

TRABAJO DE FIN DE GRADO



**Universidad
de La Laguna**

GRADO EN FÍSICA

Estudio de la incidencia de episodios de calima en Canarias mediante modelos climáticos globales

Cristina Herrera Cruz

Tutores:

Albano José González Fernández

Francisco Javier Expósito Gonzáles

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis tutores Albano González y Francisco Expósito por el sacrificio que han hecho al aceptar aventurarse en este proyecto conmigo aún teniendo una gran carga de trabajo en este año académico.

A mis padres, por celebrar cada triunfo en estos años pero sobre todo por no permitirme rendirme nunca cuando las cosas no iban tan bien. A mis amigos que escucharon atentamente cada batalla contra los exámenes, en especial a aquellos que me vieron llorar de cansancio por fuera de las bibliotecas.

Por último y más importante, a mi abuela, que ha sido y será el mejor ejemplo a seguir en mi vida.

ABSTRACT

At present, the study of atmospheric aerosols has aroused great interest, especially in places where, due to their geographical location, there are many invasions. One example is the Canary Islands, which suffers episodes of desert dust from the African continent. These episodes, known as *calima*, affect the radiative balance and cloud formation, as well as influence human health and ecosystems.

The study of desert dust intrusions has evolved over the years thanks to advances in observational methods and numerical models. In the present study, the potential of the GCMs (Global Climate Models) of the new phase of CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), CMIP6, will be evaluated. For this purpose, the results of the simulations of these models will be compared with the observations of recent past years.

In particular, the only three models that have made daily data on dust concentrations available, i.e. IPSL, GFDL and MIROC6, will be used. These three models allow us the analysis of aerosol transport and generation through simulations.

For the observations, the data studied are from MERRA version 2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications). They are obtained from the reanalysis of space-based aerosol observations. For the simulated models and the observations we worked with column dust concentrations (kg m^{-2}) and in order to study the incidence of *calima* episodes the data associated with a focused grid point in the Canary Islands was chosen.

This study begins by studying the percentile associated with the concentration corresponding to an atmospheric aerosol episode, i.e. the 60th percentile. Once the percentile was determined, using the information on dust episodes provided by Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, the monthly mean column concentration, the number of days above the 60th percentile and the number of days above the 95th percentile were analysed for two periods: the historical period and the future period. The historical period is from 1980 to 2009 and the future period is divided into two, mid-century (2030-2059) and late century (2070-2099). In addition, the SSP (Shared Socioeconomic Pathways) scenarios from CMIP6 describing CO_2 concentrations in the future will be used for the future period.

So first of all, the monthly averages of dust column concentrations in the historical period for the three CMIP6 models and for the MERRA2 measurements are compared, which allows us to discard the IPSL model for future simulations, as its behaviour is quite far from the observed one. Then the monthly averages of dust column concentration in the future are analysed for the GFDL models in the SSP585 and SSP245 scenarios and MIROC6 in the SSP126, SSP245, SSP370 and SSP585 scenarios. Since a general increase in the monthly mean dust column concentrations is

observed, the number of days above the 60th and 95th percentile is studied to determine whether this increase is due to the increased intensity of the episodes or the duration of these intrusions.

For the historical period, the IPSL model does not represent the stationarity of the observations and the number of days above the 60th percentile is much higher than for the 95th percentile. Therefore, it can be said that the *calima* episodes were not too intense in the past. For the future, an increase in the number of days with dust intrusions is generally observed for the two selected CMIP6 models, which indicates that the increase in the monthly mean is due to the longer duration of the dust intrusions and, to a lesser extent, to the intensity. So, in order to obtain more information on this matter, this work was finalised by studying the future trends for MIROC and GFDL.

A study of the trends in annual dust column concentrations shows a gradual increase, which can be associated with more dust episodes as well as with an increase in intensity. Consequently, the trend in the number of annual days of extreme events (95th percentile) was analysed for both models and an increasing behaviour was observed. However, although the increase in desert aerosol concentrations can be related to the increase in the number of these episodes, a study of the average dust concentrations for the events in each year has been carried out. From this study, which turned out not to be statistically significant, it is possible to conclude that it cannot be considered an important cause for the growth of dust concentrations.

Finally, it can be concluded, in first place, that the potential of the MIROC and GFDL models is favourable and consequently they postulate to be good simulators for the future. Furthermore, the future increase in frequency and intensity of desert dust intrusions is evident, in particular for the worst-case scenario concerning CO₂ concentrations. Therefore, under the initial conditions and assumptions proposed, this work reflects the worsening of the *calima* episodes in the Canary Islands and stimulates contributing to the slowing down of climate change.

Índice

Introducción	6
Aerosoles atmosféricos	7
Modelos Climáticos Globales (GCM)	7
CMIP6	9
Objetivos	10
Datos y Metodología	11
Resultados	17
Media mensual de concentración de polvo en columnas	17
Percentiles y frecuencia de las intrusiones	20
Tendencias	24
Conclusiones	27
Referencias	28

1. Introducción

This section will discuss the importance of African dust intrusions in the Canary Islands and the repercussions they generate. Atmospheric aerosol and the methods that allow its study will be defined. In particular, the CMIP6 models used in this work and the future simulations that can be generated will be described. Finally, the objectives of this project will be presented.

A lo largo de los años, el estudio del transporte de aerosoles se ha relacionado con el balance radiativo en la atmósfera o la formación de nubes, basando su estudio en las condiciones meteorológicas que podrían provocar. En el presente, se ha prestado mucha más atención a su influencia sobre la salud humana y los ecosistemas, por lo que se ha convertido en un objetivo de estudio muy intenso en varios campos científicos.

No es una gran sorpresa saber que el papel de los aerosoles puede tener gran relevancia en cuanto al cambio climático se refiere ya que interaccionan con la radiación solar e infrarroja y modifican las propiedades de las nubes, aumentando el número de gotas de agua o partículas de hielo. Aunque todavía queden algunas cuestiones abiertas y sea bastante complicado evaluar cuantitativamente la repercusión total de los aerosoles, se conoce que los complejos mecanismos, directos e indirectos, de los aerosoles pueden tener efectos contrapuestos de enfriamiento y calentamiento sobre el clima [1]. En el último informe del Panel Intergubernamental contra el Cambio Climático (IPCC) se estima un forzamiento negativo, o de enfriamiento, de los aerosoles causados por actividad humana, entre 0 y 0.8°C. Incluso, con un grado de confianza medio, se ha estimado el incremento temporal del forzamiento radiativo durante el 2020 debido a los efectos de la pandemia COVID-19 y una menor emisión de aerosoles antrópicos, reduciendo su efecto de enfriamiento global [13].

El polvo mineral es el tipo de aerosol más abundante en la atmósfera. En los últimos estudios se ha estimado que las partículas de polvo atmosférico son mayores de lo que se consideraba hasta entonces, lo que conlleva una pequeña contribución al forzamiento radiativo. Actualmente existe un gran acuerdo en que las fuentes y cantidad de polvo atmosférico son sensibles al cambio climático, aunque las estimaciones cuantitativas de las emisiones de polvo debidas al mismo son aún muy difíciles de estimar [13].

En cuanto a los efectos sobre la salud, varios estudios apuntan a una mayor mortalidad e ingresos hospitalarios asociados a episodios en los que aumenta considerablemente la concentración de polvo atmosférico [14].

Canarias presenta un gran número de episodios de transporte de partículas procedentes de la zona desértica del Sahara, denominados episodios de calima, lo que la hace una gran candidata para el estudio del transporte de aerosoles.

1.1 Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera, con origen natural o antropogénico. La concentración de partículas en el aire puede ser mínima, unos pocos microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), o lo suficientemente alta para ser una atmósfera contaminada (entorno a los $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los aerosoles se reparten por la atmósfera pero frecuentan más la baja troposfera (0-5 km), y además la concentración cambia a grandes escalas en cuestión de periodos breves de tiempo o tramos espaciales [1].

La contaminación referente a los aerosoles atmosféricos, en concreto la referente al polvo del desierto, se ha convertido en un área de estudio debido a los efectos en el clima, la salud de las personas, la visibilidad, la agricultura, etc. La repercusión en la salud resulta evidente, las altas concentraciones de polvo imposibilitan respirar bien e incluso pueden llegar a provocar problemas cardíacos. Respecto a los efectos en el clima sabemos que existen dos tipos de interacciones, directa e indirecta. Los efectos directos de los episodios de calima se relacionan con la radiación solar (dispersión y absorción) mientras que los efectos indirectos participan más en la formación de nubes [2].

En cuanto al forzamiento radiativo por los aerosoles atmosféricos puede producir efectos de enfriamiento o calentamiento, dependiendo de la superficie donde se encuentren. Respecto a las superficies brillantes, más propias de las zonas desérticas, el polvo produce un calentamiento debido a la participación de ondas térmicas. Mientras que para las superficies oscuras (océano), hay una atenuación de la radiación lo que origina un efecto de enfriamiento [2].

Los efectos indirectos participan en un proceso de retroalimentación, el aerosol atmosférico actúa como núcleo de condensación en la formación de nubes, las cuales después figuran como fuente principal de la creación de material particulado que puede quedar en suspensión en la atmósfera. Por lo que el efecto en el tamaño de las gotas de nube podrá producir tanto enfriamiento como calentamiento, lo que depende de la altura de las nubes [1][2].

El estudio exhaustivo de los episodios de calima y los efectos causados durante estos últimos años ha sido posible por la mejora en las observaciones reales (medidas) y los modelos numéricos desarrollados. Estos últimos modelos se relacionan con los Modelos Climáticos Globales y han sido principales protagonistas en el estudio del clima.

1.2 Modelos Climáticos Globales (GCM)

Los Modelos Climáticos Globales, en inglés GCM, son representaciones matemáticas de los principales componentes del sistema climático. Estos componentes son principalmente el atmosférico (gases, nubes, aerosoles, ...), el de la superficie terrestre

(vegetación, nieve, ríos,...), el oceánico (corrientes, biogeoquímica, ...) y el del hielo marino (intercambios de agua y calor aire-mar). [3]

Para realizar las simulaciones climáticas un GCM divide la Tierra, incluyendo atmósfera y océanos, en cuadrículas tridimensionales donde cada uno de los componentes está caracterizado por un conjunto de variables de manera global, ya que se considera la evolución en el tiempo y las interacciones entre cuadrantes (flujo de calor, componentes y momento). La resolución de los datos recogidos dependen del tamaño de las cuadrículas y del espaciado, pero el aumento de la calidad requiere más potencia de cómputo. [3]

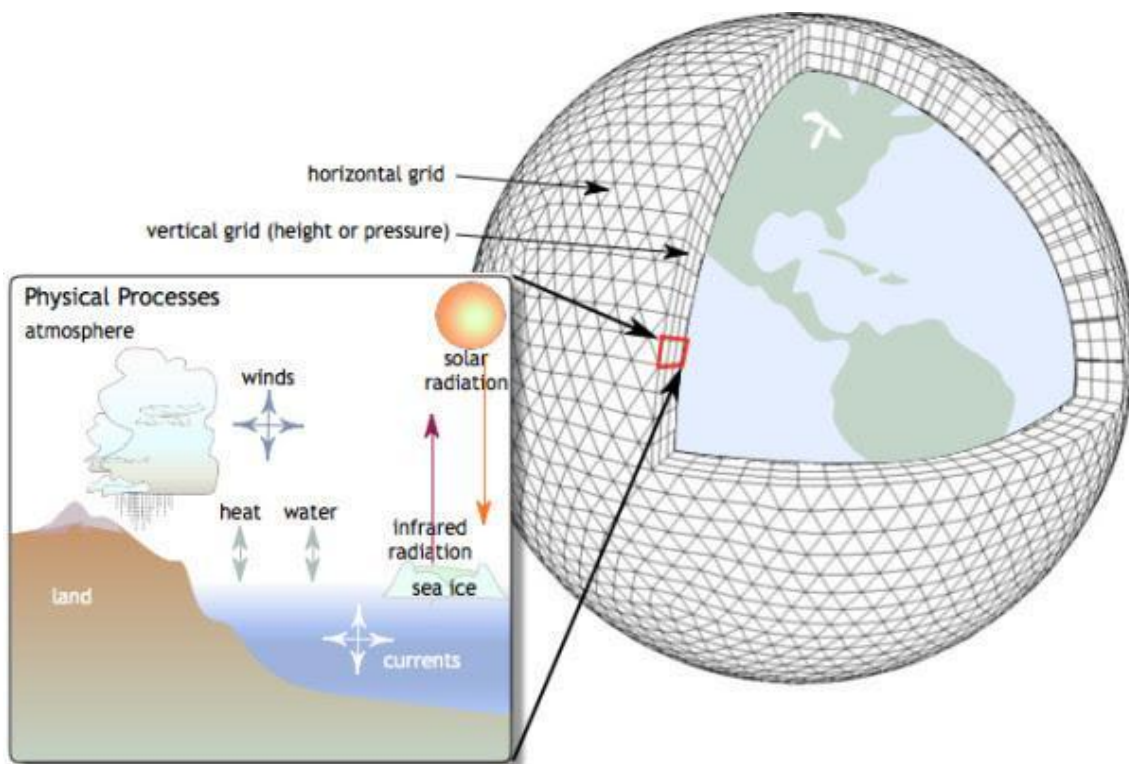


Figura 1. Representación de la división en cuadrículas tridimensionales de la Tierra (Fuente: Aitkin, D. (2016, 19 julio). *How useful are climate models? My perspective on climate change #7.* DON AITKIN. <http://donaitkin.com/how-useful-are-climate-models-my-perspective-on-climate-change-7/>)

Una vez realizada la división de la Tierra, existen dos tipos de procesos dentro de los modelos climáticos. Los primeros son los simulados explícitamente, los cuales son procesos que tienen lugar a escalas más grandes que el tamaño de la cuadrícula y pueden ser resueltos a partir de las ecuaciones de los principios físicos que los describen, como son los ciclones y tormentas. El segundo tipo, y el de nuestro interés, es el de los procesos parametrizados. Este tipo de procesos se producen en entornos más pequeños que la escala de la cuadrícula por lo que deben usarse parametrizaciones, usualmente basadas en evidencias empíricas. Uno de los procesos parametrizados es el de la composición de nubes y aerosoles. [3]

Aunque los modelos climáticos previos tuviesen bastantes problemas para capturar la variabilidad de los aerosoles, por ejemplo en el norte de África, los nuevos modelos ESM (Earth System Model), que consideran de forma más precisa las relaciones entre la vegetación y el clima, se acercan más a las tendencias observadas [13]. .

1.3 CMIP6

El CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) es un proyecto de intercomparación de modelos que buscan la comprensión de los cambios climáticos del pasado, presente y futuro. Mediante evaluaciones de los modelos en el periodo histórico, se establece la viabilidad del uso de los mismos en las simulaciones para proyecciones futuras , lo cual ha ido evolucionando a lo largo de los años en diferentes aspectos climáticos [4]. La mejora en los modelos climáticos participantes del CMIP en la resolución espacial y la inclusión del análisis de nuevos procesos físicos ha llevado a la nueva fase de CMIP [5].

Esta versión mejorada, llamada CMIP6, consta actualmente de 40 modelos desarrollados en diferentes países. Además de la suma de diferentes modelos, también hay un aumento en el número de experimentos realizados y posibles escenarios futuros estudiados. En particular, una de las novedades en el CMIP6 es la nueva definición de posibles escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles en el futuro [5]. Esta actividad llamada ScenariMIP (The Scenario Model Intercomparison Project) facilita una serie de escenarios que básicamente son proyecciones climáticas referentes a las concentraciones de aerosoles antropogénicos. En concreto, las proyecciones climáticas de CMIP6 se diferencian de la versión anterior ya que se introducen estos nuevos escenarios que se basan en “vías de desarrollo social”, SSP (Shared Socioeconomic Pathways) [6].

CMIP6 recomienda que cada modelo ejecute, como mínimo, cuatro escenarios englobados en el denominado Tier 1, los cuales representan las imágenes a futuro más generales tal y como se muestra en la **Fig.2**. Estos cuatro escenarios proporcionan distintos niveles de forzamiento radiativo y son SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585 [5][6].

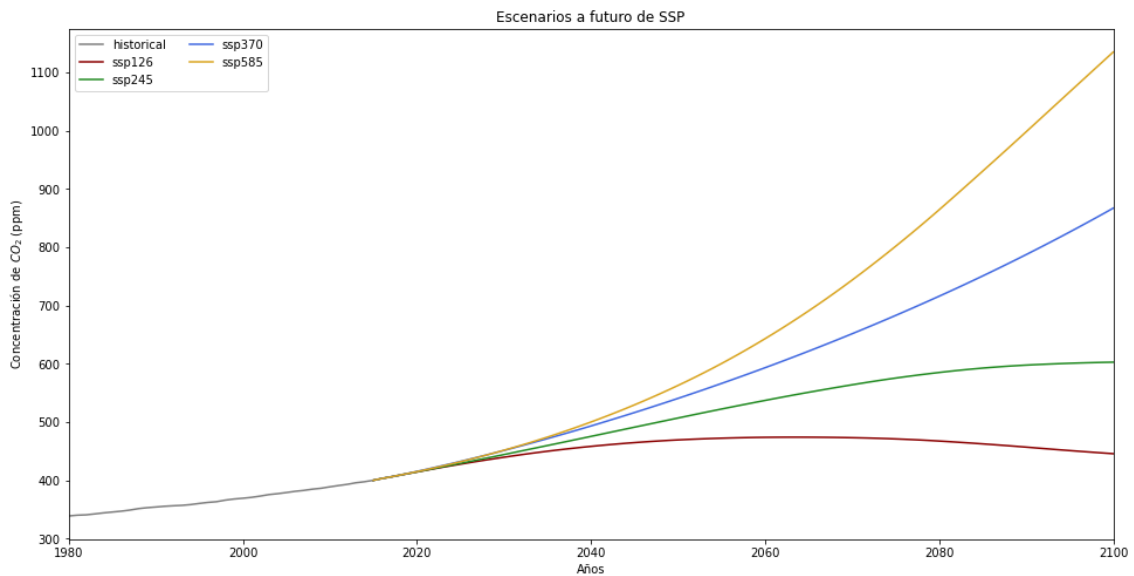


Figura 2. Representación de los escenarios a futuro del Tier1 de las concentraciones de CO₂.

El escenario SSP585 protagoniza el caso más extremo con emisiones considerables para generar un forzamiento radiativo entorno a los 8.5 Wm⁻² a finales de siglo mientras que el escenario SSP126 simboliza el mejor caso de vías de forzamiento futuras con una mayor cobertura forestal mundial que atenuará la contaminación atmosférica. Los escenarios SSP370 y SSP246 representan el nivel medio, en este caso con el escenario SSP246 con condiciones menos extremas del estado del suelo (superficie forestal) y del uso de aerosoles [6].

1.4 Objetivos

El objetivo final de este trabajo es evaluar los modelos climáticos globales del CMIP6 que analizan el transporte y la generación de aerosoles mediante simulaciones, y que proporcionan datos con una frecuencia diaria. Comparando estos modelos con observaciones en el pasado, se analizará la intensidad y frecuencia de los episodios de calima en Canarias y se estudiará con los modelos adecuados la evolución de las invasiones en el futuro. Para ello, se han realizado una serie de pasos que se especificarán en el siguiente apartado.

2 Datos y Metodología

This chapter will explain the extraction and the format of the data used in this work. In addition, the studied area, the periods in which the study was carried out and the guidelines followed for the study of the CMIP6 models will be detailed.

Para este estudio se necesitó dos tipos de datos, observaciones y simulaciones climáticas. Las observaciones son datos extraídos de la versión 2 de MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications). El reanálisis del clima proporciona una caracterización cuantitativa de los parámetros atmosféricos en periodos largos y para cualquier lugar de la Tierra, esto crea una gran base de datos que se procesan con mayor facilidad en la nube [7]. La nueva versión de MERRA ha sido la primera en introducir el reanálisis en las observaciones espaciales de aerosoles y trabaja con un sistema de rejilla que cubre la Tierra. Los datos proporcionados se ajustan a una cuadrícula de $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, lo cual corresponde a una resolución nominal de unos 60 x 55 km cerca del ecuador [8]. Concretamente, MERRA2 incluye procesos de asimilación del espesor óptico de aerosoles (AOD, aerosol optical depth) a partir de diversas fuentes, tanto terrestres (AERONET) como basadas en datos de satélites (principalmente radiómetros AVHRR, MODIS y MISR). Puesto que se va a trabajar sobre la incidencia del transporte de aerosoles en Canarias, se escoge una cuadrícula focalizada en Canarias donde el punto central se encuentra en las coordenadas (N 28.0° W 16.0°).

Con el dominio espacial ya definido, se seleccionaron los datos referentes a la variable DUCMASS (Dust Column Mass Density) cuyas unidades vienen dadas en kg m^{-2} . MERRA2 comprende datos desde 1980 hasta 2020, sin embargo, se escogerá solo datos para el periodo histórico que se definirá más adelante.

Los otros datos utilizados son simulaciones climáticas, en este caso, de modelos pertenecientes al CMIP6. Como se mencionó anteriormente, el CMIP6 trabaja con 40 modelos diferentes de 16 países, sin embargo sólo hay 3 modelos que han publicado valores diarios de la concentración de polvo atmosférico. Al igual que MERRA2, estos modelos trabajan en unidades de kg m^{-2} con una variable llamada *loaddust* (total dry mass of dust aerosol particles per unit area). Se ha trabajado con los 3 modelos descritos en la **Tabla 1**, los cuales emplean celdas más grandes que las de MERRA2, por lo que se eligieron celdas cercanas a la estudiada.

MODELO	Instituciones responsables	Resolución espacial	Referencia
GFDL-CM4	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	1.3°x1°	Held et al. (2019)[9]
IPSL-CM6 A-LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	2.5°x1.3°	Bonnet et al (2021)[10]
MIROC6	JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology), AORI (Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo), NIES (National Institute for Environmental Studies, Japan), and R-CCS (RIKEN Center for Computational Science, Japan)	1.4°x1.4°	Tatebe et al. (2019)[11]

Tabla 1. Información sobre los modelos que poseen valores diarios de las concentraciones de polvo atmosférico como el país y la resolución espacial.

En la **Fig.3** se representan las celdas elegidas para cada modelo, y se muestra que cada una contiene parte de la cuadrícula seleccionada para MERRA2 (rectángulo negro). Se descartó la idea de interpolar usando varias celdas de los modelos debido a la lejanía de algunas celdas así que se decidió coger cuadrículas del entorno, ya que las invasiones de polvo afectan de manera general en cualquier zona. Sin embargo, esto puede determinar pequeñas diferencias entre los diferentes modelos climáticos y entre los modelos y el reanálisis.

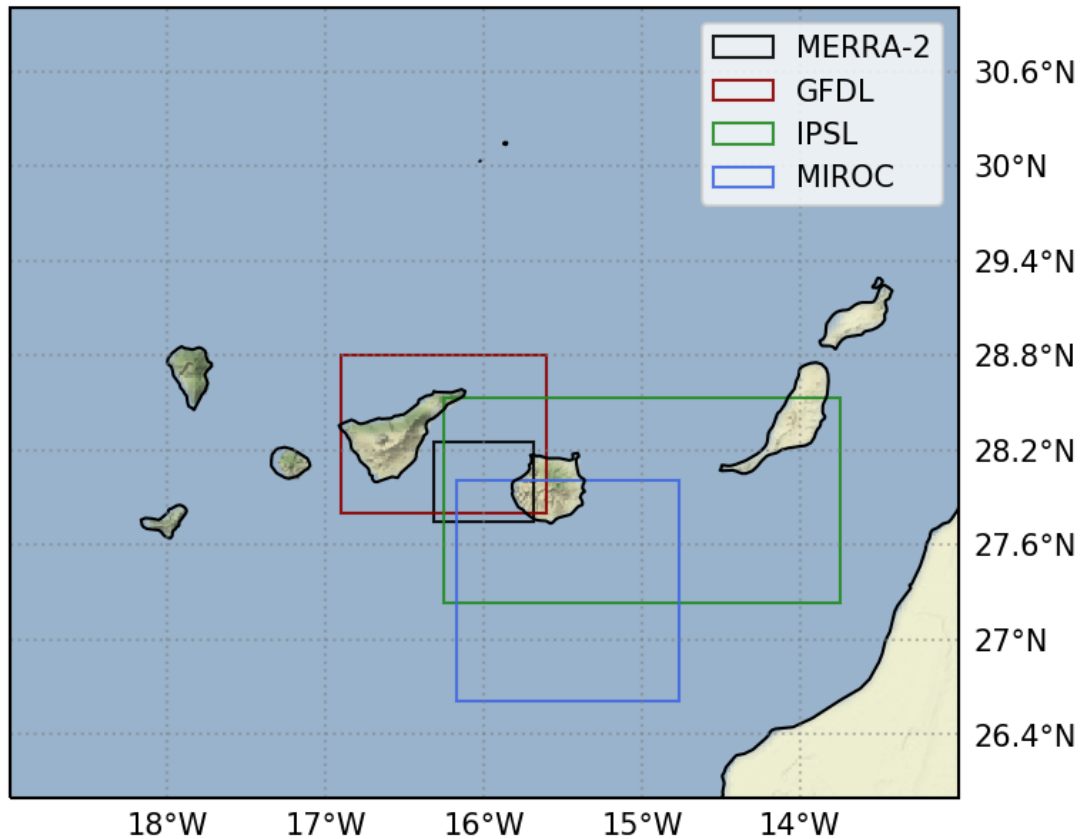


Figura 3. Representación de las cuadrículas seleccionadas para cada modelo de CMIP6 y MERRA2.

Una vez recopilados todos los datos, se debe determinar el valor límite para el que se considera que hay episodio de calima. Por lo que se trabaja con las observaciones obtenidas de MERRA2 y se comparan con la información sobre los episodios naturales de partículas que se producen según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Esta información viene proporcionada por el Gobierno mediante informes sobre los días del año en los que hubo cualquier tipo de transporte de aerosoles en España y se distribuyen en formato PDF, más concretamente en tablas, como la mostrada en la **Fig.4**. Sólo consta la existencia de estos informes para los años entre 2009 y 2020, por lo que se trabaja en ese periodo de 12 años, originándose tres ficheros de datos. El primer fichero contenía los datos calculados por el reanálisis facilitando la fecha y la medida de concentración de polvo, el segundo fichero contenía las fechas de los días en los que hubo un episodio de calima y el tercero recogía el resto de fechas.

4.10. OCTUBRE 2020

OCTUBRE 2020									
	CANARIAS	SUROESTE	SURESTE	LEVANTE	CENTRO	NOROESTE	NORTE	NORESTE	BALEARES
COMBUSTIÓN BIOMASA		7-20 30	20-24 31	1 16 18-24	9-24	19		16-17 29-30	
EUROPEO SULFATOS									
AFRICANOS	7-8 11-14 19-20 29-31	19-21	19-21	20-22	19-20	19	19-20	20-22	20-23

Figura 4. Tabla de días en los que hubo intrusiones de aerosoles en las diferentes zonas de España (Fuente: Episodios Naturales de Partículas 2020, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) [Disponible: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/anuales.aspx>])

Se englobó toda la información en un fichero donde se mostraba la fecha, la medida facilitada por MERRA2 y un número (0 o 1) representando cuándo hubo un episodio de calima o cuándo, por el contrario, no. Para determinar el valor límite, se ha realizado un histograma de las medidas de columna de polvo para los días que hubo un episodio de calima y para el resto de los días a lo largo de 12 años. En la **Fig.5** se observa que el mayor número de días considerados como sucesos significativos de transporte de partículas se encuentra entre 40-100 mg/m². Teniendo en cuenta que la concentración de días en los que no se considera que hay episodios de calima es baja y el solape de ambas representaciones, se estima que el valor límite se encuentra entre los 40-70 mg/m². Este valor correspondería al valor utilizado en España y Portugal, el cuál considera una intrusión de polvo africano cuando se supera el límite diario de 50 µg/m³ [2], que, como vemos no se expresa en concentraciones totales en la columna atmosférica sino en concentraciones en superficie.

Como resulta más conveniente trabajar con percentiles para facilitar la intercomparación de modelos, se calculó el percentil asociado a ese rango, obteniéndose el percentil 60. Es decir, analizando los datos del reanálisis y los avisos de intrusiones emitidos por el ministerio, se estima que los días de invasión corresponde a aquellos en los que se supera el percentil 60 de las concentraciones. Además se elige estudiar el percentil 95 para tratar los episodios extremos y obtener más información sobre el transporte de aerosoles en este tipo de situaciones.

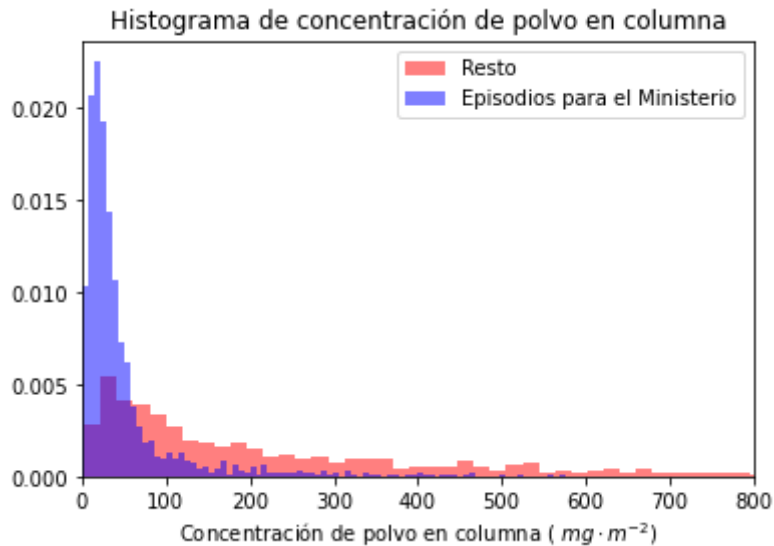


Figura 5. Histograma de las medidas de columnas de polvo en 12 años (2009-2020) para los episodios catalogados por el Ministerio (azul) y el resto de medidas recogidas por el modelo MERRA2 (rosa) .

Para determinar la frecuencia e intensidad de los episodios de calima se ha estudiado la concentración en columna media mensual, el número de días en los que se supera el percentil 60 y el número de días que superen el percentil 95. Los datos obtenidos de cada modelo se dividen en dos periodos: el histórico, que engloba desde los 1980-2009, y el futuro, que va desde 2030 a 2099. De acuerdo con el Reglamento Técnico de la Organización Meteorológica Mundial, se utilizan periodos de 30 años para determinar los valores climatológicos normales [12]. Por lo que finalmente se estudia tres periodos concretos:

- Histórico (1980-2009)
- Futuro:
 1. Mitad de siglo (2030-2059)
 2. Final de siglo (2070-2099)

Cabe destacar que para el periodo del futuro se tienen en cuenta los diferentes escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) ya descritos anteriormente, ya que las medidas cambian en relación a la situación atmosférica en que se encuentre la Tierra.

Una vez preparadas las condiciones del estudio, extraídos los datos y establecidos los periodos en el tiempo, se analiza en primer lugar la media mensual para el periodo histórico. Esto permite evaluar así el potencial de cada modelo implicado en CMIP6 comparado con las observaciones de MERRA2. Luego se realiza el cálculo de la media mensual para los dos periodos de futuro, despreciando aquellos modelos que disten mucho del MERRA2 en el pasado. Para completar el estudio se calculan los valores de los percentiles 60 y 95 para el periodo entre 1980-2009 y el número de días que superan dichos percentiles. A partir de los valores de los percentiles en el periodo histórico que

se resumen en la **Tabla 2**, se analiza a futuro en los dos periodos, el número de días que superan el percentil 60 y el 95 para los modelos de CMIP6 que funcionan mejor.

	MERRA	GFDL	IPSL11	IPSL1	MIROC1	MIROC2	MIROC5
Per60	72.97	26.20	258.15	258.15	7.77	7.29	7.61
Per95	637.74	451.31	482.18	482.18	165.63	164.71	154.82

Tabla 2. Valores de percentiles 60 y 95 de los diferentes modelos (MERRA, GFDL, IPSL11,IPSL1,MIROC1,MIROC2 Y MIROC5) para el periodo 1980-2009. Los números al final del nombre de cada modelo global indican las distintas realizaciones utilizadas.

Finalmente, se estudiará la tendencia de los valores promedio anuales para futuro representando la tendencia lineal de las distintas simulaciones, tanto para la media anual como para el número de días anuales de días por encima del percentil 95. Con todo esto, se podrá analizar el potencial de los modelos participantes en CMIP6 y se podrá estimar la situación a futuro dependiendo de cada escenario.

Todos los cálculos realizados y las representaciones que se expondrán posteriormente fueron computados en Python.

3 Resultados

In this chapter the results obtained for each study will be presented in graphs and tables. Starting with the monthly averages in the historical period, the CMIP6 models valid for future simulations will be chosen. In addition, the number of days above the 60th and 95th percentiles will be studied. Finally, the linear trends for the period from 2015-2100 of the selected models will be analysed.

A continuación se muestra el estudio referente a las medias mensuales, los percentiles 60 y 95 y la tendencia de los valores promedio anuales para el periodo histórico y para el periodo de futuro. Se procede a analizar el patrón de incidencias de los episodios de calima al año, la variación entre modelos del CMIP6 y MERRA2 y se realizará una evaluación global respecto al transporte de aerosoles tanto para el periodo de 1980-2009 como para el futuro.

3.1 Media mensual de concentración de polvo en columnas

Se comienza calculando la media mensual de concentración en columna para el primer periodo (1980-2009) de los modelos de CMIP6 y el MERRA2 y se representan en la misma gráfica los valores medios mensuales para que sea más fácil comparar los resultados. En la **Fig.6** se observa en primera instancia que el modelo IPSL es el que más se aleja de las observaciones reales mientras que el resto presenta una forma parecida en la gráfica. Esto conduce a descartar el modelo IPSL a futuro, ya que no refleja una imagen que pudiera ser real. Por una parte, estas diferencias pueden ser debidas a que la cuadrícula del IPSL coge más área de la seleccionada para el MERRA2, pero no es capaz tampoco de simular la estacionalidad, desplazando las concentraciones de polvo más altas del verano a los primeros meses del año. La media representada (línea amarilla) se realizó para los modelos GFDL; IPSL y MIROC6, por ello se aleja de las observaciones reales (línea negra).

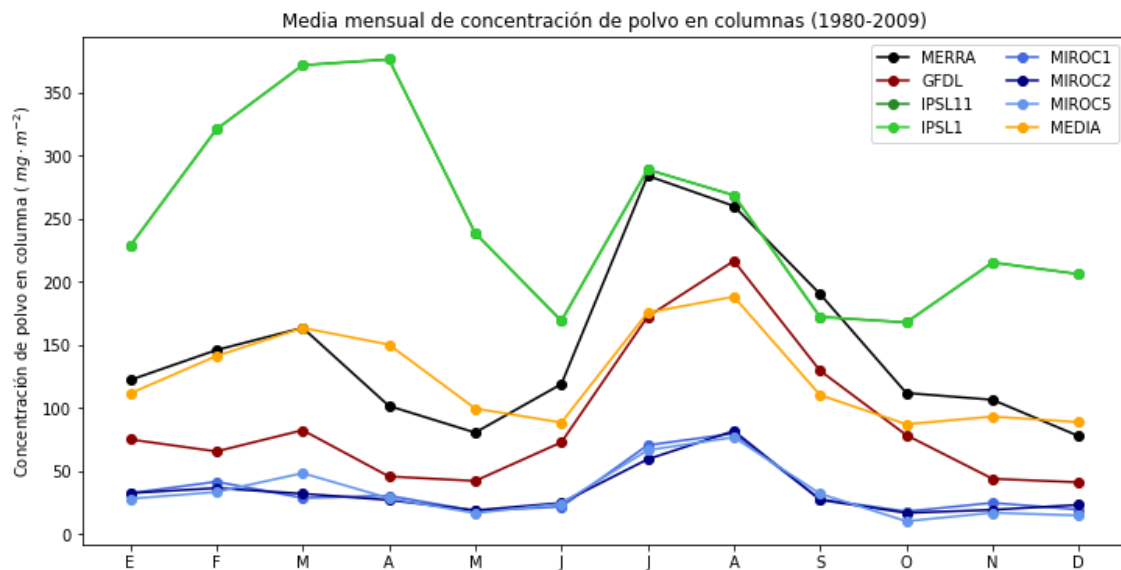


Figura 6. Representación de la media mensual para diferentes modelos (MERRA, GFDL, IPSL11, IPSL1, MIROC1, MIROC2 Y MIROC5) para 30 años (1980-2009).

Además se puede percibir que las mayores intrusiones de polvo ocurren en dos periodos, verano e invierno, lo que concuerda con lo esperado. Se conoce que en verano los episodios suelen ser menos intensos pero en periodos más largos, lo que hace que la media mensual sea mayor, mientras que en invierno los episodios son más intensos [2]. Los modelos GFDL y MIROC representan mucho mejor la estacionalidad que IPSL, proporcionando mayores valores medios en los meses de verano y mostrando un pico secundario en invierno. Aún así, los valores difieren de las observaciones, principalmente para el modelo MIROC, lo cual era esperable ya que, como se comentó en la introducción, los modelos presentan dificultades para lograr estimaciones cuantitativas precisas de las emisiones de polvo .

Una vez analizado el primer periodo, se analizaron las medias mensuales a futuro para los modelos GFDL y MIROC en los respectivos escenarios dados por CMIP6. En concreto, para el modelo MIROC se trabajó con los escenarios SSP126 (línea roja), SSP245 (línea verde), SSP370 (línea azul) y SSP585 (línea amarilla).

Se vuelve a apreciar que las estaciones con mayor concentración de polvo se corresponden con el verano y el invierno, tal y como se muestra en la Fig.7. Se observa un aumento general considerable en las medias, sobre todo para el verano. Particularmente a finales de siglo se observa que para el escenario SSP585 se triplica la concentración media mensual para el mes de Agosto. No extraña que el peor escenario corresponda con el SSP585, que está asociado con un forzamiento radiativo de unos 8.5 W m⁻² a finales de siglo [6].

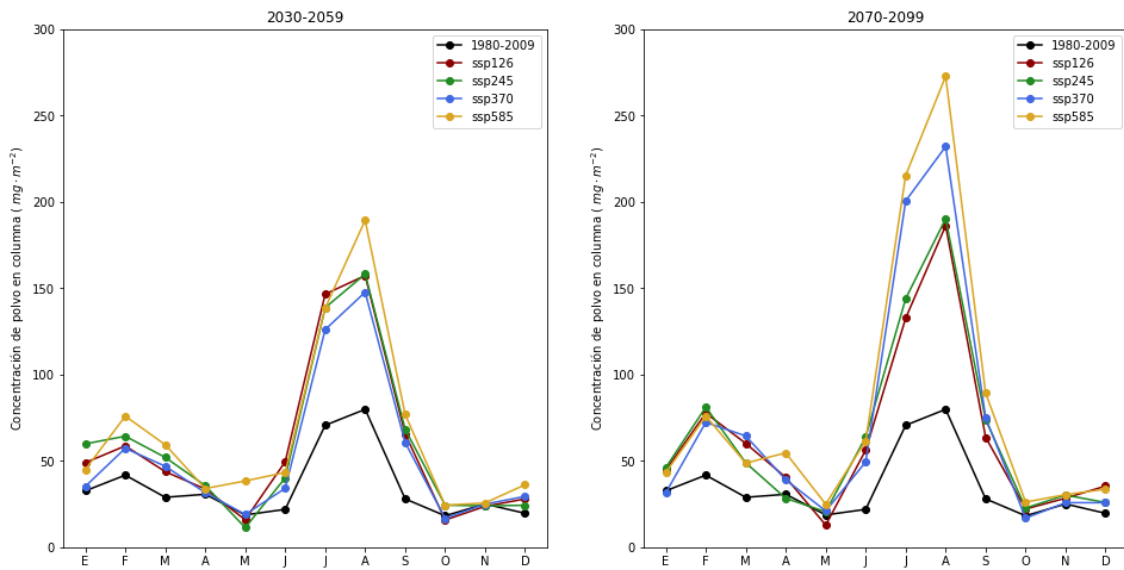


Figura 7. Representación de la media mensual en periodos de 30 años para los diferentes escenarios a futuro (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) del modelo MIROC6.

También se nota que los escenarios SSP126 y SSP245 son los dos escenarios que menos cambian para los dos periodos y los que coinciden en las medias mensuales, hecho justificado puesto que ambas son las situaciones más constantes en el tiempo tal y como se observaba en la **Fig.2**.

En el caso del modelo GFDL, sólo se pudo trabajar con los escenarios SSP245 y SSP585, a consecuencia de que eran los únicos disponibles. Al igual que para el MIROC, se vuelve a reflejar que los meses con más incidencia se corresponden a junio-agosto y febrero-marzo. Por otra parte, en la **Fig.8** es fácil apreciar el aumento de la media para los dos periodos, aun así es mayor el crecimiento para el verano.

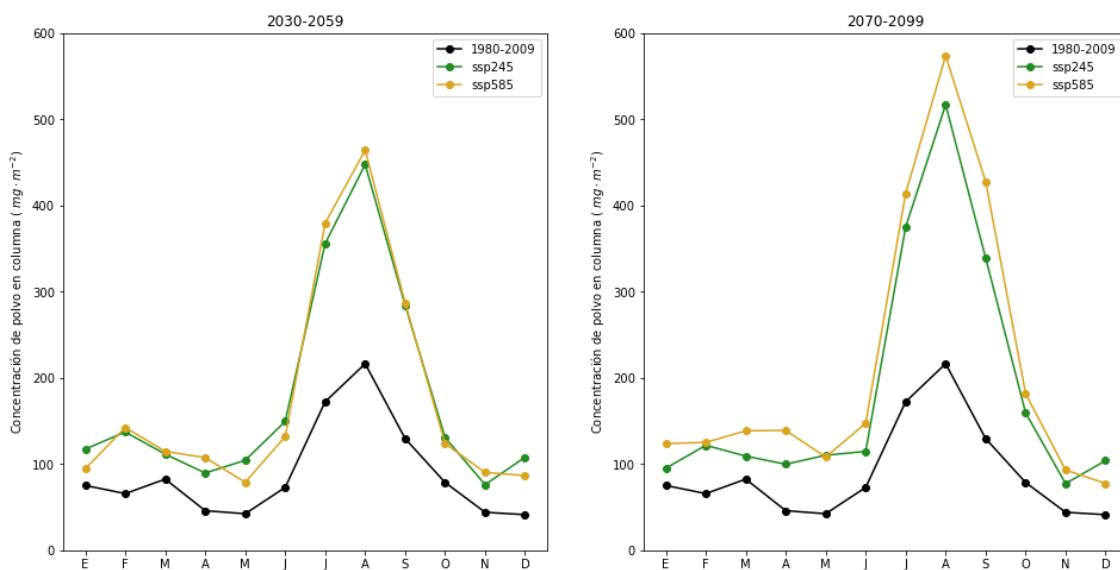


Figura 8. Representación de la media mensual en periodos de 30 años para los diferentes escenarios a futuro (SSP245, SSP585) del modelo GFDL.

Algo inusual de la gráfica es la casi superposición de los escenarios estudiados, considerando que uno representa la peor situación referente a la contaminación por gases de efecto invernadero y el otro una de las situaciones más estables. Más adelante se podrá explicar este fenómeno, cuando se estudie la tendencia a futuro de los modelos.

3.2 Percentiles y frecuencia de las intrusiones

El estudio de las medias mensuales permite tener una idea de la evolución de las incidencias de calima. Sin embargo, el aumento de las medias a futuro no denota si aumenta el número de episodios o si por el contrario la intensidad de cada uno de ellos. Por esta razón, se investiga el número de días por encima del percentil 60 (límite para determinar la concentración como la propia de un episodio destacable de aerosol atmosférico) y percentil 95 (casos extremos). Para el periodo histórico se vuelve a observar que el modelo IPSL se distancia de las observaciones, llegando incluso a estimar el pico más alto para el mes de abril o marzo como se muestra en la **Fig.9**. También es visible que el número de días por encima del percentil 60 es mucho mayor que para el percentil 95, lo cual nos indica que en general los episodios de calima no fueron demasiado intensos. Como contraste a la poca capacidad del modelo IPSL para representar la estacionalidad del número de episodios de polvo, los otros dos modelos predicen con gran exactitud la variabilidad mensual del número de días de calima sobre Canarias.

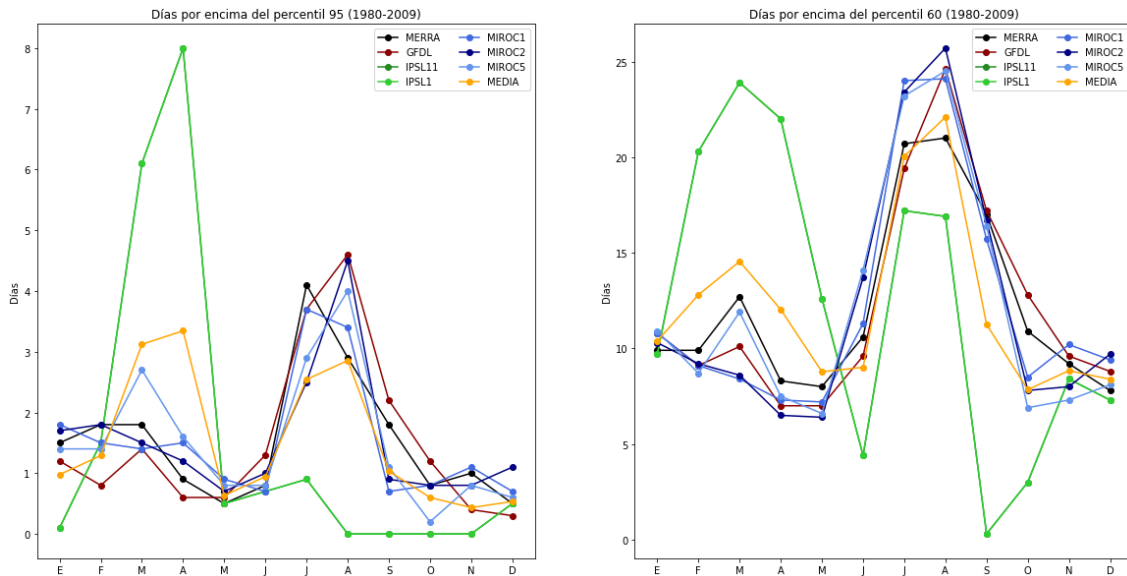


Figura 9. Representación del número de días por mes por encima del percentil 95 (caso extremo) y del percentil 60 para 30 años (1980-2009) para diferentes modelos (MERRA, GFDL, IPSL11, IPSL1, MIROC1, MIROC2 Y MIROC5).

Al igual que para la media mensual, trabajamos con los percentiles a futuro para los dos modelos que han presentado mejores resultados en el periodo histórico. En el caso del MIROC6 se continúan estudiando los escenarios SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585 para ambos percentiles. En la **Fig.10** se comprueba que a futuro el número de días por encima del percentil 60 es mayor que el del percentil 95 tanto para mediados de siglo como para finales. Esto indica que el incremento de la media mensual es debida al aumento de días con episodios de calima y, en todo caso, en menor medida por la intensidad de las intrusiones. Al igual que en el periodo histórico el máximo de días sucede en verano, especialmente para el mes de Agosto.

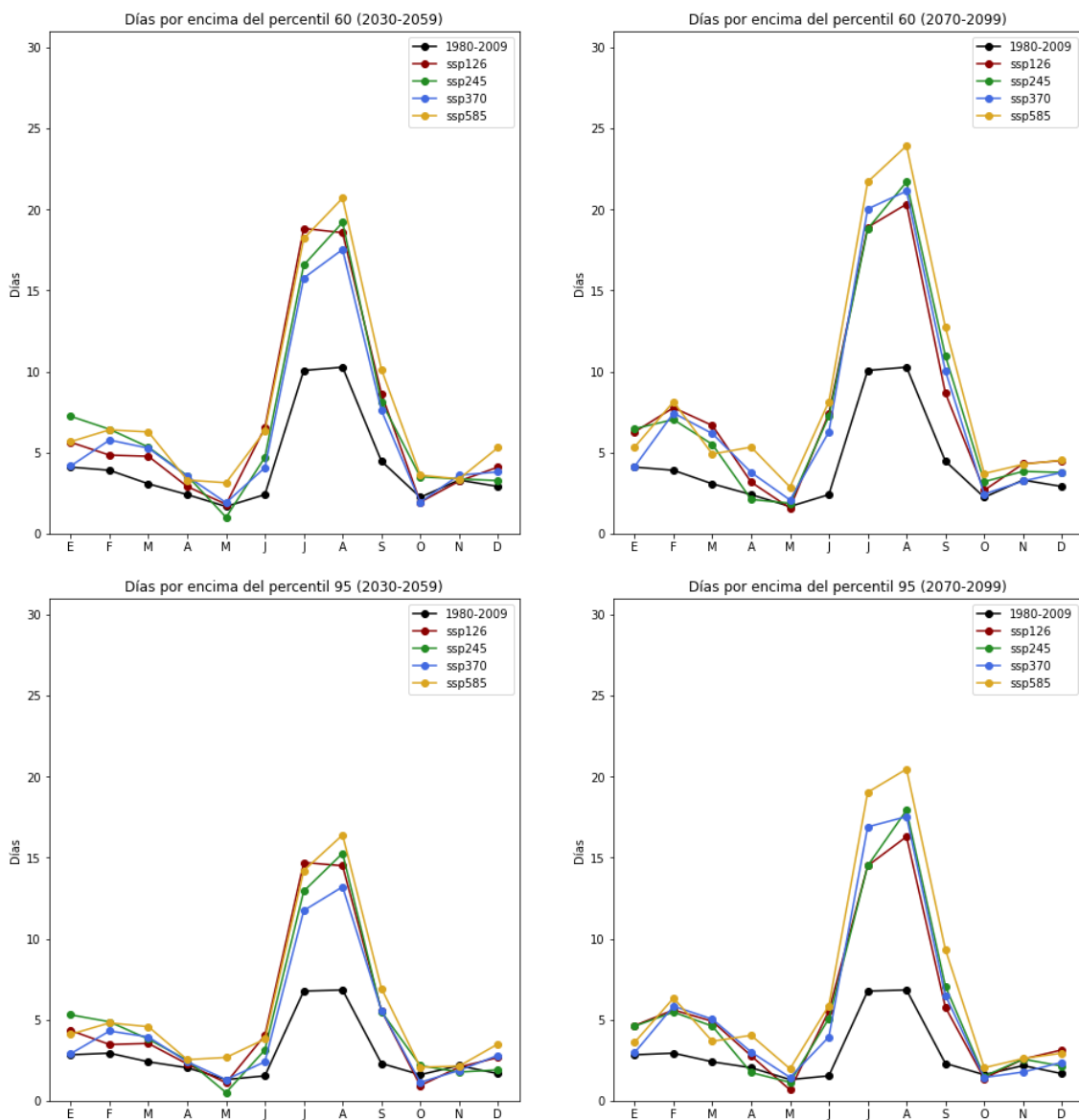


Figura 10. Representación del número de días por encima del percentil 60 y 95 en periodos de 30 años para diferentes escenarios a futuro (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585) del modelo MIROC6.

Respecto a las proyecciones, para los escenarios SSP126, SSP245 y SSP370 existe un pequeño solapamiento para varios meses, mientras que para el SSP585 se observa que a mediados de siglo se comporta como los demás escenarios pero para finales despunta teniendo valores más altos.

Para el modelo GFDL se usaron, como ya se mencionó anteriormente, los escenarios SSP245 y SSP585. En este caso, sorprendentemente se observa que el número de días que se supera el percentil 60 es similar al número de días que se supera el percentil 95. Particularmente, con una diferencia de 2 o 3 días para cada percentil. Se observa

nuevamente que el pico más alto corresponde al mes de Agosto. En la **Fig.11** se muestra que el número de días aumentará respecto al histórico y al igual que en la media mensual, ambos escenarios se superponen.

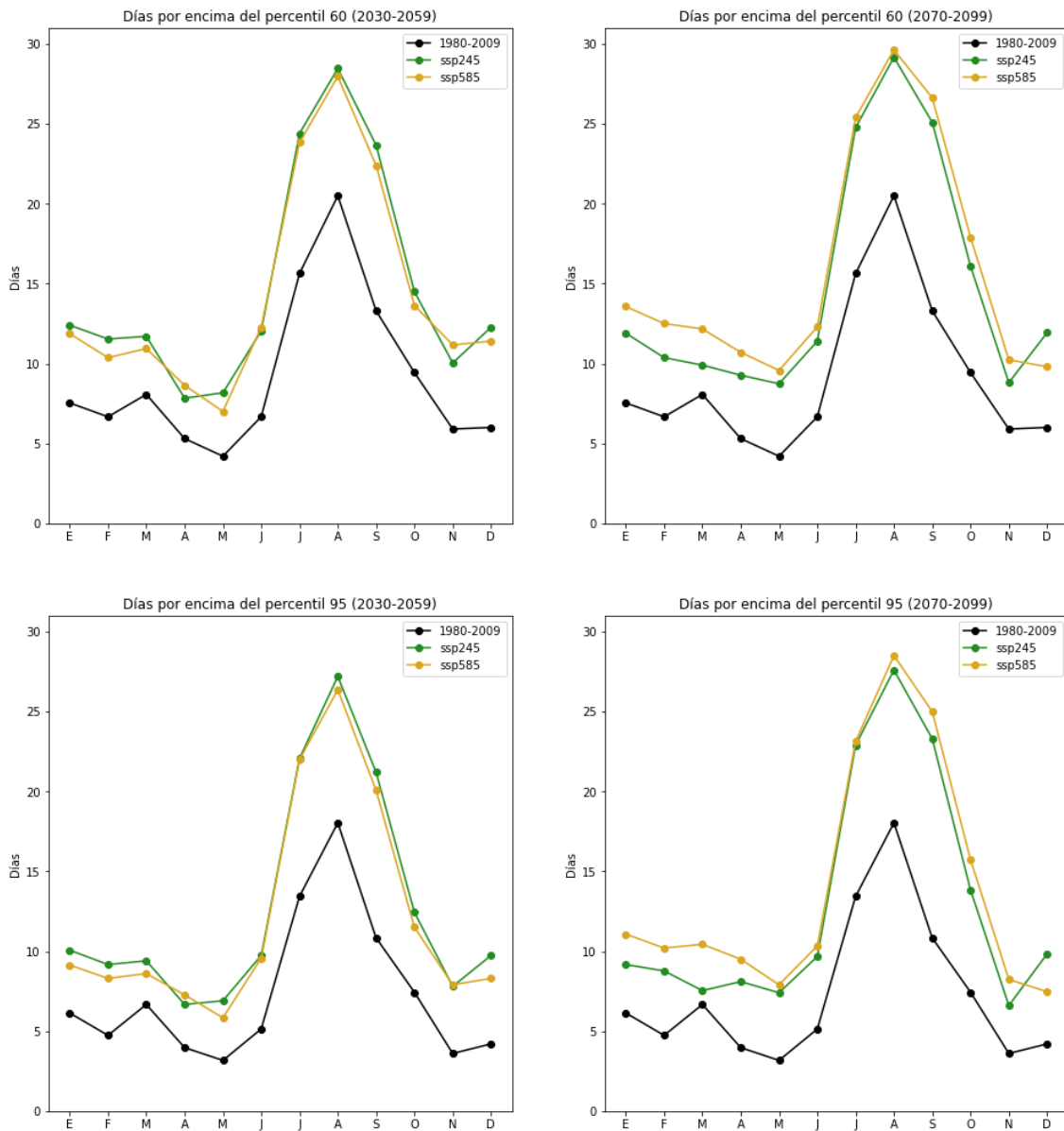


Figura 11. Representación del número de días por encima del percentil 60 y 95 en periodos de 30 años para diferentes escenarios a futuro (ssp245,ssp585) del modelo GFDL.

En general, para ambos modelos, se observa que para el futuro el número de días aumentará. Sin embargo, los cambios no son tan obvios por lo que se plantea el estudio de las tendencias a futuro para los modelos MIROC6 y GFDL.

3.3 Tendencias

Se calculan las tendencias lineales para las simulaciones a futuro de los modelos MIROC6 y GFDL, comenzando con la media de concentración de columnas de polvo para cada año. En la **Fig.12** se observa claramente que las líneas de tendencia tienen un comportamiento ascendente, lo cuál nos indica el aumento en las medias anuales. Para caracterizar con más precisión dichas tendencias, se detallan los valores obtenidos en la **Tabla 3**.

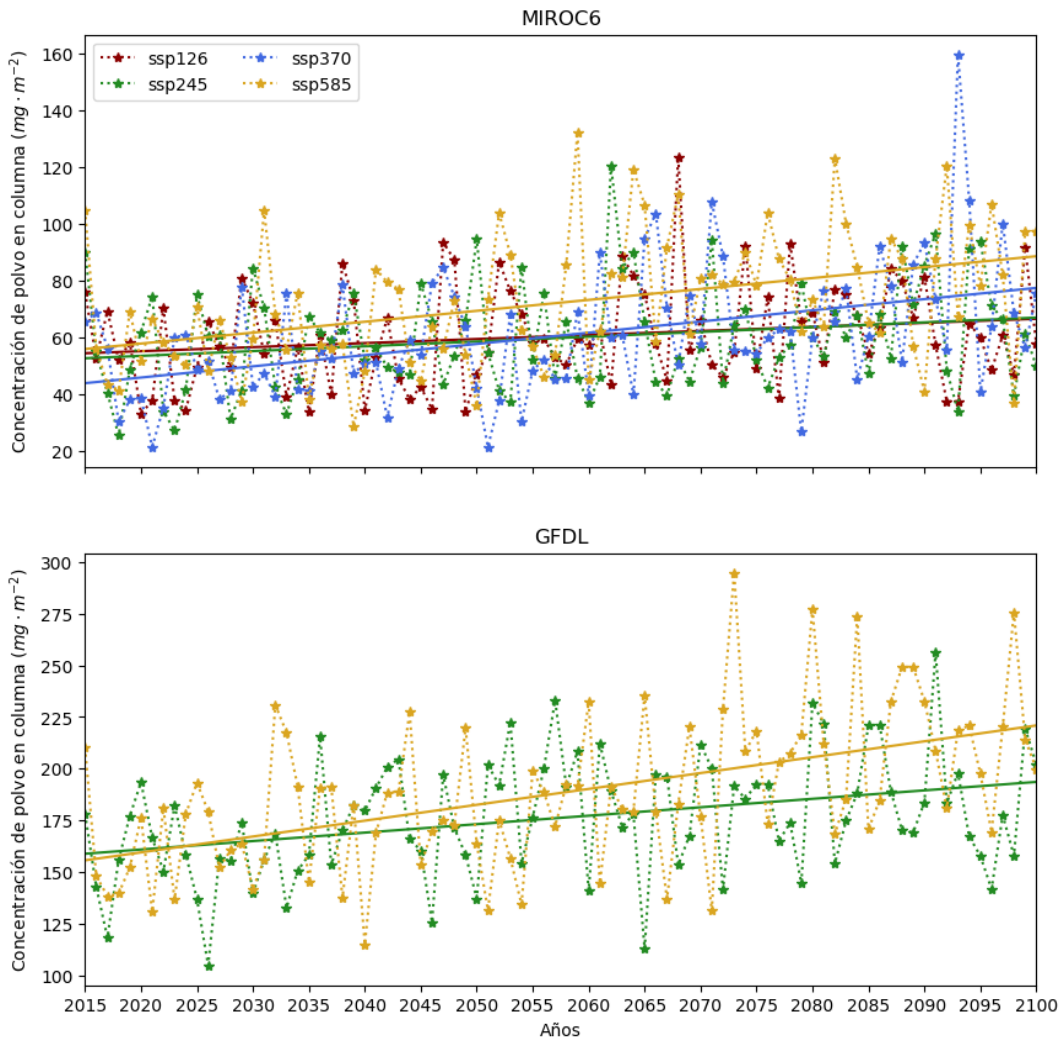


Figura 12. Representación gráfica de las tendencias lineales de la media anual de las concentraciones de polvo en los años (2015-2100) para los modelos MIROC6 y GFDL.

En la **Tabla 3** se confirma que para los escenarios con un incremento mayor de los gases de efecto invernadero las tendencias son claras y estadísticamente significativas. Se aprecia el aumento gradual de la concentración de polvo en la región seleccionada de Canarias.

Modelo\escenario	SSP126	SSP245	SSP370	SSP585
GFDL	-	4.1	-	7.8
MIROC	1.4*	1.7*	3.9	3.8

Tabla 3. Tendencias de las concentraciones de polvo en columna (mg/m^2) por década. Los valores señalados con asterisco indican aquellas tendencias que nos son estadísticamente significativas ($p \text{ valor} < 0.01$) mediante la prueba t de Student.

Este crecimiento podría asociarse tanto a la existencia de más episodios de polvo como al empeoramiento de la intensidad de cada uno de ellos. De ahí que se calcule la tendencia del número de días anuales de casos extremos para ambos modelos, el cuál se relaciona con el percentil 95. Tal y como sucedía para la media anual, en la **Fig.13** se puede observar la tendencia creciente para los días anuales extremos. Con mayor exactitud, se comprueba en la **Tabla 4** cómo el número de días aumenta para cada escenario.

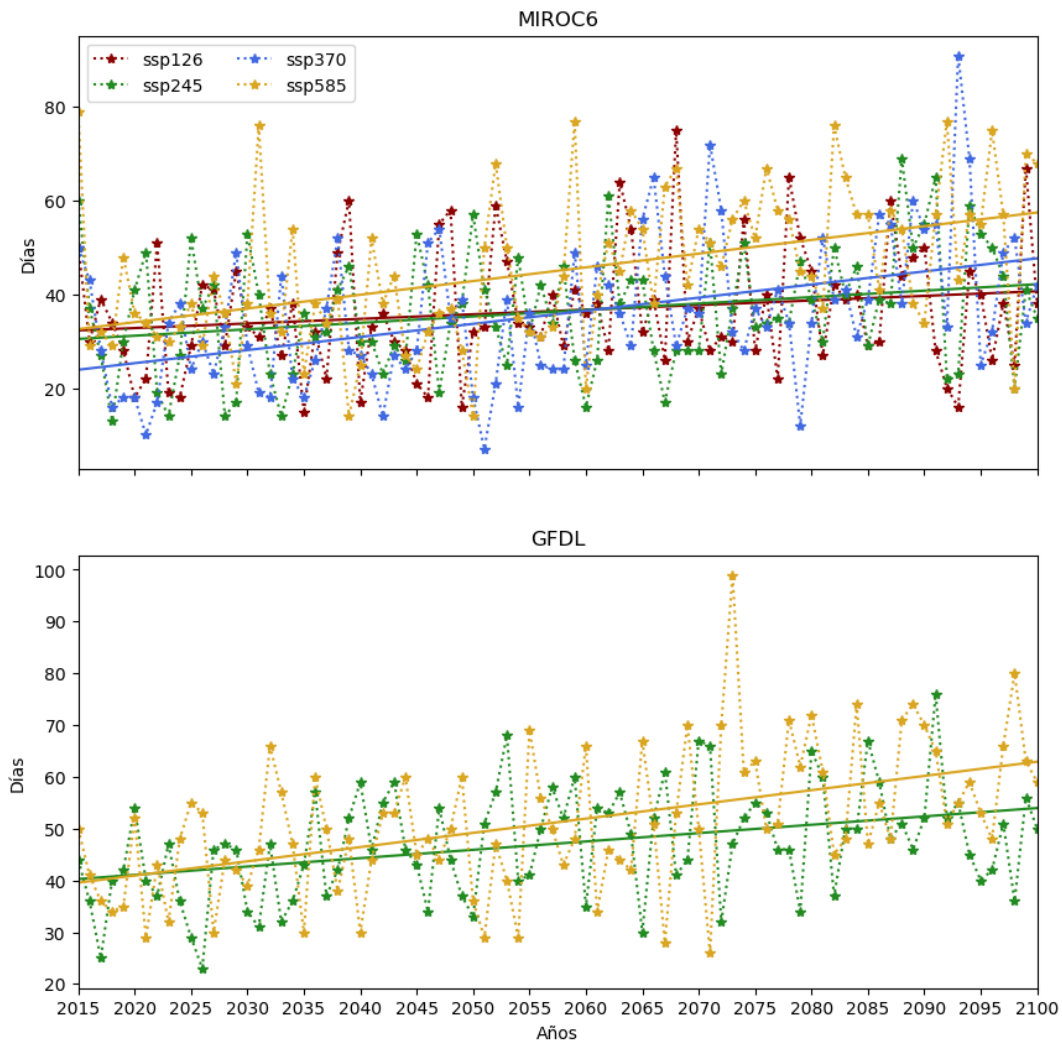


Figura 13. Representación gráfica de la tendencia lineal del número de días por año que superan el percentil 95.

En concreto, para el escenario intermedio SSP245 se estima un crecimiento aproximado de 1.5 días de episodios extremos por década y para el escenario más desfavorable la cifra se redondea en torno a 2.8 días más por década.

Si se relaciona con la media, se puede establecer el aumento de la concentración de polvo con el aumento del número de eventos peores. En cambio se ha comprobado si existe una tendencia en la intensidad de cada intrusión calculando la concentración de polvo promedio para todos los eventos extremos (per95) en cada año y aunque la tendencia es ligeramente positiva no es estadísticamente significativa para ninguno de los experimentos. En consecuencia, al contrario que con el número de eventos, no puede considerarse como una causa importante para el aumento de las concentraciones de polvo.

Modelo\escenario	SSP126	SSP245	SSP370	SSP585
GFDL	-	1.6	-	2.7
MIROC	1.0*	1.3*	2.8	2.9

Tabla 4. Tendencia en el número de días de invasiones de polvo extremas (per95) por décadas. Los valores con asterisco indican aquellas tendencias que no son estadísticamente significativas (p valor < 0.01) mediante la prueba t de Student.

4 Conclusiones

This chapter concludes the study of the potential of CMIP6 models. It summarises the final results and details possible errors in the work. Finally, it offers ideas for the further improvement of the study carried out in this work.

A modo de conclusión, se puede decir que se han evaluado, con gran eficiencia, los tres únicos modelos que por el momento han publicado valores diarios de la concentración en columna de polvo en el aire.

Comenzando con un amplio análisis de la concentración media mensual y del número de días por encima de los percentiles 60 y 95 en el periodo histórico, se pudo descartar el modelo que más se alejaba del reanálisis. En este caso, se despreció el modelo IPSL para las simulaciones a futuro y se trabajó con los modelos MIROC6 y GFDL para futuro en diferentes escenarios.

En los estudios referentes a futuro, se estimó, en conjunto, el aumento general de las medias de las concentraciones mensuales y del número de días por encima del percentil 60 y 95. Se calcularon las tendencias lineales anuales para poder determinar valores del incremento en décadas tanto para la concentración de polvo como para el número de días con intrusiones extremas. Cabe destacar que uno de los escenarios con resultados más preocupantes se corresponde al vinculado con altas concentraciones de CO₂.

Aunque se puede concluir la existencia de un incremento general de las intrusiones de polvo en Canarias, cabe resaltar que ambos modelos son simulaciones climáticas que llevan asociadas diversas incertidumbres. A esto se debe añadir el hecho de que no se seleccionó la misma zona de estudio para los modelos CMIP6 como para las observaciones de MERRA2, por lo que implica un error en los cálculos. Con todo esto se recalcan las condiciones de partida y las suposiciones realizadas durante el trabajo.

Además, el estudio realizado en este trabajo trataba datos respecto a columnas de polvo, por lo que resultaría de gran interés estudiar la localización en altura de dichas concentraciones de polvo. Una ampliación de este trabajo podría relacionarse con la influencia de este incremento de episodios de calima en Canarias con otros aspectos del cambio climático, la agricultura y las enfermedades respiratorias.

5 Referencias

1. Toledano Olmeda C. (2008) Los aerosoles atmosféricos y su influencia en la Península Ibérica. ACTA. p.9-20.
2. Alonso Perez, S. (2007) Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias. Dpto. de Física Básica, Universidad de La Laguna. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/2091>
3. *Climate Modeling – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*. (s. f.). GFDL. Recuperado 12 de agosto de 2021, de <https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/>
4. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016> , 2016
5. Harrison, T. (2021, 2 septiembre). *CMIP6: the next generation of climate models explained*. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained>
6. O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friendlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F. , Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K. and Sanderson, B.M.: The Scenarios Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9,3461-3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>, 2016
7. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (2021, 22 enero). *Climate reanalysis*. ECMWF. <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>
8. Ronald Gelaro, et al., 2017,, The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2), *J. Clim.*, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
9. Held IM, Guo H, Adcroft A, Dunne JP, Horowitz LW, Krasting J et al (2019) Structure and performance of GFDL's CM4.0 climate model. *J Adv Model Earth Syst.* <https://doi.org/10.1029/2019ms001829>
10. Bonnet, R., Boucher, O., Deshayes, J., Gastineau, G., Hourdin, F., Mignot, J., et al. (2021). Presentation and evaluation of the IPSL-CM6A-LR ensemble of

- extended historical simulations. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2021MS002565. <https://doi.org/10.1029/2021MS002565>
11. Tatebe H, Ogura T, Nitta T, Komuro Y, Ogochi K, Takemura T, Sudo K, Sekiguchi M, Abe M, Saito F, Chikira M, Watanabe S, Mori M, Hirota N, Kawatani Y, Mochizuki T, Yoshimura K, Takata K, O'ishi R, Yamazaki D, Suzuki T, Kurogi M, Kataoka T, Watanabe M, Kimoto M (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci Model Dev* 12:2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
 12. de Meteorología, A.-A. E. (s. f.). ▷ *Definición de Periodo de referencia en. Meteoglosario Visual*. Recuperado 23 de agosto de 2021, de https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/683_periodo-de-referencia
 13. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
 14. Domínguez-Rodríguez, A.; Baez-Ferrer, N.; Rodríguez, S.; Abreu-González, P.; Harmand, M.G.C.; Amarnani-Amarnani, V.; Cuevas, E.; Consuegra-Sánchez, L.; Alonso-Pérez, S.; Avanzas, P.; et al. Impact of exposure of emergency patients with acute heart failure to atmospheric Saharan desert dust. *Emergencias* 2019, 31, 161–166.