

EVOLUCIÓN DE LOS CLIMAS DE KÖPPEN-GEIGER EN ESPAÑA (1951-2020)

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, romerof@aemet.es,
jmorenog@aemet.es

RESUMEN

A pesar de haber sido originariamente formulada hace más de cien años, la clasificación de Köppen-Geiger sigue siendo actualmente la clasificación climática más ampliamente usada en los estudios climatológicos en todo el mundo. Basada en la relación entre el clima y la vegetación, esta clasificación proporciona una forma eficiente y sencilla de describir las condiciones climáticas y su estacionalidad, usando un esquema de clasificación que resulta a la vez simple y ecológicamente consistente. En este artículo se examina la evolución temporal de los tipos de clima en España en el periodo 1951-2020, usando rejillas de temperatura y precipitación de alta resolución (celdas de 1 x 1 km). Se muestran y comparan los mapas de la clasificación climática obtenidos para periodos sucesivos de 30 años, y se analiza la evolución temporal de cada tipo de clima en España, poniéndose de manifiesto una expansión progresiva de los climas áridos y una contracción del área ocupada por los climas fríos en el territorio español durante el periodo de estudio.

Palabras clave: clasificación climática, Köppen-Geiger, rejilla, cambio climático.

ABSTRACT

Despite of having been originally formulated more than one hundred years ago, the Köppen-Geiger classification is still nowadays the climate classification most widely used in climatological studies. Based on the empirical relationship between climate and vegetation, this climate classification provides an efficient and easy way to describe climate conditions and their seasonality by using a simple but ecologically meaningful classification scheme.

This study examines the temporal evolution of the Köppen-Geiger climate classification in Spain for the period 1951-2020, using high-resolution gridded datasets of monthly mean temperature and precipitation with 1 x 1 km spatial resolution. Climate classification maps for consecutive 30-year reference periods are compared, and the temporal evolution of each climate type in Spain is analysed, showing a progressive expansion of the arid climate zones and a contraction of the cold climate zones along the study period.

Key words: climate classification, Köppen-Geiger, grid, climate change.

1. INTRODUCCIÓN

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, todavía en la actualidad sigue siendo la clasificación más utilizada para delimitar y estudiar las zonas climáticas en todo el mundo (Kottek et al., 2006). Su uso es habitual 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), y habiéndose empleado con frecuencia en estudios de impacto del cambio climático durante las últimas décadas (Beck et al., 2018).

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).

En el presente artículo se 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, aplicando 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 de la Agencia Estatal de Meteorología.

Un análisis más detallado y extenso de este trabajo se puede consultar en la publicación *Evolución de los climas de Köppen en España en el periodo 1951-2020* (Chazarra et al., en prensa).

2. MÉTODOS

2.1. Clasificación climática de Köppen-Geiger

En el presente trabajo se ha seguido el esquema propuesto por Köppen en su última revisión de 1936 (Köppen, 1936), conocido también como clasificación de Köppen-Geiger, excepto la temperatura umbral que separa los climas templados (tipo C) y frío (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). 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), y a los publicados en el Atlas Climático de España y Portugal, los cuales corresponden al periodo 1971-2000 (AEMET e IM, 2011; 2012). Asimismo, este esquema coincide exactamente con el utilizado en la clasificación a nivel mundial publicada en 2007 por Peel (Peel et al., 2007), la cual se ha utilizado como referencia en numerosos trabajos posteriores.

2.2. 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 de precipitación acumulada generadas en el Área de Climatología y Aplicaciones Operativas de la Agencia Estatal de Meteorología (Chazarra et al., 2020; Romero et al., 2020). 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 de estudio se ha extendido al periodo 1951-2020 con el objeto de abarcar completos los periodos climáticos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 y 1990-2020 establecidos por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2017).

Se han considerado dos zonas de estudio (figura 1): la primera comprende la España peninsular y Baleares, y la segunda el archipiélago canario.

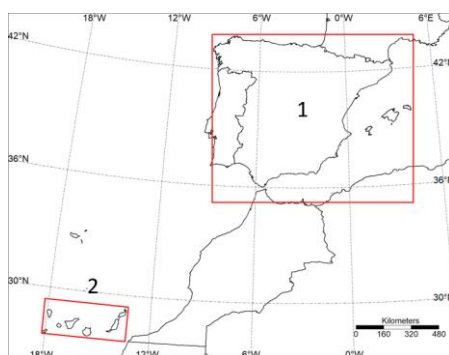


Fig. 1: Zonas de estudio.

En cuanto a la resolución, se ha escogido un tamaño de celda de 1 km tanto para la temperatura como para la precipitación.

2.3. Delimitación de las zonas climáticas en periodos de 30 años

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, empleando técnicas de álgebra de mapas con sistemas de información geográfica. El software utilizado fue el sistema de información geográfica libre SAGA GIS (versión 6.3.0), automatizando las tareas mediante programas realizados en el lenguaje de programación R.

Para analizar 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. RESULTADOS

3.1. Clasificación climática de Köppen-Geiger en los distintos periodos de referencia del periodo de estudio

En la figura 2 se han representado los tipos de clima obtenidos en cada uno de los periodos de referencia de 30 años comprendidos dentro del periodo de estudio.

El tipo A (climas tropicales) no se observa en el territorio español en ninguno de los periodos de referencia.

Se observan, en cambio, los cuatro tipos de clima árido (tipo B) de la clasificación climática. 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. A simple vista, tanto el tipo BSk como el BSh presentan un crecimiento evidente en los sucesivos periodos de referencia.

El tipo BW_h (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 BW_k (desierto frío) se localiza únicamente en pequeñas áreas de las provincias de Almería y Murcia. La superficie ocupada por los tipos BW_h y BW_k 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 BW_h y una disminución del área ocupada por el tipo BW_k.

En cuanto a los climas templados, en España se observan los tipos C_{sa}, C_{sb}, C_{sc}, C_{fa}, C_{fb} y C_{fc}. El tipo C_{sa} (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 muestra 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 C_{sb} (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 C_{sc} (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 C_{fa} (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 C_{fb} (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 C_{fa} como el C_{fb} 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 C_{fc} (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 D_{sb}, D_{sc}, D_{fb} y D_{fc}. Los tipos D_{sb} (frío con verano seco y templado) y D_{sc} (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, el único clima polar que se observa es el tipo ET (tundra), que se localiza en las cimas más altas del Pirineo en los dos primeros periodos de referencia, desapareciendo completamente a partir del periodo 1981-2010.

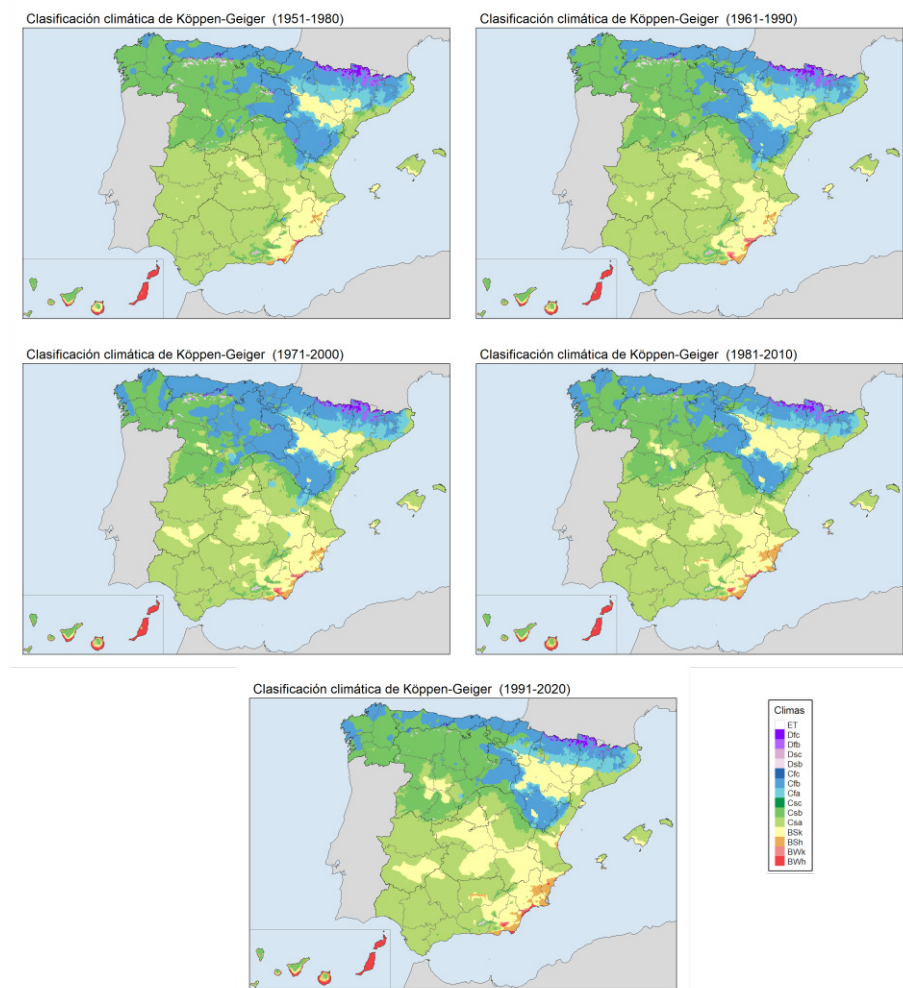


Fig. 2: Tipos de clima de la clasificación de Köppen-Geiger para los periodos de referencia 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000, 1981-2020 y 1991-2020.

3.2. Evolución de los tipos principales de clima en ventanas móviles de 30 años

Con el objeto de analizar con más precisión la evolución de los climas, en este apartado se muestran los gráficos con el tanto por ciento de la superficie ocupada por cada tipo principal de clima (primera letra de la clasificación) a lo largo del periodo 1951-2020, considerando medias móviles simples de 30 años, para cada una de las dos zonas de estudio. 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.

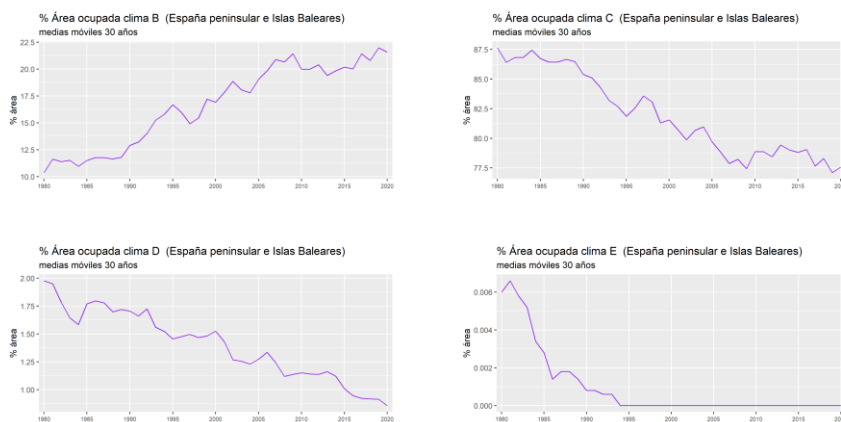


Fig. 3: Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a la España peninsular y Baleares considerando medias móviles simples de 30 años.

Como se observa en la figura 3, 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.

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. 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 %. 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. 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 principal de clima en la España peninsular y Baleares mostradas en la figura 3, resultando una tendencia creciente significativa al 1 % para el tipo B y tendencias decrecientes significativas al 1 % para los tipos C, D y E.



Fig. 4: Evolución del área ocupada por cada tipo principal de clima en la zona correspondiente a Canarias considerando medias móviles simples de 30 años.

En Canarias, los climas áridos (tipo B) muestran también un crecimiento a costa de los climas templados (tipo C) (figura 4), 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. Paralelamente, el tipo C retrocede desde un 36 % hasta menos de un 31 %. Los climas fríos (tipo D), localizados únicamente en las zonas más altas del Teide, se mantienen aproximadamente constantes en extensión salvo en la última década del periodo de estudio, disminuyendo de alrededor de un 0.2 % a poco más de un 0.1 %. Al aplicar las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall al caso de Canarias, resulta una tendencia creciente significativa al 1 % para el tipo B, y una tendencia decreciente significativa al 1 % para el tipo C, mientras que la tendencia decreciente del tipo D no resulta significativa al 5 %.

3.3. Evolución de la temperatura y la precipitación en el periodo de estudio

Para ayudar a interpretar los resultados del apartado anterior, se ha representado (figura 5) la evolución y la tendencia de la temperatura anual media y de la precipitación anual en cada una de las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020, valores que se han obtenido a partir de las rejillas utilizadas en el presente estudio.

En cuanto a la temperatura, 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, la cual resulta significativa al 1% en ambos casos al aplicar las pruebas de correlación de rango de Spearman y Kendall.

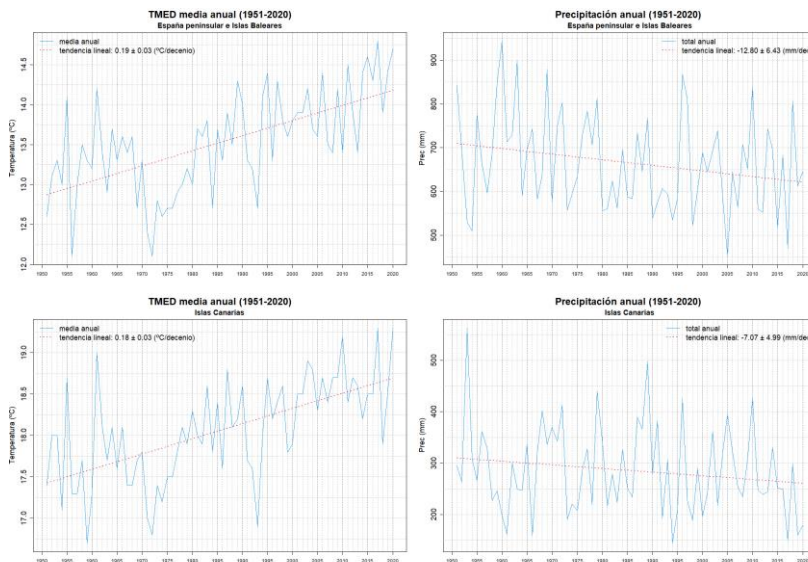


Fig. 5: Evolución y tendencia de la temperatura media anual y de la precipitación anual en las dos zonas de estudio en el periodo 1951-2020.

En cuanto a la precipitación, la otra variable considerada en la clasificación de Köppen-Geiger, se observa una ligera tendencia decreciente en el conjunto del periodo analizado, 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.

4. DISCUSIÓN

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, que son reemplazados a su vez por climas templados. 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), confirmando el acelerado declive de

los glaciares de montaña del Pirineo observado durante el final del siglo XX y la primera década del siglo XXI.

Estos resultados 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 (IPCC, 2021).

Teniendo en cuenta la tendencia creciente observada en la temperatura media en el periodo de estudio, significativa al 1%, 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 el avance observado es debido principalmente al significativo aumento experimentado por las temperaturas y, en menor medida, por 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 incremento 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.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

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](https://doi.org/10.31978/784-11-002-5)

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](https://doi.org/10.31978/281-12-006-X)

Beck, C., Grieser, J., Kotteck, 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

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](https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214)

- 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>
- Chazarra, A., Flórez, E., Peraza, B., Tohá, T., Lorenzo, B., Criado, E., Moreno, J.V., Romero, R., & Botey, R. (2018). Mapas climáticos de España (1981-2010) y ETo (1996-2010). Agencia Estatal de Meteorología. [doi:10.31978/014-18-004-2](https://doi.org/10.31978/014-18-004-2)
- 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](https://doi.org/10.31978/666-20-003-4)
- Chazarra, A., Lorenzo, B., Romero, R., Moreno, J.V. (en prensa). Evolución de los climas de Köppen en España en el periodo 1951-2020. Nota técnica. Agencia Estatal de Meteorología.
- Essenwanger, O. M. (2001). Classification of Climates (Vol. World Survey of Climatology 1C: General Climatology). (H. E. Landsberg, Ed.) Amsterdam: Elsevier.
- 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
- 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
- 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](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130)
- 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](https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007)
- 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](https://doi.org/10.3989/Pirineos.2017.172004)
- 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](https://doi.org/10.31978/666-20-006-0)
- 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