18637/jss.v084.i06
- [25] World Meteorological Organization. (2017). WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. Geneva: WMO-No. 1203. Obtenido de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4166