

DOI: <http://dx.doi.org/10.30827/cuadgeo.v57i2.5934>DORTA, P. *et al.* (2018). El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental
Cuadernos Geográficos 57(2), 27-52

27

El calentamiento global en el Atlántico Norte Suroriental. El caso de Canarias. Estado de la cuestión y perspectivas de futuro

PEDRO DORTA ANTEQUERA¹ ✉ | ABEL LÓPEZ DÍEZ² | JAIME DÍAZ PACHECO³

Recibido: 18/04/2017 | Aceptado: 09/12/2017

Resumen

El archipiélago canario se encuentra en una región de gran interés desde una perspectiva climática, formando parte de la Macaronesia, en el Atlántico Norte Suroriental. Se trata de un espacio geográfico insular con escasa información meteorológica, especialmente en cuanto a la longitud de las series. No es hasta época muy reciente cuando comienzan a aparecer las primeras publicaciones que analizan esos datos y que complementan a los modelos globales existentes. El estudio de esos trabajos publicados y de datos de eventos extremos analizados, corroboran cambios relevantes en algunos de los elementos del clima más característicos, sobre todo la temperatura, que manifiesta un nítido ascenso y la precipitación, en menor medida, con un descenso poco significativo. Además también se analizan cambios en algunos otros parámetros como la presión, la humedad relativa, el viento y las advecciones de origen sahariano. Finalmente, se lleva cabo un análisis de eventos extremos entre los que destacan los de rasgos tropicales, lo que permite inferir un futuro con probable presencia de eventos propios de espacios de rasgos claramente tropicales, por ejemplo las lluvias estivales o las tormentas y ciclones tropicales.

Palabras clave: cambio climático; Islas Canarias; riesgos climáticos; eventos extremos; resiliencia; Macaronesia.

Abstract

The global warming in the Southeast region of the North Atlantic Ocean. The case of Canary Islands. State of the art and further perspectives

The Canary Islands are located in a climatic region of interest, being part of Macaronesia in the Southeast zone of the North Atlantic Ocean. It is a geographic area composed by islands where the meteorological information is scarce, particularly on the length of the available time series. The scientific publications which started to analyse this data had not appear until very recently as supplement of the existent global models. An overview of these works and the analysis of extreme events have allowed validating relevant changes on some of the climate elements, mainly the temperature which manifests a well-defined increase; and also the rainfall but in a minor degree. Moreover, increments on the sea level and changes in parameters like the pressure, the relative wet, the wind, and the Saharan dust advections are showed. Finally, an analysis on tropical events allows inferring a likely future of climatic tropical features as summer rainfall or tropical storms.

Key words: Climate change; Canary Islands; climate risks; extreme events; resilience; Macaronesia.

1. Cátedra «Reducción del Riesgo de Desastres. Ciudades Resilientes» Universidad de La Laguna. pdorta@ull.es

2. Cátedra «Reducción del Riesgo de Desastres. Ciudades Resilientes» Universidad de La Laguna. alopezd@ull.es

3. Cátedra «Reducción del Riesgo de Desastres. Ciudades Resilientes» Universidad de La Laguna. jdiazpac@ull.es

Résumé

Le réchauffement climatique dans le sud-est de l'Atlantique Nord. Le cas des Îles Canaries. État de la question et perspectives d'avenir

L'archipel est situé dans une région d'un grand intérêt du point de vue climatique, une partie de la Macaronésie, dans l'Atlantique Nord-Est. Il est une île avec peu de temps de l'espace géographique, en particulier en ce qui concerne la durée de la série. Non, jusqu'à très récemment quand ils commencent à apparaître les premières publications analysant les données et modèles complémentaires mondiaux existants. L'étude de ces travaux et les données publiées d'événements extrêmes analysés, confirmer des changements significatifs dans certains des éléments climatiques les plus caractéristiques, en particulier la température, présentant augmentation des précipitations et forte, dans une moindre mesure, une diminution insignifiante. De plus les changements sont également discutés dans certains autres paramètres tels que la pression, l'humidité relative, le vent et advection d'origine saharienne. Enfin, il a procédé à une analyse des événements extrêmes parmi lesquels les caractéristiques tropicales qui nous permet de conclure à un avenir avec la présence probable d'espaces propres événements clairement les caractéristiques tropicales, telles que les pluies d'été ou les tempêtes et les cyclones tropicaux.

Mots-clés: changement climatique; Îles Canaries; risques climatiques; événements extrêmes; résilience; Macaronésie.

1. Introducción

Desde 1990, año en que se publicó el primer informe del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), tras miles de artículos y cinco informes publicados resulta tan evidente que el calentamiento del planeta es una realidad como que la actividad humana es responsable del ello (Cook *et al.*, 2013; IPCC, 2013). No obstante, los primeros modelos climáticos de los años 90 tenían una resolución espacial baja y el *downscaling* o regionalización climática se convirtió en una prioridad que ha hecho que, en los últimos años, las rejillas espaciales de análisis se hayan reducido considerablemente permitiendo estudios de mayor detalle. Además, las investigaciones a escala local, con datos homogeneizados de estaciones meteorológicas calibradas y evaluadas, han supuesto la fase más reciente en cuanto al análisis más directo del territorio y la corroboración de los grandes modelos globales. En este sentido, las islas de pequeñas dimensiones siempre han quedado al margen de estos modelos generales, precisamente por su reducido tamaño, aunque algunas de ellas sean las primeras y las más afectadas por el calentamiento (Albert *et al.*, 2016; Petzold *et al.*, 2015).

Por otra parte, los archipiélagos de la Macaronesia muestran, en general, un complejo relieve que hace aún más problemática, si cabe, la aplicación de esos modelos globales, por lo que resulta esencial analizar el territorio con mucho mayor detalle, especialmente en cuanto a la precipitación (Expósito *et al.*, 2015).

En este artículo, se tendrá ocasión de comprobar que los datos reales de detalle de estaciones meteorológicas y no únicamente de los modelos en el Atlántico Norte Suroriental en el que se encuentra el archipiélago canario, ponen de manifiesto que esta región no sólo no es ajena al calentamiento, sino que, en algunos casos, muestra cambios relevantes. Como se verá, diversas publicaciones constatan el aumento térmico generalizado. Los análisis pluviométricos, aunque

más difíciles de realizar por la gran irregularidad de las precipitaciones en las islas, también comienzan a sugerir, débilmente, cambios en los patrones de circulación, con una mayor concentración de la misma y una probable, aunque poco significativa, disminución del total de lluvias. Por último, también se han detectado cambios en algunas otras variables como la humedad relativa o la evapotranspiración.

Al mismo tiempo, en época reciente, se han producido en Canarias, y en la Macaronesia, en general, una serie de fenómenos meteorológicos extremos con graves consecuencias en cuanto a daños económicos y víctimas. Es muy probable que algunos de estos eventos puedan estar influenciados por el citado calentamiento.

En este contexto, los estudios sobre islas pequeñas, y sobre la Macaronesia en particular, tienen un gran interés como laboratorios en cuanto a procesos de mitigación y adaptación, así como al desarrollo de la resiliencia frente al cambio climático (Tomé, *et al.*, 2014; Petzold y Ratter, 2015). Como es sabido, los espacios insulares suelen compartir una gran biodiversidad y sistemas económicos similares con una fuerte dependencia del exterior (abastecimiento de todo tipo, energía etc.). El turismo es uno de sus principales pilares económicos, con un peso muy destacado en su PIB, actividad que depende, a su vez, de los combustibles fósiles para trasladar a los potenciales turistas hasta las islas. Por su parte, los turistas presentan un consumo elevado de recursos, superior a la población residente y se trata, en buena medida, de visitantes extranjeros de procedencia lejana (Esteba Talaya *et al.*, 2005). El gasto energético también suele ser más alto, como lo demuestran, por ejemplo, las emisiones de CO₂ per cápita en Canarias, que superan a la media nacional⁴, aún con una renta por habitante inferior, por lo que las medidas de mitigación igualmente podrían tener consecuencias importantes sobre el desarrollo de las islas

Por todo ello, los espacios insulares son más vulnerables ante un escenario de calentamiento global constituyendo, probablemente, la mayor amenaza potencial para las islas pequeñas (Petzold y Ratter, 2015), como es el caso de Canarias y el resto de los archipiélagos de la Macaronesia. Resulta crucial, por consiguiente, valorar el cambio climático en esta región.

En esta línea, para poder evaluar y mostrar la magnitud del cambio climático en Canarias se expondrán, en un primer apartado, los objetivos, fuentes y el método utilizado, posteriormente el contexto geográfico y climático, luego la discusión sobre cuáles son las evidencias y la magnitud de los cambios detectados, a continuación, las proyecciones de futuro y, por último, las principales conclusiones.

2. Metodología

El objetivo principal de este artículo es mostrar la realidad más reciente sobre el calentamiento global en la región de Canarias y, por extensión, el Atlántico Norte Suroriental, representado, en cierta medida, por la Macaronesia. Para ello se tendrán en cuenta las principales conclusiones a las que llega la bibliografía especializada, así como algunos nuevos datos que complementan dichos estudios. Para ello se expone el estado de la cuestión en el archipiélago y su contexto geográfico con la información más reciente. Como objetivo secundario también se plantea mostrar las principales ideas que reflejan algunos de los modelos generales de proyección futura. Con este

4. En 2014 la media de emisiones de CO₂ de las CCAA en España es de 138,12 eq (kt) per cápita y la de Canarias es 162,07 eq (kt) per capita. Calculado a través de cifras de población del padrón (INE, 2014) y el inventario de toneladas de emisiones equivalentes (MAPAMA, 2014).

fin se analizará, con exhaustividad, como primera fuente del trabajo, la bibliografía publicada hasta la actualidad que, de alguna u otra manera, analice cuestiones climáticas relacionadas con el calentamiento en el área de estudio y sus proyecciones futuras. En este sentido, las publicaciones muestran las principales tendencias en los elementos del clima de manera pormenorizada pero muy dispersa.

Además, junto a los resultados de los citados trabajos, se mostrarán algunos nuevos datos, especialmente en relación a los fenómenos meteorológicos de rango extraordinario que también contribuyen a evaluar el cambio y sus consecuencias, complementando así las aseveraciones señaladas por las publicaciones. Para ello se utilizarán las bases de datos de las estaciones meteorológicas de la red principal de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) con el tratamiento estadístico de algunos de los valores extremos y las tendencias de los mismos. Para el análisis de eventos extremos concretos se empleará, también, la información meteorológica de los archipiélagos de Azores y Madeira extraídas del Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) y del Centro Nacional para la Información Ambiental y la base de datos de huracanes de la NOAA. El análisis general de los territorios de la Macaronesia pretende dar consistencia científica a las conclusiones puesto que así se corroboran los datos de Canarias y se constata el calentamiento en el contexto de una región mucho más amplia.

De esta manera se analizará, en primer lugar, la temperatura, en segundo lugar la precipitación, en tercer lugar algunos otros parámetros climáticos (presión, humedad relativa, etc.), y, por último, los eventos extremos.

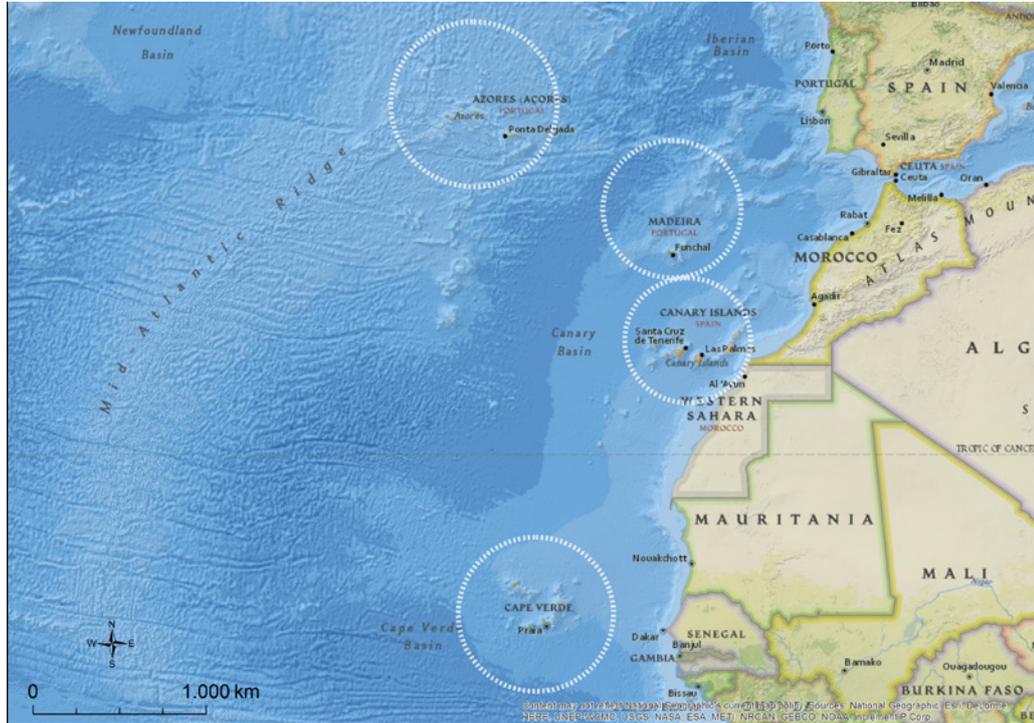
2.1. Contexto geográfico y climático

El área principal de estudio es el archipiélago canario aunque, como se ha señalado, se extenderán algunas conclusiones al resto de la Macaronesia. Esta región, engloba a cinco archipiélagos que pertenecen a tres naciones diferentes con más de 40 islas e islotes (Figura 1). Presentan similitud geológica, al tratarse de islas volcánicas de relieve complejo y biogeografía muy variada, tanto en cuanto a flora como a fauna, además de contar con un elevado número de endemismos (Fernández Palacios *et al.*, 2011). Esa rica biodiversidad es resultado de unos rasgos climáticos, en cierta medida, parecidos. En general, se trata de regiones subtropicales bañadas por aguas relativamente frías. Las islas más septentrionales son más frías y lluviosas y las más meridionales más cálidas y secas. Todas, así como el vecino litoral africano, poseen rasgos térmicos muy suaves debido a la gran influencia oceánica. Asimismo, es un espacio geográfico de transición entre el mundo templado y el cálido tropical. No obstante, observadas estas similitudes, es preciso citar algunas diferencias sustanciales, destacando que el archipiélago de Cabo Verde muestra rasgos climáticos sensiblemente distintos al resto de la Macaronesia. Éste registra temperaturas notablemente más cálidas y, sobre todo, un régimen pluviométrico típicamente tropical con un máximo estival, frente al resto del territorio (Azores, Madeira, Salvajes y Canarias), con un máximo netamente invernal con un régimen pluviométrico análogo al de las regiones mediterráneas. En todos los casos el relieve determina el reparto espacial de las precipitaciones.

Es importante señalar, además, la compleja estructura vertical de la troposfera en la región y, en especial en Canarias, debido a la presencia constante de una inversión térmica que genera dos ambientes climáticos bien diferenciados. La capa superficial con un espesor medio de 1250 m (Dorta, 1996) influenciada por el océano y la circulación de los vientos alisios y el estrato por encima de la inversión gobernado predominantemente por la circulación general que, dependiendo

de la altitud es de entre el cuarto y tercer cuadrante (Martín *et al.*, 2012). Esta estructura resulta determinante para cualquier análisis climático puesto que, en realidad, suponen dos espacios geográficos claramente definidos: las áreas costeras y de altitud media (medianías) por un lado, donde se concentra la totalidad de la población, y la alta montaña, por otro, con una notable menor influencia oceánica y rasgos climáticos bien diferenciados.

Figura 1. Localización de las Islas de la Macaronesia



Como se ha señalado, las islas de tamaño reducido son laboratorios muy relevantes para poder estudiar tanto el cambio en las condiciones climáticas como los efectos. En primer lugar, Canarias, y toda la Macaronesia, supone un excelente observatorio natural para estudios de variabilidad en los patrones de circulación para el Atlántico Norte (García Herrera, *et al.*, 2001) al constituir una importante zona climática de transición en el Atlántico Norte suroriental (Marzol y Máyer, 2012; Cropper, 2013), ya que se ubica entre las circulaciones templada y tropical. En segundo lugar, al ser islas, son espacios especialmente vulnerables (Petzold y Ratter, 2015); tanto desde una perspectiva natural, sobre todo, en cuanto a pérdida de biodiversidad, como humana, esencialmente en lo que respecta a su dependencia energética, alimentaria y suministro de agua potable (Ratter y Petzold, 2012). Aspectos estos que pueden agravarse por los impactos derivados de los fenómenos meteorológicos extremos a los que son especialmente vulnerables todas las áreas litorales del planeta. Por todo ello el espacio geográfico analizado es de gran interés, con un gran valor estratégico en todos los sentidos.

3. Evidencias y magnitud del cambio

Los datos de estaciones meteorológicas en Canarias son escasos y/o con series cortas, por lo que es complicado poder elaborar estudios sobre tendencias. De hecho, no es hasta época muy reciente cuando comienzan a aparecer publicaciones al respecto. No obstante, en la actualidad ya son

numerosos y diversos los trabajos que comienzan a constatar cambios significativos en ciertas variables climáticas.

La temperatura y la precipitación son los elementos climáticos más analizados ya que, como en el resto del planeta, cuentan con bases de datos más largas y fiables y, por tanto, en los que mejor pueden evaluarse los cambios o tendencias; sobre todo la primera de las citadas variables. Así, la temperatura es el elemento más estudiado y el que presenta resultados con mayor certidumbre y una significación estadística más evidente. La precipitación, por su parte, al ser una variable mucho más complicada de analizar muestra resultados más limitados y con una mayor incertidumbre en las tendencias y menor significación estadística. En esta región del globo la irregularidad pluviométrica es uno de los principales rasgos, a lo que se añade una topografía de enorme complejidad que dificulta, aún más, cualquier tipo de análisis temporal y espacial de las precipitaciones.

Otras variables estudiadas son la humedad relativa, la evaporación, la presión, que es analizada con relación a la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) e, indirectamente así, la circulación de los vientos alisios. También hay estudios sobre el ascenso del nivel del mar y, aunque de manera más general, el cambio en la temperatura superficial del mismo. Por último, se han publicado algunos trabajos sobre previsible efectos del calentamiento y tendencias de futuro.

3.1. Las temperaturas

Como se ha señalado, el análisis de las temperaturas es el que muestra resultados más concluyentes y más sólidos desde una perspectiva estadística. El tratamiento de las series, la mayoría de ellas previamente homogeneizadas, señala incrementos apreciables.

Si se analizan los datos pormenorizadamente, se puede apreciar la diversidad de investigadores e instituciones que han publicado sobre el tema y que, además, trabajan a escalas distintas. Así, se entiende que algunas conclusiones muestren ciertas diferencias entre los autores aunque, en general, los resultados sean similares y concluyentes o, al menos, en el mismo sentido en cuanto a tendencias estadísticas. Hay publicados un total de seis trabajos que se podrían dividir en dos grupos. El primero estaría conformado por estudios de gran detalle espacial con el empleo de un elevado número de estaciones meteorológicas locales (Esquivel *et al.*, 2012; Luque *et al.*, 2014; Sanroma *et al.*, 2010). El segundo corresponde a estudios que analizan la Macaronesia en su conjunto, con menor profundidad espacial, utilizando datos de las estaciones meteorológicas principales, que poseen series más largas, incluyendo también en sus resultados análisis estacionales (Cropper, 2013; Cropper y Hanna, 2014). Así, en el trabajo más amplio sobre calentamiento en la Macaronesia sólo se usan cuatro observatorios para el caso de Canarias (Cropper y Hanna, 2014). En definitiva, los dos grupos señalados son absolutamente complementarios. El análisis se completa con algunas publicaciones algo más antiguas y con menor detalle tanto espacial como temporal (Sperling *et al.*, 2004).

Se observa en las publicaciones que las conclusiones generales son similares, aunque el primer grupo, al trabajar con mayor detalle espacial, demuestra que el ascenso es muy irregular, según sectores, a escala local. Además, Cropper (2013) señala incrementos superiores en su serie -1973-2012- que Martín y colaboradores (2012) y Luque y colaboradores (2014) -1944-2010-. No obstante en todos los casos el ascenso térmico más marcado se produce, claramente, a partir de los años 70-80.

En síntesis, las principales conclusiones indican un incremento térmico generalizado aunque con matices espaciales y temporales (Cuadro 1), destacando las siguientes cuestiones:

- Aumento térmico general entre 1901 y 2010 para toda la región macaronésica, incluyendo el archipiélago canario (Cropper and Hanna, 2014).
- Ascenso térmico pronunciado en los valores mínimos, mucho más que en los máximos (Martín *et al.*, 2012; Luque *et al.*, 2014; Sanroma *et al.*, 2010).
- Ese incremento térmico nocturno se traduce en el aumento apreciable del número de noches tropicales, aquellas con más de 20°C (Máyer y Marzol, 2014).
- Como consecuencia de ello se produce una clara tendencia hacia la disminución de la amplitud térmica diaria (Martín *et al.*, 2012; Luque *et al.*, 2014; Sanroma *et al.*, 2010).
- Según los investigadores del primer grupo, el aumento de las temperaturas es más evidente, sobre todo, en la alta montaña (Martín *et al.*, 2012; Sanroma *et al.*, 2010), por encima de la inversión térmica que también señalan Sperling y colaboradores (2004) aunque con una serie más corta.
- Este mismo reparto térmico espacial, con un mayor incremento en la montaña, se repite en espacios insulares de características geográficas y climáticas similares (Díaz *et al.*, 2011), lo que da consistencia científica a este resultado. Sin embargo, los autores del segundo grupo no constatan esa diferencia espacial, probablemente porque trabajan a escala más general (Macaronesia) y señalan incrementos térmicos menores.
- Aumento de las temperaturas, evidente, sobre todo, a partir de los años 70-80 del siglo XX, con un consenso casi unánime en ese sentido (Sperling *et al.*, 2004; Martín *et al.*, 2012; Cropper, 2013; Cropper y Hanna, 2014; Luque *et al.*, 2014; Hernández *et al.*, 2012).
- Ese ascenso es consistente con el registrado en el resto del planeta (IPCC, 2013) pero con incrementos superiores a la media global (0,27°C entre 1981 y 2010), durante las últimas décadas, no sólo en Canarias sino en todos los archipiélagos macaronésicos (Cropper y Hanna, 2014).
- En ese sentido, el aumento de temperaturas es similar a los archipiélagos que más se calientan a escala planetaria como Mauricio o Bahamas (Cropper y Hanna, 2014).
- El ascenso es más pronunciado en verano (Cropper y Hanna, 2014).
- El incremento se hace más patente en las islas orientales que en las occidentales, donde incluso no es significativo en El Hierro y La Palma (Cropper, 2013), aunque otros autores si encuentran incrementos importantes en estas islas (1970-2010) (Hernández *et al.*, 2012)⁵.
- Los datos indican cambios en las tendencias en relación con fenómenos globales. Es el caso de la erupción del Pinatubo -1991- y un posterior enfriamiento y los episodios de Niño intenso como el de 1997-1998 con un acusado calentamiento (Cropper, 2013), tal y como también ocurre en el resto de la superficie terrestre.
- Por último, es importante destacar que las temperaturas muestran descensos, aunque no significativos estadísticamente, en la primera mitad del siglo XX, en especial entre 1911 y 1940⁶.

5. Es llamativa esa diferencia entre las dos publicaciones (Cropper, 2013 y Hernández *et al.*, 2012). El ascenso tan destacado –excesivo– que señalan Hernández y colaboradores (2012) de 0,71°C/década para la isla de El Hierro podría ser debido al desconocimiento de los metadatos de la estación del aeropuerto de El Hierro y, por tanto, a probables inhomogeneidades estadísticas en la serie.

6. Es importante destacar que las estaciones meteorológicas de este periodo para Canarias sólo se refieren a Izaña y, sólo desde 1931, también a Santa Cruz de Tenerife.

Cuadro 1: Variaciones estadísticamente significativas de la temperatura (°C/década) en Canarias según las publicaciones más relevantes

Publicación	Ámbito	Serie	Variable	Variación (°C)	Sector/°C/Periodo de mayor ascenso
Sperling <i>et al.</i> , 2004	Tenerife	1950-1999 1972-1999	T. Media	Izaña: 0,16 Tenerife Norte: 0.6	Alta Montaña: 0,45°C (1970-1999)
Sanroma <i>et al.</i> , 2010	Tenerife	1916/25-2006	T. Media	Santa Cruz: 0.10 / Izaña 0.13	Costa: 0,29°C (1948-2006) Tmin
		1916/25-2007	T. Mínima	Santa Cruz: 0.15 / Izaña 0.13	
		1948-2006	T. Media	Santa Cruz: 0.17 / Izaña 0.19	
		1948-2007	T. Mínima	Santa Cruz: 0.29 / Izaña 0.23	
Martín <i>et al.</i> , 2012	Tenerife	1944-2010	T. Media	Promedio: 0.09	Alta Montaña: 0.32°C (1970-2010) Tmin
		1944-2010	T. Mínima	Promedio: 0.17	
		1970-2010	T. Media	Promedio: 0.17	
		1970-2010	T. Mínima	Promedio: 0.25	
Cropper, 2013+	Macaronesia	1973-1999	T. Media	0.20-0.70	Fuerteventura: 0,50°C (1973-2012) Tmed
		1973-2012	T. Media	0.27-0.50	
Cropper and Hanna, 2014	Macaronesia	1901-2000	T. Media	Promedio: 0.02*	Verano: 0,40°C (1981-2010) Tmed
		1981-2010	T. Media	Promedio: 0.30*	
		1981-2010	T. media (Verano)	Promedio: 0.4	
Luque <i>et al.</i> , 2014	Gran Canaria	1946-2010	T. Media	Promedio: 0.09	Alta Montaña: 0,31°C (1970-2010) Tmin
		1946-2010	T. Máxima	Promedio: 0.06	
		1946-2010	T. Mínima	Promedio: 0.12	
		1970-2010	T. Media	Promedio: 0.17	
		1970-2010	T. Máxima	Promedio: 0.17	
		1970-2010	T. Mínima	Promedio: 0.17	

*No es estadísticamente significativo

Fuente: Sperling *et al.*, 2004⁷; Esquivel *et al.*, 2012; Cropper, 2013⁸; Cropper and Hanna, 2014; Luque *et al.*, 2014; Sanroma *et al.*, 2010. Elaboración propia.

Los comportamientos térmicos indicados se apoyan, la mayoría de ellos, en robustos procedimientos estadísticos que, además, al estar en consonancia con los resultados obtenidos en otros espacios similares, aumentan su fiabilidad. Se puede confirmar, por tanto, que el calentamiento en el Atlántico Norte Suroriental es una realidad incuestionable. Esto queda constatado, además, por otros estudios que confirman el ascenso térmico en los otros archipiélagos macaronésicos, especialmente desde los años 70 y para el caso de Madeira con ascensos también algo superiores en las mínimas que en las máximas (Santos *et al.*, 2004). Ese ascenso es, en general, algo inferior a la media global, siendo para el caso de Canarias en los últimos 110 años (1901-2010) de un 67% con respecto al promedio mundial (Cropper & Hanna, 2014), aunque, como se ha citado, con una aceleración muy significativa en el aumento térmico en las últimas décadas, aproximadamente en los últimos 40 años.

3.2. Las precipitaciones

La lluvia es un elemento más difícil de tratar desde una perspectiva estadística y, mucho más, en el área de estudio en el que, probablemente, la irregularidad sea su principal característica.

7. Sperling *et al.* (2004) señalan un aumento de 0,6°C por década para el observatorio del aeropuerto de Tenerife Norte. Sin duda se trata de un incremento «extraño» en cuanto al valor excesivamente elevado con respecto al resto de las estaciones e, incluso, en relación a los valores a escala planetaria y del establecido por los otros autores. Es posible que en ese cálculo no se haya tenido en cuenta los metadatos de la estación meteorológica, puesto que se produce un cambio relevante en la ubicación de la misma en 1976. Ese cambio queda reflejado en diferentes pruebas de homogeneidad. Por tanto, es probable que se trate de un error que, además, podría incidir en las conclusiones a las que llegan los autores para el estudio de los bosques de nieblas en Tenerife.

8. Al igual que con Sperling y colaboradores (2004) se indica un incremento térmico igual o superior a 0,6°C por década en algunos observatorios y hay errores e la denominación de los observatorios («Las Palmas de Tenerife» y «Hiero»), por lo que se incluye en el cuadro el valor más significativo de la estación de Fuerteventura en la serie más larga (1973-2012).

En esta línea, la gran variabilidad temporal, con coeficientes de variación superiores al 40% en numerosos casos (Dorta, 2007; Cropper y Hanna, 2014; Máyer *et al.*, 2017) y una gran concentración de la lluvia (Marzol *et al.*, 2006; Marzol y Máyer, 2012; Máyer y Marzol, 2017; González y Bech, 2017) hacen necesarios análisis estadísticos con series muy largas. Es muy complicado, por tanto, el estudio de tendencias debido a la mencionada irregularidad (De Luque y Martín, 2011), a la cortedad de las series -la mayor parte de los observatorios comienzan a funcionar entre los años 50 y 70- y, también, a la gran variabilidad espacial.

Aún así, hay un total de diez trabajos publicados, muy diversos en cuanto a temática y escala (García-Herrera *et al.*, 2003; Del Río *et al.*, 2009; De Luque y Martín-Esquivel, 2011; Hernández *et al.*, 2012; Tarife *et al.*, 2012; Cropper, 2013; Cropper y Hanna, 2014; Máyer *et al.*, 2015; Sánchez-Benitez *et al.*, 2016; Máyer-Suárez *et al.*, 2017). Los estudios señalan, de forma sintética, un descenso general de la precipitación (Máyer *et al.*, 2015; García-Herrera *et al.*, 2003; De Luque y Martín-Esquivel, 2011; Máyer-Suárez *et al.*, 2017), aunque con resultados en los que las tendencias son poco significativas, al igual que en Azores y Madeira (Cropper, 2013) y un cierto incremento en la intensidad de la lluvia (Tarife *et al.*, 2012; Máyer y Marzol, 2017). No obstante, algunas investigaciones más recientes, que cubren un elevado número de estaciones y abarcan a todo el archipiélago, remarcan la dificultad en establecer tendencias claras por la citada variabilidad interanual y ponen en entredicho las conclusiones establecidas con series de datos cortas (Sánchez-Benítez *et al.*, 2016), aunque los niveles de significación estadística crean diferencias en los resultados de los análisis (Máyer *et al.*, 2017). En definitiva, las principales características son las siguientes (Cuadro 2):

- La gran irregularidad de las precipitaciones impide obtener resultados del todo concluyentes y la significación estadística resulta ser escasa.
- Aún así, existe una tendencia general, aunque con poca significación estadística, hacia la disminución de las precipitaciones (García-Herrera *et al.*, 2003; Máyer *et al.*, 2015; Máyer *et al.*, 2017).
- Con especial relevancia en las vertientes septentrionales de Tenerife y Gran Canaria (Máyer *et al.*, 2015), especialmente de esta última, aunque no así en otros sectores (Máyer *et al.*, 2017) pero, de nuevo, con poca significación estadística.
- El más reciente de todos los trabajos muestra la gran complejidad en los análisis espaciales y temporales. A escala de detalle se indica un descenso desde 1970, con significación estadística moderada, en invierno pero, sobre todo, en primavera, especialmente en medianías y zonas altas de Gran Canaria (Máyer *et al.*, 2017). No obstante, con series más largas se señalaban descensos en otoño (Máyer *et al.*, 2015) que, sin embargo, desde 1970 muestran tendencias positivas en esta estación (Máyer *et al.*, 2017).
- El periodo más largo analizado con estaciones meteorológicas del archipiélago es de la isla de Tenerife (1919-2009) e indica un descenso pero con poca significación estadística (De Luque y Martín, 2011). En este mismo sentido, Cropper y Hanna (2014) analizan una serie más larga, pero es probable que se trate de observatorios distintos y no de una única serie⁹.
- Los descensos más acusados en algunos sectores muy puntuales se sitúan en torno a los 40 mm por década (Máyer *et al.*, 2015; De Luque y Martín, 2011), llegando hasta los 60 mm para la alta montaña entre 1970 y 2010 (Hernández *et al.*, 2012).

9. Los autores utilizan una estación meteorológica identificada como TE con una serie entre 1885 y 2012. Es muy probable que dicho observatorio se corresponda con dos ubicaciones muy diferentes (La Laguna Instituto y Aeropuerto Tenerife Norte), por lo que los datos deberían reflejar una marcada inhomogeneidad que no se cita en el artículo. Una vez más se hace esencial conocer bien los metadatos de los observatorios.

- También es cierto que algunos sectores muestran aumentos, aunque poco relevantes y sin significación estadística, como es el caso del Noreste de La Palma (De Luque y Martín, 2011) o El Hierro (Hernández *et al.*, 2012).
- En general se aprecia un aumento en la intensidad de la precipitación, aunque no de manera homogénea (Tarife *et al.*, 2012; Máyer *et al.*, 2017).
- La certeza o evidencia en los análisis señalan, claramente, una mayor incertidumbre que en el caso de las temperaturas. Hasta tal punto que la investigación que tiene en cuenta el mayor número de estaciones –más de 100- y con una serie relativamente larga -pero menor que otros trabajos-, apenas encuentra significación estadística en las tendencias para el semestre más lluvioso –octubre a marzo- (Sánchez-Benítez *et al.*, 2016).

Por otro lado, algunas de las publicaciones han analizado las teleconexiones climáticas con la NAO y el ENSO en cuanto a la precipitación. En este sentido, las correlaciones con la NAO, son, en general, débiles y sólo para las islas occidentales durante los meses más fríos (Cropper, 2013; Del Río, 2009; Krichak *et al.*, 2014), tanto teniendo en cuenta el total de lluvia (García Herrera *et al.*, 2001) como la intensidad (Tarife *et al.*, 2012): la mayor cantidad de precipitación y la mayor intensidad se relacionan con una NAO negativa. En ese mismo sentido, en las islas occidentales, incluyendo Gran Canaria, también existen correlaciones entre este índice y las sequías, especialmente en el mes de marzo (Hernández *et al.*, 2012): las fases positivas implican más sequías. Por consiguiente, con frecuencia, los inviernos con NAO negativas tienden a ser más lluviosos y los de NAO positivas más secos (para las islas occidentales).

También se señalan correlaciones con el ENSO. Diversos autores demuestran la relación entre las fases negativas del ENSO y un aumento de la precipitación en el archipiélago debido a cambios en la circulación en la troposfera media (500 hPa.) (Gallego *et al.*, 2001), aunque otros estudios más recientes, con series de mayor longitud, lo desmienten e indican que sólo la NAO es significativa (Sánchez-Benítez, 2016).

En esta línea, la NAO también presenta una relación con las advecciones saharianas (Moulin *et al.*, 1997; Alonso, 2007; Alonso-Pérez *et al.*, 2011). Y, asimismo, el ENSO incide en el número de días de advección sahariana. Un ENSO positivo intenso se correlaciona con inviernos con más fechas saharianas (Dorta *et al.*, 2005; Menéndez *et al.*, 2009). Los días de rasgos saharianos se caracterizan por su estabilidad atmosférica, por lo que disminuyen las jornadas de lluvia. Aunque eso no implique un descenso en el total de precipitaciones, sí puede suponer un condicionante e, indirectamente, una menor probabilidad de precipitación, y más teniendo en cuenta el aumento de la pluviosidad con los episodios de ENSO negativo.

En cualquier caso, a pesar de las citadas correlaciones, las investigaciones más recientes reflejan que la mayor dependencia de la variabilidad pluviométrica se da con las temperaturas oceánicas (SST) en el Atlántico Norte tropical (Rodríguez-Fonseca *et al.*, 2006; Sánchez-Benítez, 2016), mucho más que con las propias teleconexiones puramente atmosféricas citadas, de manera que temperaturas oceánicas anormalmente positivas incrementan los tipos de tiempo inestables responsables de la precipitación (Sánchez-Benítez, 2016).

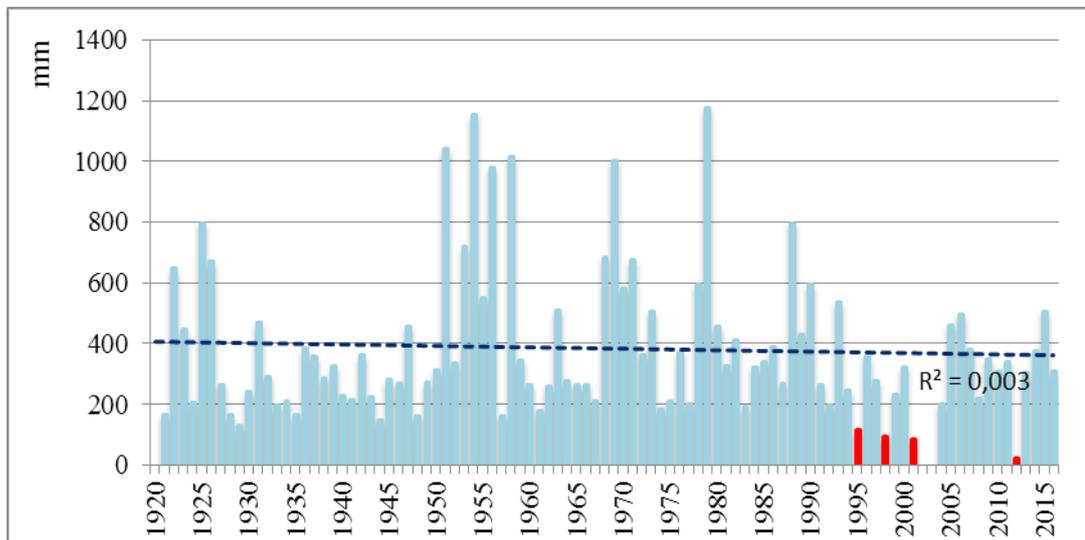
Cuadro 2: Variaciones de la precipitación en Canarias según las publicaciones más relevantes

Publicación	Serie+	Ámbito	Cuestiones más destacadas
García Herrera <i>et al.</i> , 2003	1943-1998	Canarias	Disminución de precipitaciones anuales en Gran Canaria (-1,3%) y Tenerife (-1%). Ascenso en Lanzarote (+2,7%)
Del Río <i>et al.</i> , 2009	1961-2006	Macaronesia	Sin significación estadística.
De Luque y Martín, 2011	1919-2009	Tenerife	Disminución de precipitación en el Norte de Gran Canaria y en general en Tenerife, especialmente costa norte (-40±20 mm). Disminución en La Palma (-40±40).
	1951-2009	Gran Canaria	
	1935-2009	La Palma	
Hernández <i>et al.</i> , 2012	1970-2010	Canarias	Sin tendencia significativa, excepto El Hierro positiva e Izaña negativa.
Tarife <i>et al.</i> , 2012	1970-2010	Canarias	Aumento en la intensidad de la precipitación en invierno y otoño. Descenso leve en primavera.
Cropper, 2013	1973-2010	Macaronesia	Sin significación estadística para Canarias.
Cropper y Hanna, 2014	1885-2011	Macaronesia	Sólo es significativo un incremento en Cabo Verde. Para Canarias no hay tendencia significativa.
Máyer <i>et al.</i> , 2015	1919-2000	Canarias	Descenso en vertientes septentrionales de Tenerife y Gran Canaria, especialmente en otoño.
Sánchez-Benítez <i>et al.</i> , 2016	1961-2013	Canarias	En general no resultan significativas las tendencias para el semestre octubre a marzo
Máyer <i>et al.</i> , 2017	1970-2013	Canarias	Descenso. Sobre todo en primavera y en medianías y zonas altas de Gran Canaria.

+Las series señaladas hacen referencia a las más largas de las estudiadas.

Fuente: García Herrera *et al.*, 2003; Del Río *et al.*, 2009; De Luque y Martín, 2011; Hernández *et al.*, 2012; Tarife *et al.*, 2012; Cropper, 2013; Cropper y Hanna, 2014; Máyer *et al.*, 2015; Sánchez-Benítez *et al.*, 2016; Máyer *et al.*, 2017. Elaboración propia

Figura 2. Precipitaciones en el semestre de concentración de lluvias en Canarias (Octubre-Marzo) en Izaña* entre 1920-2016.



*En rojo los cuatro semestres más secos de la serie.

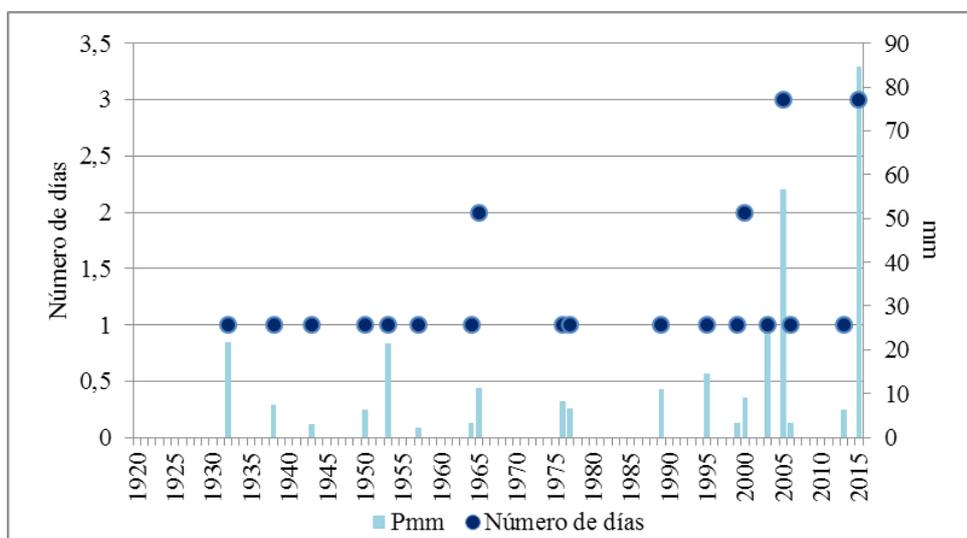
Fuente: AEMET. Elaboración propia.

Como complemento a todo lo expuesto hay que señalar que un análisis de la evolución de la precipitación en el último siglo indica, no sólo la citada tendencia decreciente, con baja significación estadística -como se narra en la bibliografía- sino, además, una intensificación de inviernos muy secos en los últimos lustros de la serie. La estación de Izaña, la que cuenta con más datos dentro

de la red de primer orden de la AEMET -desde 1920- y, por tanto, la más adecuada para el análisis, sirve como muestra. En este caso no existe tendencia con significación estadística pero los inviernos más secos se localizan en el siglo XXI y en la última década del siglo XX. En Canarias el semestre más lluvioso se concentra entre octubre y marzo, en el que se recoge el 87,3% del total (Sánchez-Benítez *et al.*, 2016). Los inviernos (semestres) más secos se han registrado en 2011-2012, 2000-2001, 1997-1998 y 1994-1995 en orden de intensidad de déficit pluviométrico (Figura 2), lo que podría apuntar más hacia una intensificación de las sequías que a la disminución efectiva de la precipitación. Esta hipótesis se hace más probable si tenemos en cuenta el incremento en la intensificación de la precipitación ya señalada (Tarife *et al.*, 2012; Máyer *et al.*, 2017) y supone que es compatible con un aumento en la intensidad de las sequías, aunque no haya un descenso significativo de la precipitación.

Otra cuestión interesante se puede observar en los últimos años en Canarias: la distribución estacional de las precipitaciones empieza a mostrar algunas variaciones. Así, las lluvias estivales, que suponen totales inferiores al 5% del total anual de promedio (Máyer *et al.*, 2015), es decir, veranos extremadamente secos (Sánchez-Benítez *et al.*, 2016), con meses de precipitación casi nula, revelan señales de cambio en época reciente, hasta tal punto que se han producido una serie de eventos de lluvia importantes en el verano, especialmente en agosto. Los más relevantes de toda la serie se han registrado en 2015, 2005 y 2003, cada uno más intenso que el anterior (Figura 3). Su relevancia es patente al comprobar el peso de los aportes pluviométricos en el contexto anual, llegando a suponer, en el último evento, el 1700% de la precipitación media para agosto y casi el 22% del total anual, cuando el valor medio es de 1,27%. Se trata de una serie de casi 100 años en la que se ha batido, en los últimos 16 años (siglo XXI), tres veces el record de precipitación mensual para el mes de agosto. Los datos analizados para la estación de Izaña indican una tendencia significativa al usar el test de Mann-Kendall con un nivel de significación del 95%. Otros autores, con series más cortas, también encuentran tendencias al alza en la precipitación estival aunque sin significación estadística (Del Río *et al.*, 2009). Es probable que pueda tratarse de un fenómeno relacionado con una cierta tropicalización en las condiciones climáticas del archipiélago y que conectaría con un aumento de las temperaturas oceánicas en la región (Kossin, 2008; Guijarro *et al.*, 2014). Este hecho se refuerza al comprobar que los modelos climáticos señalan un incremento futuro en las precipitaciones estivales para finales de siglo entre un 10% y un 13 % (Cropper, 2013).

Figura 3. Precipitaciones máximas durante el mes de agosto en Izaña 1920-2016.



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration. Elaboración propia.

En definitiva, el comportamiento de la precipitación indica, por un lado, una disminución poco significativa de la misma y en consonancia con los resultados que muestra el IPCC a escala planetaria para la región de la Macaronesia, al igual que en buena parte del mundo mediterráneo (Trenberth, 2011). Por otro lado, algunos cambios en la distribución estacional, con episodios, cada vez más frecuentes, de naturaleza convectiva muy aislados pero intensos durante el estío.

3.3. Otras variables

Los trabajos revisados también tratan algunas otras variables, aunque con menor exhaustividad: presión, viento, humedad relativa, evaporación e insolación.

Las publicaciones sobre el comportamiento de *la presión* han tenido, como objetivo fundamental, el análisis de la relación entre la NAO y las condiciones climáticas sobre el archipiélago (García Herrera *et al.*, 2001; Cropper y Hanna, 2014) y, en segundo término, el comportamiento del anticiclón subtropical del Atlántico Norte en su flanco oriental (Alonso-Pérez *et al.*, 2011).

Cropper y Hanna (2014) señalan un incremento de la diferencia de presión entre Azores y Cabo Verde, lo que induce a pensar en un aumento significativo en la intensidad de los vientos alisios pero desde los años 70 hasta la actualidad, aumento que también señalan otros autores en todo el entorno del suroeste de la Península Ibérica, Madeira y Norte de Canarias (Guijarro, 2014). Sin embargo, en invierno, la velocidad media de los alisios siempre es menor que durante el verano, debido a la posición del Anticiclón atlántico a latitudes bajas cerca del archipiélago (Marzol *et al.*, 1991) y a la desaparición de la depresión superficial africana. En este contexto, algunos autores plantean un cambio en las condiciones de viento debido a la tendencia en la extensión del citado Anticiclón hacia el Sahara. En los meses más fríos, de diciembre a marzo, se ha demostrado que el área de altas presiones ocupa posiciones cada vez más zonales, de forma que las altas presiones se extienden desde el Atlántico Norte oriental subtropical hasta todo el Sahara septentrional. Se generan así vientos más frecuentes de dirección Este con una componente zonal (Alonso-Pérez *et al.*, 2011). Y, lo que es más importante, esta tendencia, según algunos autores, podría estar determinando un aumento en las intrusiones saharianas sobre toda esta región, especialmente desde 1979-80, casi doblando el total de material litogénico en la atmósfera, desde 10 mg/m³ (1958-1980) a 20 mg/m³ (1981-2006) para la isla de Tenerife (Alonso-Pérez *et al.*, 2011). Sin embargo otros investigadores, analizando series más largas (1941-2009) no detectan una tendencia alcista, sobre todo porque los años 40 presentan una presencia muy elevada de intrusiones de polvo sahariano (García *et al.*, 2016)

Por lo que respecta al comportamiento de la *humedad relativa* se señala que la alta montaña no presenta variaciones estadísticamente significativas (Sperling *et al.*, 2004)¹⁰, mientras que en los sectores costeros, representados por la ciudad de Santa Cruz de Tenerife se evidencia un ascenso significativo de 1,1%/década. Sin embargo, otros autores señalan, por el contrario, un descenso de la humedad relativa para explicar el incremento de 18.2 mm/década en la evapotranspiración para Canarias, incremento especialmente significativo en verano (Vicente-Serrano *et al.*, 2016).

10. De nuevo es posible que en esta publicación haya errores con los datos. El año 1940, que aparece con un valor llamativamente bajo (en realidad podría considerarse como un *outlier*) puede ser debido a la falta de datos de seis meses de ese año, entre enero y junio, por lo que las conclusiones, una vez más, podrían ser erróneas. Junio es un mes habitualmente muy húmedo, por lo que si no se tiene en cuenta la humedad relativa es muy probable que sea considerablemente más baja.

Por último, el estudio de *la insolación* no presenta tendencias significativas (Sanroma, *et al.*, 2010) en el área de estudio. Los cambios de todas las variables señaladas aparecen sintetizados en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Variaciones de otros elementos del clima

Variable	Publicación	Serie ⁺	Ámbito	Cuestiones destacadas
Viento	Cropper y Hanna, 2014	1871-2010	Macaronesia	Aumento significativo de los alisios (desde años 70)
Presión	Alonso <i>et al.</i> , 2011	1958-2006	Atlántico Norte Subtropical Oriental	Extensión de la alta subtropical hacia el Este (invierno)
Intrusiones de polvo en suspensión	Alonso <i>et al.</i> , 2011	1958-2006	Tenerife	Aumento de la cantidad de material litogénico
	García <i>et al.</i> , 2016	1941-2013	Izaña	Sin tendencias significativas
Humedad relativa	Sperling <i>et al.</i> , 2004	1931-1999	Tenerife	Incremento significativo de un 1,1%/década
Evapotranspiración	Vicente-Serrano <i>et al.</i> , 2016	1961-2013	Canarias	Ascenso medio de 18,2mm/década. Más acusado en verano
Insolación	Sanroma <i>et al.</i> , 2010	1943-2006	Tenerife	Sin tendencias significativas

+ Serie más larga estudiada

Fuente: Cropper y Hanna, 2014; Alonso *et al.*, 2011; Sperling *et al.*, 2004; Vicente-Serrano *et al.*, 2016; Sanroma *et al.*, 2010. Elaboración propia.

3.4. Fenómenos meteorológicos extremos

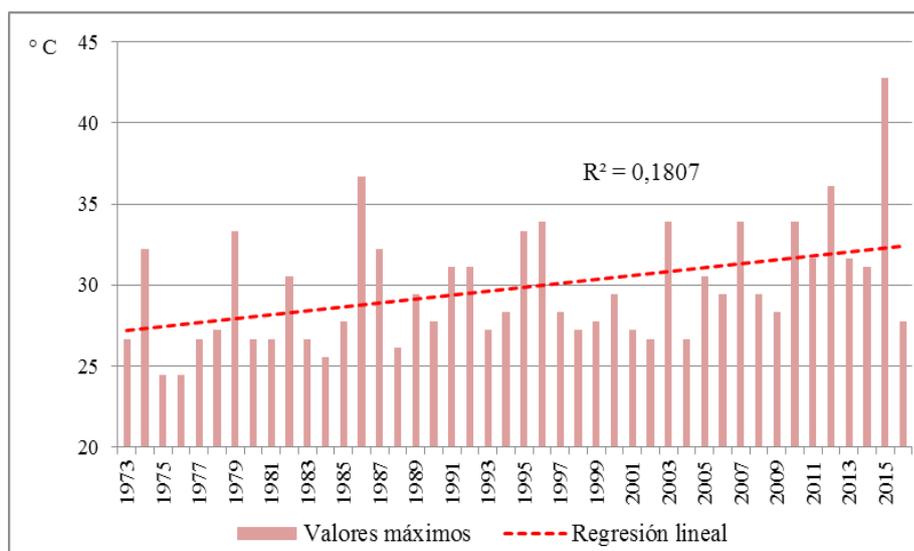
Los estudios sobre calentamiento global a escala planetaria y, como se ha visto, también a escala local, han constatado un cambio en las tendencias de algunas variables climáticas, la más evidente la temperatura. Sin embargo, la aparición de fenómenos meteorológicos extremos y su relación con el calentamiento es mucho más difícil de constatar puesto que se trata de eventos puntuales en el tiempo y en el espacio y habituales en cualquier latitud o espacio geográfico. El análisis de la implicación de la tendencia al calentamiento del planeta en eventos concretos es mucho más complicado de demostrar que la propia tendencia. Aún así, ya comienzan a aparecer publicaciones e informes de diverso tipo que muestran indicios en el incremento de la intensidad o frecuencia de estos fenómenos a escala planetaria (Herring *et al.*, 2015; Herring *et al.* 2016; Banholzer *et al.*, 2014). Si eso queda demostrado para otras regiones, es evidente que también pueda darse en el área de estudio analizada en este trabajo. Además, las proyecciones presentadas por el IPCC (2013) inciden en la alta probabilidad, a escala global, de que se intensifiquen los fenómenos meteorológicos extremos con el aumento térmico. En el caso de la región macaronésica es posible señalar la probabilidad de algunos cambios en diversos tipos de fenómenos.

En primer lugar, el análisis de las *olas de calor* en Canarias muestra algunas cuestiones relevantes. Su número es notablemente mayor en los últimos años, con 24 episodios entre 1996 y 2015 y sólo 13 entre 1976 y 1995 (AEMET, 2015). Además, las mayores intensidades, entendidas como la temperatura máxima de la ola de calor, se dan a lo largo del siglo XXI. No obstante, la duración de los eventos no muestra cambios significativos e incluso las olas de calor más largas se han registrado en 1976 (2 episodios con más de 10 días) y 1987. En relación con ello, el riesgo de *incendio forestal*, que está directamente relacionado con las advecciones saharianas responsables de las olas de calor (Dorta, 2001), aumenta (Cropper y Hanna, 2014). De hecho los mayores incen-

dios forestales en la historia de Canarias se han producido en el siglo XXI; el mayor de los cuales afectó a casi 36000 Has (MARM, 2007) en tres islas de manera simultánea en julio de 2007. En total, los tres incendios calcinaron el 41,53% de la superficie forestal quemada de todo el país en 2007 (MARM, 2007). Asimismo, se han registrado otros grandes incendios en julio de 2009, 2012 y 2016.

Además, se han registrado numerosos records de temperatura en los últimos años, con un incremento sustancial en los registros termométricos *extremos máximos* de las series. Es el caso de varias olas de calor con valores térmicos que han superado ampliamente los máximos alcanzados hasta la fecha, pero no sólo en época estival. En primavera los extremos térmicos han sido realmente excepcionales, llegando a suponer registros cercanos a lo que sería un *outlier* desde una perspectiva estadística, como ocurrió en Lanzarote el 13 de mayo de 2015 al llegarse a una temperatura de 42,6°C, 6°C más que el valor máximo anterior registrado en 1986. La ola de calor de mayo de 2015 ha sido la de mayor intensidad de ese mes en gran parte de Canarias, especialmente en las islas orientales. En el caso de Lanzarote el análisis de los datos de mayo para una serie de 43 años constata, con el test de Mann-Kendall, un aumento estadísticamente significativo de los valores máximos (Figura 4).

Figura 4. Evolución entre 1973 y 2016 de las temperaturas máximas de mayo en Lanzarote (Aeropuerto)



Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration. Elaboración propia.

Asimismo, todas las estaciones de primer orden, excepto el aeropuerto de Gran Canaria, han registrado los máximos absolutos de sus respectivas series en el siglo XXI en las olas de calor de 2001, 2003, 2007 y 2012, además de la citada de 2015 (Cuadro 4). Estos datos podrían servir de evidencia para demostrar también la extensión de la temporada estival hacia la primavera, tal y como está ocurriendo en otros espacios (Jansá *et al.*, 2016) y el alargamiento del periodo de afectación de olas de calor muy intensas, con valores por encima de la 35°C¹¹.

11. En marzo de 2017 se han superado los valores máximos en Tenerife Sur y La Palma aeropuerto.

Cuadro 4. Temperaturas máximas absolutas para el mes de mayo en Canarias (estaciones principales).

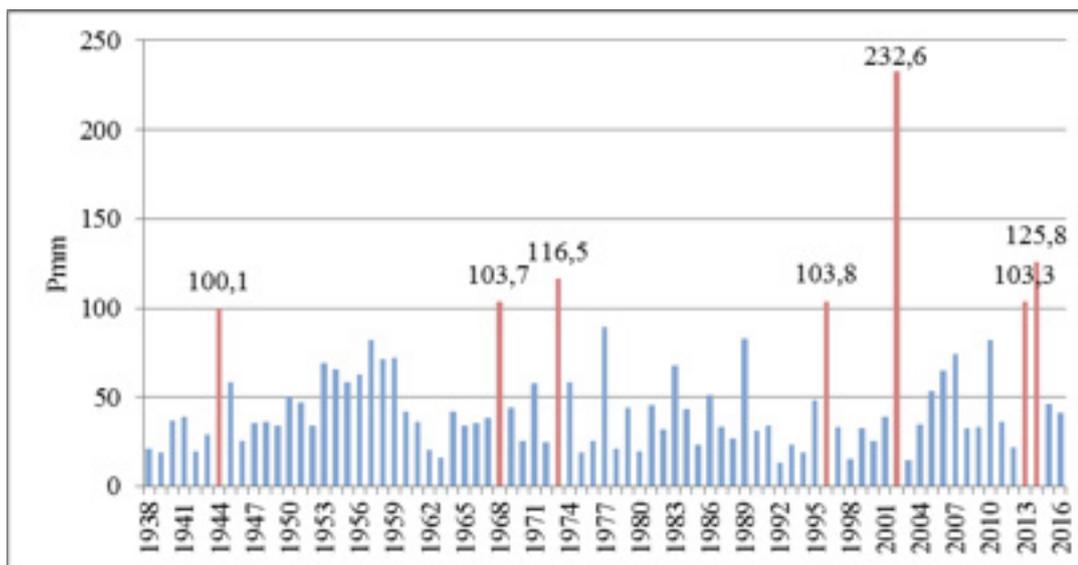
Estación	Serie	Temperatura (°C)	Fecha
La Palma-Aeropuerto	1970-2016	32,4	10/05/2007
El Hierro-Aeropuerto	1973-2016	31,4	11/05/2007
Tenerife Sur-Aeropuerto	1980-2016	37,7	13/05/2012
Tenerife Norte-Aeropuerto	1941-2016	37,6	21/05/2003
Santa Cruz de Tenerife	1920-2016	36,4	13/05/2015
Izaña	1920-2016	26,0	29/05/2016
Gran Canaria-Aeropuerto	1951-2016	36,0	15/05/1964
Fuerteventura-Aeropuerto	1967-2016	36,8	13/05/2015
Lanzarote Aeropuerto	1972-2016	42,6	13/05/2015

Fuente: AEMET. Elaboración propia

Por otro lado, aunque algunos autores señalan un descenso en los eventos severos de precipitación que sería el responsable de la disminución en el total (García-Herrera *et al.*, 2003), otros investigadores, con trabajos más recientes y series considerablemente más largas, apuntan una tendencia hacia un aumento en la concentración de la precipitación (Tarife *et al.*, 2012; Máyer *et al.*, 2017). Lo cierto es que se han registrado numerosos episodios de *precipitación torrencial* muy recientes, en el siglo XXI, que han superado los máximos establecidos para una gran parte de las series. (Dorta, 2007; Díez *et al.*, 2015). Si bien es cierto que todos los parámetros que miden la irregularidad de la precipitación indican que las estaciones meteorológicas canarias presentan los mayores índices del país -como lo ponen de manifiesto sus coeficientes de variación- la realidad es que numerosos observatorios han registrado sus máximos en los últimos años, en algunos casos con valores excepcionalmente altos. Es el caso de Santa Cruz de Tenerife, una de las estaciones meteorológicas con la serie de datos de mayor longitud de todo el archipiélago (Figura 5). Se observa que en los 79 años de la serie se registra una concentración de episodios torrenciales (más de 100 mm/día) en el último cuarto (1996-2016), con cuatro episodios, frente a sólo tres entre 1938 y 1995. Además, las dos fechas con valores más elevados se producen en el siglo XXI (2002 y 2014).

En este sentido, como se señaló en el apartado de la precipitación, una NAO negativa y un aumento de la SST se convierten en condicionantes en el aumento de la pluviosidad. Un buen ejemplo de ello fue el invierno 2009-2010, con una anomalía térmica positiva en la región de hasta 2°C (Ball, 2011) constituyendo el segundo índice negativo NAO más intenso desde 1865 (Cropper y Hanna, 2014). En esos tres meses se sucedieron episodios de fuerte inestabilidad no sólo en Canarias sino también en Madeira (Fragoso *et al.*, 2012) con graves daños y víctimas mortales, destacando los episodios del 1 de febrero en Canarias (Díez *et al.*, 2015) y el 20 del mismo mes en Madeira. En esta isla se registraron más de 40 víctimas mortales debido a la torrencialidad de la lluvia, llegando a superar los 144 mm en Funchal (IPMA). En Madeira, en 2010 se registraron las tres fechas de mayor precipitación diaria de todo el siglo XXI y uno de los episodios más graves desde que se cuenta con información meteorológica (IPMA).

Figura 5. Precipitaciones máximas diarias en Santa Cruz de Tenerife (1938-2016) (más oscuro valores superiores a 100 mm)



Fuente: AEMET. Elaboración propia.

Pero, de entre todos los eventos extremos, los que presentan mayor inquietud desde una perspectiva social y poseen un mayor interés científico son los *fenómenos inestables de origen tropical*. Ya se han mencionado los episodios recientes de precipitaciones estivales como indicios de lo que se podría denominar como una incipiente tropicalización de las condiciones climáticas de la región analizada. Junto a ello, otro síntoma de este proceso podría ser la llegada de tormentas y ciclones tropicales o huracanes.

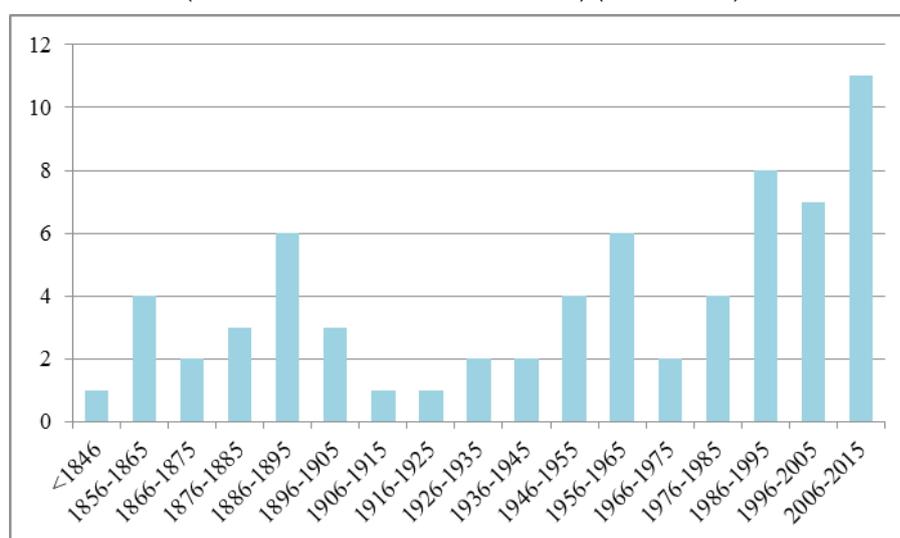
Cerca del archipiélago de Cabo Verde, y al occidente del mismo, está constituida la región en la que se forman la mayor parte de los ciclones tropicales más intensos que afectan al Caribe y América Central y del Norte (Cropper, 2013). Se trata de un espacio amplio con temperaturas oceánicas elevadas y las condiciones ciclogénicas adecuadas para la formación de depresiones, tormentas y ciclones tropicales. En condiciones normales la trayectoria de esos centros de baja presión siguen una dirección Oeste, hacia el Caribe y el Golfo de Méjico. Sólo, de forma puntual, estos han tenido trayectorias anómalas, más orientales, y se han acercado a las Azores. No obstante, recientemente, algunos de ellos han seguido itinerarios centrados en el Atlántico Este, afectando a los archipiélagos de Maderia y Canarias. Aunque su análisis exhaustivo escapa a los objetivos de este artículo es posible hacer una aproximación.

Analizar las tendencias en la frecuencia e intensidad de los ciclones tropicales es una labor difícil. En primer lugar porque son fenómenos muy aislados y muy irregulares en su aparición y, en segundo lugar, porque no hay una adecuada disponibilidad de registros históricos (Knutson *et al.*, 2010). Estas cuestiones se agravan en el Atlántico oriental. De hecho, algunos eventos no son catalogados como tales en la principal base de datos (NOAA), como ocurrió con la tormenta ST_2 (Martín *et al.*, 2005). En cualquier caso, el análisis de la citada base de datos permite comprobar como los fenómenos de origen tropical presentan una cierta recurrencia en los últimos años en la región analizada (Figuras 6 y 7). La tormenta tropical Delta, en noviembre de 2005, ampliamente estudiada (Martín *et al.*, 2005; Jorba *et al.*, 2008), supuso una señal de alarma ante estos episodios. La temporada de huracanes de 2005 marcó un hito climático, puesto que no sólo se limitó a Delta, sino que también se formó el ciclón Vince de categoría 1 en la escala de Saffir-

Simpson (Franklin, 2006), el primer ciclón tropical, constatado científicamente, que alcanzó la península Ibérica (Domínguez-Castro *et al.*, 2013). Además, 2005 fue el año con más huracanes en el Atlántico Norte, con más huracanes de categoría 5 y la temporada más larga de la historia, presentándose la última tormenta en enero de 2006.

A pesar de haber constituido una temporada excepcional, en años posteriores han continuado registrándose fenómenos de esta naturaleza en el entorno de Canarias-Azores-Golfo de Cádiz (Figuras 6 y 7). En 2010 el ciclón tropical Otto, que ya llegó a Madeira como ciclón extratropical (Cangialosi, 2010), y en el verano-otoño de 2012 Gordon y Nadine, que ha sido uno de los huracanes más longevos desde que se cuenta con datos (Brown, 2013).

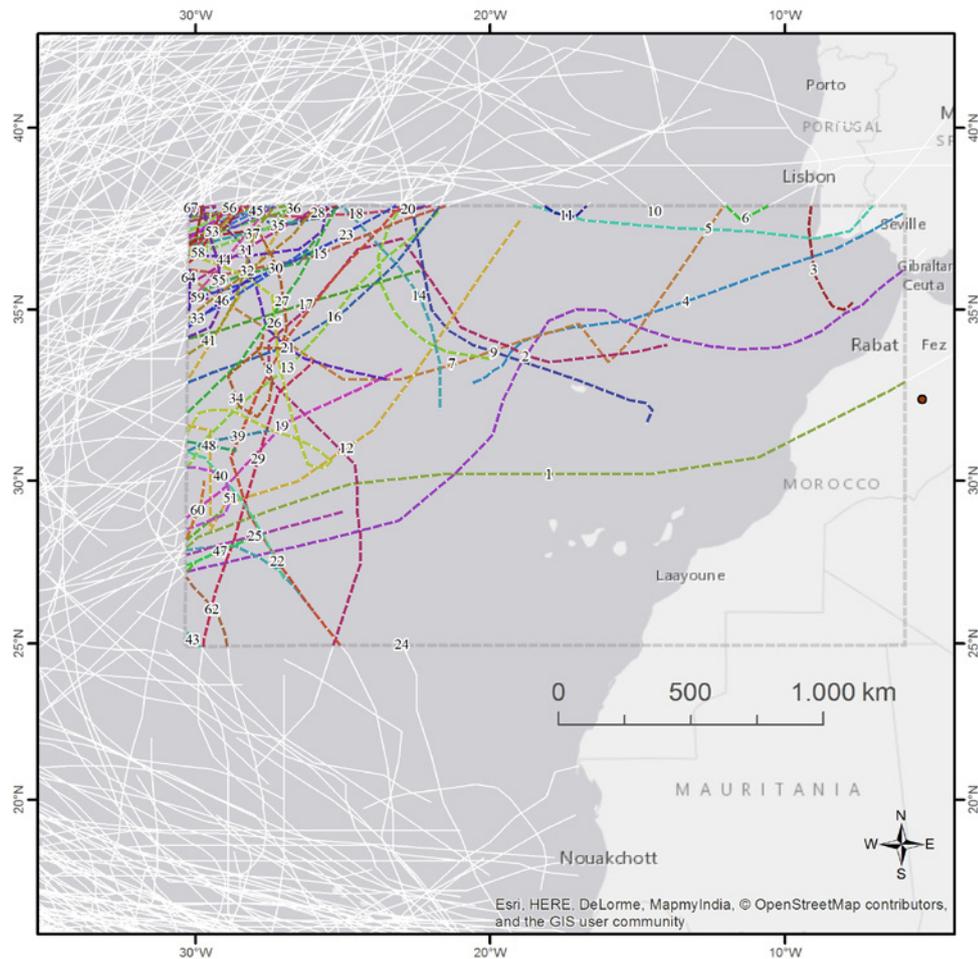
Figura 6: Evolución del número de tormentas y ciclones tropicales en el Atlántico Norte Suroriental (Azores-Canarias-Golfo de Cádiz) (1845-2015)



Fuente: NOAA. Elaboración propia.

No obstante, es preciso remarcar que también se han registrado fenómenos de este tipo en el pasado preinstrumental, aunque mucho más espaciados en el tiempo. Son los casos de noviembre de 1724 (Domínguez-Castro *et al.*, 2013), noviembre de 1826 (Bethencourt y Dorta, 2010) y octubre de 1842 (Vaquero y García Herrera, 2008), lo que indica la posibilidad real de estos eventos en la región analizada sin influencia directa del cambio climático actual. Si, además, se tiene en cuenta que el calentamiento diferencial sufrido por el Atlántico Norte Suroriental, entorno a la corriente fría de Canarias y en el que se inserta la región macaronésica, es superior al del sector occidental de la misma cuenca oceánica (Kossin, 2008; Guijarro *et al.*, 2014) con un considerable aumento térmico de $0.28^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Salat *et al.*, 2017), se podría plantear la hipótesis de una mayor facilidad para la generación de trayectorias más orientales en este tipo de centros de presión (Figura 6). Es importante señalar que algunos estudios indican que el ascenso térmico de la superficie oceánica en la región de Canarias se estima en más de $2^{\circ}\text{C}/\text{siglo}$, siendo además estadísticamente significativo (Guijarro *et al.*, 2014). Se origina así una mayor probabilidad de la aparición de fenómenos de fuerte inestabilidad de origen tropical y/o de naturaleza convectiva, con un incremento en el riesgo de su aparición en el triángulo constituido por Azores, Canarias y el Suroeste de la Península Ibérica.

Figura 7: Trayectorias de tormentas y ciclones tropicales en el Atlántico Norte Suroriental (Azores-Canarias-Golfo de Cádiz) (1724-2015)



Fuente: NOAA, Martín *et al.*, 2005; Vaquero *et al.*, 2008; Domínguez-Castro *et al.*, 2013. Elaboración propia.

4. Proyecciones de futuro. Aspectos esenciales

Toda la información expuesta en los anteriores párrafos hace referencia a las variaciones climáticas ya acontecidas sobre Canarias y algunas regiones de la Macaronesia. La siguiente cuestión a plantear, aunque no es el objetivo principal de este trabajo, es qué ocurrirá en el futuro, cuáles serán las tendencias a lo largo del siglo XXI. Para ello, es evidente que sólo se puede acudir a los modelos climáticos y a los trabajos publicados basados en los mismos, con especial atención a los informes del IPCC. Al tratarse de resultados de modelos, existe un grado importante de incertidumbre y, mucho más, a la escala de islas tan reducidas como las de la Macaronesia. Son, por tanto, sólo tendencias generales y aproximadas que obedecen a regionalizaciones climáticas de los grandes modelos.

En los aspectos más destacados se confirman las tendencias que ya han sido constatadas y que este trabajo pone en evidencia. La primera de ellas es el ascenso de las temperaturas. Se estiman incrementos importantes para toda la región macaronésica (Santos *et al.*, 2004; Cropper, 2013) y, específicamente, para el archipiélago canario, con un aumento de entre 1°C y 2,7°C para finales del presente siglo (Cropper, 2013). En cualquier caso, depende del escenario elegido en función

de las emisiones globales de CO₂. Los estudios más recientes y exhaustivos publicados por la AEMET permiten también un análisis estacional dependiendo del escenario de emisiones y del método estadístico empleado. Para las temperaturas mínimas, se señalan aumentos, para finales de siglo de entre 1,8°C y algo más de 3°C, (AEMET, 2015). En las temperaturas máximas los incrementos térmicos son muy similares y las diferencias estacionales sólo indican un mayor ascenso térmico general en el otoño (Cuadro 5). Por otro lado, algunos investigadores señalan que el aumento de las máximas anuales se explicaría en función de cambios futuros en la humedad edáfica y la nubosidad. En este sentido, es previsible, según los modelos de alta resolución aplicados a Canarias, que a mediados del siglo actual, se reduzca la humedad del suelo y disminuya la extensión de la capa de nubes (hasta en un 15%). Las dos cuestiones hacen aumentar las temperaturas máximas al facilitarse la radiación solar directa y producirse una menor evapotranspiración (Expósito *et al.*, 2015). Los ascensos de las temperaturas, a su vez, señalan incrementos más marcados cuanto mayor es la altitud, traduciéndose en ascensos térmicos esperados más acusados en la alta montaña (Expósito *et al.*, 2015), tal y como ya está ocurriendo y se ha señalado a lo largo de este trabajo (Martín *et al.*, 2012; Sanroma *et al.*, 2010).

Cuadro 5. Cambios estimados para finales de siglo (2071-2100) según diferentes escenarios de emisiones

		Anual			Primavera			Verano			Otoño			Invierno		
		RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5
Tmed (°C) *	(2071-2100)	2.7	1.7	1.4												
Tmax (°C)	(2071-2100)	3.4	2.3	1.9	3.0	2.0	1.7	3.1	2.3	1.7	4.0	2.7	2.2	3.5	2.3	1.9
Tmin (°C)	(2071-2100)	3.3	2.3	1.8	3.4	2.4	1.8	3.7	2.8	2.0	4.0	2.9	2.2	3.6	2.6	1.9
Precip (%)	(2071-2100)	-23.4	-16.3	-12.2	-19.3	-7.9	-6.7	-23.1	-16.1	-9.5	-31.6	-23.6	-15.6	-19.9	-15.1	-11.5

* Cropper, 2013.

Fuente: AEMET, 2015. (Regionalización estadística análogos).

No obstante, los grandes modelos indican un ascenso térmico mucho más pronunciado en el vecino desierto del Sáhara que en el Atlántico (IPCC, 2013) por lo que es previsible una intensificación en los máximos térmicos que se registren durante las olas de calor puesto que el manantial de aire tropical continental será mucho más cálido. En esta línea, es previsible, además, que un incremento en la virulencia de los episodios de calor implique un mayor riesgo de incendio forestal. En este contexto, la duración de las olas de calor muestra una gran disparidad según el modelo y el escenario empleado, desde 20 días hasta 80 días más cada año (AEMET, 2015).

Al mismo tiempo, ese calentamiento diferencial entre la región de Canarias –oceánica- y la del Norte de África –continental-, sobre todo en verano, pudiera producir un incremento en la intensificación de los vientos en las costas situadas en los flancos orientales de los anticiclones semipermanentes subtropicales como consecuencia de la profundización de las bajas térmicas continentales (Semedo *et al.*, 2016). Por tanto, es probable que se incremente el flujo de los alisios. Además, se apunta hacia un ligero ascenso de la humedad relativa estival en la primera capa del alisio y descenso de la misma en las capas medias de la troposfera, por lo que algunos autores sugieren una tendencia futura hacia una disminución en la altitud del mar de nubes (Sperling *et al.*, 2004). Al mismo tiempo también podría producirse un incremento de las advecciones saharianas durante los meses más fríos por la, ya citada, mayor zonalidad del anticiclón (Alonso-Pérez *et al.*, 2011).

Por lo que respecta a las precipitaciones es una variable, como ya se ha indicado, mucho más difícil de modelizar por lo que las tendencias futuras presentan un alto grado de incertidumbre y baja significación estadística (Expósito *et al.*, 2015). Aún así, según los trabajos publicados, parece

que, en el futuro, las precipitaciones continuarán con el relativo descenso que ya se ha constatado levemente en el pasado reciente. De los cuatro archipiélagos de la Macaronesia, el más húmedo, Azores, muestra una ligera tendencia al alza, así como Cabo Verde (Cropper y Hanna, 2014). No obstante, el primero de ellos mostrará cambios en la distribución anual de la lluvia, con un incremento en el invierno y un descenso en el resto de las estaciones (Santos *et al.*, 2004). Por el contrario, Canarias es el que presenta la mayor disminución, especialmente significativa en invierno (Cropper, 2013), evaluada en una caída de entre un 10% y un 37% para la citada estación, según los modelos del IPCC, para finales del presente siglo. Otros autores indican que los valores anuales disminuirán entre un 12% y un 23% y el descenso será sobre todo otoñal (Morata Gasca, 2014; AEMET, 2015) (Cuadro 5). También se observa una disminución de los días de lluvia para finales de siglo, con un descenso general de entre 5 y 25 días anuales así como un aumento de los periodos secos (Morata Gasca, 2014; AEMET, 2015).

En cualquier caso, lo más destacado es que todos los modelos y en todos los escenarios indican siempre una tendencia al descenso en las lluvias totales. En esta misma línea, estudios sobre la distribución vertical de vapor de agua, señalan la reducción de su contenido en las nubes lo que, también podría conducir hacia una disminución de precipitaciones (Expósito *et al.*, 2015). No obstante, no se deben perder de vista las teleconexiones climáticas. Cualquier tendencia futura en la NAO, en menor medida en el ENSO y, sobre todo, en la temperatura de la superficie oceánica incidirá en las precipitaciones, al menos, en las islas más occidentales. Además, en el caso del ENSO su evolución futura podrá tener incidencia en la frecuencia de las intrusiones saharianas (Menéndez *et al.*, 2009). Estos índices parece ser que tienen repercusiones sólo en los meses más fríos del año, es decir, en los que se concentran las precipitaciones en la región macaronésica (excepto Cabo Verde) y es más habitual una circulación de componente Este, desde el Sáhara, responsable de las intrusiones saharianas. En esta línea, algunas investigaciones muy recientes indican una tendencia alcista en la frecuencia de El Niño, especialmente en los fenómenos de mayor intensidad (Cai *et al.*, 2014).

En otro orden de cosas, resulta muy complicado establecer ocurrencias futuras del paso de fenómenos inestables tropicales por la región puesto que, como se ha visto, su frecuencia, aunque más recurrente en los últimos años, es muy baja. No obstante, el previsible calentamiento de las aguas oceánicas del Atlántico, especialmente en su sector oriental (Guijarro *et al.*, 2014) puede favorecer un mayor riesgo de la llegada de más tormentas y ciclones tropicales hacia esos sectores (Kossin, 2008) en los que se sitúa la Macaronesia. A escala general del Atlántico es previsible que el número de ciclones tropicales se mantenga estable o incluso pueda disminuir ligeramente hacia finales del siglo pero los ciclones tropicales de mayor intensidad se incrementarán de manera muy apreciable (Knutson *et al.*, 2010).

Por último, los estudios sobre el nivel del mar a escala local indican, según los escenarios del IPCC, un incremento generalizado para el archipiélago (Fraile *et al.*, 2014), aumento del nivel del mar que ya ha sido constatado para Tenerife (Marcos *et al.*, 2013). Ahora bien, el aumento calculado en el nivel marino futuro encierra un grado importante de incertidumbre en cuanto a la exactitud de los valores para finales del siglo XXI (ascensos entre 18,6 y 131,5 cm según escenarios y sector del archipiélago). Asimismo, ese incremento no es homogéneo de manera que las islas centrales de Tenerife y Gran Canaria registrarán aumentos superiores a las costas de Lanzarote (Fraile *et al.*, 2014). No obstante los resultados están en consonancia con lo que se estima ocurra en el resto de las aguas oceánicas del planeta (IPCC, 2013; Church y White, 2011), lo que da consistencia estadística y confirma el ascenso del nivel del mar en el futuro.

5. Conclusiones

Como se ha visto, el calentamiento global es más que evidente en la región de la Macaronesia. Tomando Canarias como espacio central han quedado de manifiesto numerosas alteraciones en diversos parámetros.

Se han registrado cambios significativos en las temperaturas, con un aumento generalizado, especialmente acusado en las mínimas, en la alta montaña y en los últimos 40 años. El comportamiento pluviométrico muestra grandes incertidumbres como lo demuestra la falta de significación estadística en gran parte de los estudios. En un espacio geográfico con coeficientes de variación tan elevados es imprescindible contar con series aun mayores para poder llegar a resultados más concluyentes en este sentido. Aún así, las tendencias señalan, a un tiempo, un leve descenso general de los totales, aunque poco significativo, y una intensificación de las sequías. Al mismo tiempo existen cambios incipientes en la intensidad de la precipitación, con un incremento de la misma y comienzan a tener una cierta frecuencia episodios lluviosos estivales. En esta línea, como en gran parte del planeta, los años 70 parecen un punto de inflexión en la mayoría de las variables. Las tendencias futuras de los modelos también señalan un descenso pluviométrico generalizado aunque con variaciones importantes.

Entre los principales riesgos que se incrementan como consecuencia del calentamiento sobresalen el aumento en la intensidad de las olas de calor y, por tanto, de los incendios forestales, la ya señalada aparición de precipitaciones estivales y la posibilidad real de la llegada de fenómenos inestables de origen tropical a las islas.

Por otro lado, en el análisis de la bibliografía, se ha puesto de manifiesto la necesidad de un conocimiento profundo de la información meteorológica y geográfica local. Algunas publicaciones, emplean series sin un análisis exhaustivo de sus metadatos, lo que puede suponer problemas de fiabilidad que hacen, incluso, dar por ciertas afirmaciones que podrían ponerse en entredicho, tal y como ha quedado demostrado.

Finalmente, desde una perspectiva socioeconómica, se deben tener muy presentes tanto los impactos puramente ambientales como, sobre todo, la ya señalada especial vulnerabilidad de las islas pequeñas debido a sus limitados recursos, a su multidependencia del exterior y a la fragmentación social y económica. Las transformaciones que implicará la actuación tanto en la mitigación, a escala global, como en la necesaria adaptación, a escala local, tendrán importantes repercusiones sobre esos espacios. Como señalan Petzold y Ratter (2015), para aumentar la resiliencia de las comunidades insulares frente al cambio climático sólo serán efectivas la integración de acciones y medidas estructurales y no estructurales a escala local en las políticas de adaptación frente al calentamiento global.

6. Bibliografía

- AEMET (2015). *Olas de calor en España desde 1975*. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas, Agencia Española de Meteorología.
- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) (2015): *Proyecciones Climáticas para el siglo XXI en España*.
- Albert, S., León, J., Grinham, A., Church, J., Gibbes, B., & Woodfoffe, C. (2016). «Interactions between sea-level rise and wave exposure on reef island dynamics in the Solomon Islands». *Environmental Research Letters*, 11 (5).

- Alonso-Pérez, S. (2008). *Caracterización de las intrusiones de polvo africano en Canarias*. PhD Thesis at the La Laguna University (Tenerife), Centro de Publicaciones de la Secretaria General Técnica del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, Spain.
- Alonso-Pérez, S., Cuevas, S., Pérez, C., Querol, J.M., Baldasano, Draxler, R. & De Bustos, J.J. (2011). «Trend changes of African air mass intrusions in the marine boundary layer over the subtropical Eastern North Atlantic region in Winter». *Tellus*, 63 (2), 255-265.
- Ball, S. (2011). «Exceptional rainfall in Gibraltar during winter 2009/2010». *Weather*, 66 (1), 22–25.
- Banholzer, S., Kossin, J. & Donner, S. (2014). «The impact of Climate Change on Natural Disasters». En: Singh, A., & Zommers, Z. (Eds.) *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*, Springer.
- Bethencourt, J. & Dorta, P. (2010). «The storm of november 1826 in the canary islands: possibly a tropical cyclone?. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 92, 329–337.
- Brown, D.P. (2013). *Tropical cyclone report: Hurricane Nadie, 10 september–3 october 2012*. Nacional Hurricane Center. NOAA.
- Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., van Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santos, A., McPhaden, M.J., Wu, L., England, M.H., Wang, G., Guilyardi, E., & Jin, F-F. (2014). «Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming». *Nature Climate Change*, 4, 111-116.
- Cangialosi, J.P. (2010). *Tropical cyclone report: Hurricane Otto, 6-10 October 2010*. Nacional Hurricane Center. NOAA.
- Church, J.A. & White, N.J. (2011). «Sea-Level Rise from the late 19th to the early 21st Century». *Surveys in Geophysics*, 32 (4-5), 585-602.
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., Way, R., Jacobs, P., & Skuce, A. (2013). «Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature». *Environmental Research Letters*, 8.
- Cropper, T. (2013). «The weather and climate of Macaronesia: past, present and future», *Weather*, 68(11), 300–307.
- Cropper, T. & Hanna, E. (2014). «An analysis of climate of Macaronesia, 1865-2012». *International Journal of Climatology*, 34 (3), 604-622.
- De Luque, A. y Martín Esquivel, J.L. (2011). *Cualificación y homogeneización de las series climáticas mensuales de precipitación de Canarias. Estimación de Tendencias de la Precipitación. Memoria explicativa de resultados*. Agencia Canaria de Desarrollo Sostenible y Cambio Climático, Gobierno de Canarias.
- Del Río, S., Herrero, L. y Penas, A. (2009). «Tendencias recientes en la precipitación de las Islas Canarias occidentales y su relación con la oscilación del Atlántico Norte (NAO)». En: Beltrán, E., Afonso, J., García, A., Rodríguez, O. (Eds.): Homenaje al Profesor Dr. Wolfredo Wildpret de la Torre, Instituto de Estudios Canarios La Laguna, (Tenerife, Islas Canarias), 705-722.
- Díaz, J., Linares, C., García-Herrera, R. (2005). «Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones». *Revista Española de Salud Pública*, 79 (2), 145-157.
- Díaz, H., Giambelluca, T., & Eischeid, J. (2011). «Changes in the vertical profiles of mean temperature and humidity in the Hawaiian Islands». *Global and Planetary Change*, 77 (1-), 21-25.
- Domínguez-Castro, F., Trigo, R.M. & Vaquero, J.M. (2013). «The first meteorological measurements in the Iberian Peninsula: evaluating the storm of November 1724». *Climatic Change*, 118 (2), 443-455.
- Dorta, P. (1996). «Las inversiones térmicas en Canarias». *Investigaciones Geográficas*, 15, 109-124.
- Dorta, P. (2001). «Aproximación a la influencia de las advecciones de aire sahariano en la propagación de los incendios forestales en la provincia de Santa Cruz de Tenerife». *XVII Congreso de Geógrafos Españoles*, Oviedo, 158-162.
- Dorta, P., Gelado, M.D., Hernández, J.J., Cardona, P., Collado, C., Mendoza, S., Rodríguez, M.J., Siruela, V. y Torres, M.E. (2005). «Frecuencia, estacionalidad y tendencias de las advecciones de aire sahariano en Canarias (1976-2003)». *Investigaciones Geográficas*, 38, 23-45.
- Dorta, P., Marzol, M.V. & Valladares, P. (1991). «Localisation et fréquence des cellules de pression dans l'Atlantique Nord, l'Europe occidentale et le nord de l'Afrique (1983-1992) ». *Association Internationale de Climatologie*, 6, 452-466.
- Expósito, F.J., González, A., Pérez, J.C., Díaz, J.P. & Taima, D. (2015). «High-Resolution Projections of Temperature and Precipitation in the Canary Islands». *Journal of Climate*, 28, 7846-7856.

- Fernández-Palacios, J.M., de Nascimento, L., Otto, R., Delgado, J., García-del-Rey, E., Arévalo, J.R., & Whittaker, R.J. (2011). «A reconstruction of Palaeo-Macaronesia, with particular reference to the long-term biogeography of the Atlantic island laurel forests». *Journal of Biogeography*, 38, 226-246.
- Fragoso, M., Trigo, R.M., Pinto, J.G., Lopes, D., Ulbrich, S., & Magro, C. (2012). «The 20 February 2010 Madeira flash-floods: synoptic analysis and extreme rainfall assessment». *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 715-730.
- Fraile, E., Sánchez, E., Fernández, M., Pita, M^a. F. y López, J.M. (2014) «Estimación del comportamiento futuro del nivel del mar en las islas canarias a partir del análisis de registros recientes», *Geographica*, 66, 79-98.
- Franklin, J.L. (2006). *Tropical cyclone report: Hurricane Vince, 8–11 October 2005*. National Hurricane Center. NOAA.
- Gallego, D., García, R., Hernández, E., Gimeno, L. & Ribera, P. (2001). «An ENSO signal in the North Atlantic subtropical area». *Geophysical Research Letters*, 28 (15), 2939-2942.
- García, R., García, O., Cuevas, E., Cachorro, V., Barreto, A., Guirado-Fuentes, C., Kouremeti, N., Bustos, J., Romero-Campos, P. & de Frutos A. (2016). «Aerosol optical depth retrievals at the Izaña Atmospheric Observatory from 1941 to 2013 by using artificial neural networks». *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 53-62.
- García-Herrera, R., Gallego, P. & Hernández, E. (2001). «Influence Of The North Atlantic Oscillation On The Canary Islands Precipitation». *Journal of Climate*, 14, 3889-3903.
- García-Herrera, R., Gallego, D., Hernández, E., Gimeno, L., Ribera, P & Calvo, N. (2003). «Precipitation trends in the Canary Islands». *International Journal of Climatology*, 23 (2), 235–241.
- García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R. M., & Hernández, E. (2005). «Extreme summer temperatures in Iberia: health impacts and associated synoptic conditions». *Annales Geophysicae*, 23, 239-251.
- Gonzalez, S. & Bech, J. (2017). «Extreme point rainfall temporal scaling: a long term (1805–2014) regional and seasonal analysis in Spain». *International Journal of Climatology*, 37(15).
- Guijarro, J.A., Conde, J., Campins, J., Picornell, M.A. y Orro, M.L. (2014). «Tendencias de viento, oleaje y temperatura superficial Mediterráneo y Atlántico próximos a partir de datos de reanálisis». En: Fernández-Montes, S. y Rodrigo, F.S. (Eds.): Cambio climático y cambio Global. Asociación Española de Climatología, Serie A, 9, 315-324.
- Hernández, S., Tarife, R., Gámiz, R., Castro, Y. y Esteban, M.J. (2012). «Estudio de las sequías en las Islas Canarias mediante el análisis de índices multiescalares». En: Rodríguez, C.; Ceballos, A; González, N; Morán, E y Hernández, A. (Eds.): Cambio climático. Extremos e impactos. Asociación Española de Climatología, Serie A, 8, 421-430.
- Herring, S.C., Hoerling, M.P., Kossin, J.P., Peterson, T.C. & Scott, P.A. (Eds.) (2015). *Explaining extreme events of 2014 from a climate perspective*. Bulletin of American Meteorological Society, 96 (12).
- Herring, S.C., Hoell, A., Hoerling, M.P., Kossin, J.P., Schreck, C.J. & Scott, P.A. (Eds.) (2016). *Explaining extreme events of 2015 from a climate perspective*. Bulletin of American Meteorological Society, 97 (12).
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P. & Jarvis, A. (2005). «Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas». *International Journal of Climatology*, 25 (15), 1965-1978.
- IEPP (2013). *Impacts of Climate Change on all European island. Final Report*. Institute for European Environmental Policy (IEEP), United Kingdom and Belgium, 146.
- IPCC (2013). «Climate Change 2013: The Physical Science Basis». In: Stocker, Thomas., Quin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midley, P. (Eds.): Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 1535.
- Jansa, A., Homar, V., Romero, R., Alonso, S., Guijarro, J. & Ramis, C. (2016). «Extension of summer climatic conditions into spring in the Western Mediterranean area». *International Journal of Climatology*, 37 (4), 1938-1950.
- Jorba, O., Marrero, C., Cuevas, E. & Baldasano, J. M. (2008). «High resolution modelling results of the wind flow over Canary Islands during the meteorological situation of the extratropical storm Delta (28-30 November 2005)». *Advances in Science and Research*, Copernicus Publications, 2, 81-87.
- Knutson, T.R., McBride, J.L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J.P., Srivastava, A.K. & Sugi, M. (2010). «Tropical cyclones and climate change». *Nature Geoscience*, 3, 157-163.
- Kossin, J. P. (2008). «Is the North Atlantic hurricane season getting longer?» *Geophysical Research Letters*, 35, L23705.

- Krichak, S.O., Breitgand, J.S., Gualdi, S. & Feldstein, S. (2014). «Teleconnection–extreme precipitation relationships over the Mediterranean region». *Theoretical and Applied Climatology*, 117, 3-4, 679-692.
- López, A., Dorta, P., Romero, C. y Díaz, J. (2015). «Movimientos de ladera en Canarias. El caso del Macizo de Anaga en el temporal de febrero de 2010». En: *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza AGE. 1725-1734.
- Luque, A., Martín, J., Dorta P. & Mayer, P. (2014). «Temperature Trends on Gran Canaria (Canary Islands). An Example of Global Warming over the Subtropical Northeastern Atlantic». *Atmospheric and Climate Sciences*, 4(1), 20-28.
- MAPAMA (2016). Emisiones de GEI por Comunidades Autónomas a partir del Inventario Español – serie 1990-2014. Informe Ministerio de Agricultura Alimentación y Medioambiente.
- Marcos, M., Puyol, B., Calafat, F. & Woppelmann, G. (2013). «Sea level changes at Tenerife Island (NE Tropical Atlantic) since 1927». *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 4899–4910.
- Martín, J.L., Bethencourt, J. & Cuevas-Agulló, E. (2012). «Assessment of global warming on the island of Tenerife, Canary Islands (Spain). Trends in minimum, maximum and mean temperatures since 1944». *Climatic Change*, 114, 343-355.
- Martín, J.L., Marrero, M.V., Del Arco, M. y Garzón, V. (2015). «Aspectos clave para un plan de adaptación de la biodiversidad terrestre de Canarias al cambio climático» En: *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: Impactos, vulnerabilidad y Adaptación en España*, MAAMA, Madrid, 573-580.
- Martín, F., Alejo, C., Bustos, J., Calvo, F., Sanambrosio, J., Sánchez-Laulhé, J., Santos, D. (2005). «Estudio de la tormenta tropical Delta y su transición extratropical: efectos meteorológicos en Canarias». *Agencia Estatal de Meteorología*.
- Marzol, M.V. y Máyer, P. (2012). «Algunas reflexiones acerca del clima de las Islas Canarias». *Nimbus* 29-30, 399-416.
- Marzol, M.V., Yanes, A., Romero, C., Brito de Acebedo, E., Prada, S. y Martins, A. (2006) «Los riesgos de las lluvias torrenciales en las islas de la Macaronesia (Azores, Madeira, Canarias y Cabo Verde)». En: *Cuaderns et al (Eds.). Clima, Sociedad y Medio Ambiente*, AEC, Zaragoza, 443-452.
- Máyer, P; Marzol, M.V. y Parreño, J.M. (2015). «Tendencias de la precipitación en Canarias», En: M^a. C. Cabrera, T. Cruz-Fuentes, V. Mendoza-Grimón y M^a P. Palacios-Díaz (Eds.). *Aprovechamiento y gestión del agua en terrenos e islas volcánicas (II Workshop)*. Instituto Geológico y Minero de España y Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Las Palmas de Gran Canaria., 223-230.
- Máyer, P. y Marzol, M. V. (2014). «Análisis de las temperaturas extremas en las islas canarias y su relación con los avisos de alertas meteorológicas». En: Fernández-Montes, S. y Rodrigo, F.S. (Eds.) *Cambio climático y cambio Global*. Asociación Española de Climatología, Serie A, 9, 391-400.
- Mayer, P. y Marzol, M. V. (2014). «Daily precipitation concentration and the rainy spells in the Canary Islands: two risk factors». *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 231-247.
- Máyer P; Marzol, M.V. & Parreño, J.M. (2017). «Precipitation trends and daily precipitation concentration index for the mid-eastern Atlantic (Canary Islands, Spain)», *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43.
- Menéndez, I., Derbyshire, E., Engelbrecht, J.P., von Suchodoletz, H., Zöller, L., Dorta, P., Carrillo, T., Rodríguez de Castro, F. (2009). «Saharan dust and the aerosols on the Canary islands: Past and present.» En: Cheng, Ming; Liu, Wen (Eds.): *Airborne particulates*. New York: Nova Science Publishers, 39-80.
- Moulin, C., Lamber, C. W., Dulac, F. and Dayan, U. (1997). «Control of atmospheric exports of dust from North Africa by the North Atlantic oscillation». *Nature*, 387, 691-694.
- Morata, A. (2014). *Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4*. AEMET, Madrid.
- Petzold, J. & Ratter, B.M.W. (2015). «Climate change adaptation under a social capital approach. An analytical framework for small islands». *Ocean & Coastal Management*, 112, 36-43.
- Ratter, B.M.W. & Petzold, J. (2012). «From Ecological Footprint To Ecological Fingerprint. Sustainable development on Helgoland From one island to another. A Celebration of Island Connections», En: Topsø Larsen K (Eds.): *Centre For Regional And Tourism Research*, 191-203.
- Rodríguez-Fonseca, B., Polo, I., Serrano, E. & Castro, M. (2006). «Evaluation of the North Atlantic SST forcing on the european and northern african winter climate». *International Journal of Climatology*, 26(2), 179-191.

- Salat, J., Lavín, A., González-Pola, J., Vélez-Belchi, P., Sánchez, R., Vargas-Yáñez, M., García Lafuente, J., Marcos, M. & Gomis, D. (2017). «Oceanic variability and sea level changes around the Iberian Peninsula, Balearic and Canary Islands». *CLIVAR Exchanges*, 73, 32-38.
- Sánchez-Benítez, A., García-Herrera, R. & Vicente-Serrano, S. (2016). «Revisiting precipitation variability, trends and drivers in the Canary Islands». *International Journal of Climatology*.
- Sanroma, E., Palle, E. & Sánchez-Lorenzo, A. (2010). «Long-term changes in insolation and temperatures at different altitudes». *Environmental Research Letters*, 5.
- Smedo, A., Soares, P.M., Lima, D.C., Cardoso, R.M., Bernardino, M. & Miranda, P.M. (2016). «The impact of climate change on the global coastal low-level wind jets: EC-EARTH simulations». *Global and Planetary Change*, 137, 88-106.
- Sperling, F.N., Washington, R & Whittaker, R.J. (2004). «Future climate change of the subtropical North Atlantic: implications for the cloud forests of Tenerife», *Climatic Change*, 65, 103-123.
- Tarife Méndez, R., Hernández Barrera, S., Gámiz-Fortis, S.R., Castro-Díez, Y. Esteban-Parra, Ma.J. (2012). Análisis de los extremos pluviométricos en las islas Canarias y su relación con el índice NAO. VIII Congreso Internacional AEC. Salamanca
- Trenberth, K.E. (2011). «Changes in precipitation with climate change», *Climate Research*, vol. 47, 123-138.
- Vaquero, J. M., García-Herrera, R., Wheeler, D., Chenoweth, M., & Mock, C. J. (2008). «A historical analog of 2005 hurricane Vince». *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(2), 191-201.
- Vicente-Serrano, S., Azorín Molina, C., Sánchez-Lorenzo, A., El Kenawy, A., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Beguería, S. & Tomas-Burguera, M. (2016). «Recent changes and drivers of the atmospheric evaporative demand in the Canary Islands». *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3393-3410.

Sobre los autores

PEDRO DORTA ANTEQUERA

Doctor en Geografía por la Universidad de La Laguna (ULL) con premio extraordinario de doctorado. Profesor Titular de Geografía Física. Previamente impartió docencia como profesor asociado a tiempo completo (1990-1992) y en clases de master (2008-2011) en la Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Ha centrado sus investigaciones en recursos hídricos, riesgos climáticos, advecciones de aire del Sáhara y transporte de polvo sahariano y Climatología Histórica, con la publicación de medio centenar de trabajos entre artículos, comunicaciones a congresos y libros. Ha participado en varios Proyectos de Investigación nacionales e internacionales y ha sido asesor en varios convenios con instituciones públicas y empresas privadas en materia de Climatología, Riesgos y Emergencias. Ha sido secretario del Centro de Estudios Ecosociales de la ULL, del grupo de Climatología de la Asociación de Geógrafos Españoles (AGE) y de la Asociación Española de Climatología (2012-2016) así como Director del Departamento de Geografía de la ULL (2011-2015). En la actualidad es Director de la Cátedra de Reducción de Riesgos de Desastres. Ciudades Resilientes de la ULL

ABEL LÓPEZ DÍEZ

Titulado en el Máster de Planificación y Gestión de Riesgos Naturales por la Universidad de Alicante y Licenciado en Geografía por la Universidad de La Laguna (ULL), obteniendo en ambos premio extraordinario. Miembro del grupo de investigación GeoRiesgos y de la cátedra «Reducción del Riesgo de Desastres. Ciudades Resilientes» de la ULL. Actualmente es becario de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia, adscrito al Departamento de Geografía e Historia de la ULL. Realiza sus estudios de doctorado vinculados al análisis de los procesos de adaptación frente al Cambio Climático en espacios insulares. Sus intereses de investigación se han centrado en el ámbito de la Climatología y la Geomorfología.

JAIME DÍAZ PACHECO

Doctor en Geografía por la Universidad Complutense de Madrid, es experto en Sistemas de Información Geográfica, especializándose en el desarrollo de modelos de cambios de usos de suelo basados en sistemas complejos. Alrededor de este campo de estudio acumula la mayoría de sus publicaciones y participación en congresos científicos. Desde 2014 es miembro del grupo de investigación «GeoRiesgos» de la Universidad de La Laguna y coordinador de la Unidad de Investigación de la Cátedra Científica Cultural y Tecnológica «Reducción del Riesgo de Desastres. Ciudades Resilientes», donde colabora activamente en el desarrollo de líneas de investigación dentro el campo de la gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático. Dentro de esta área ha participado en el desarrollo de planes territoriales de emergencias y trabaja en el desarrollo de metodologías para la evaluación local de riesgos integrada y participativa.