

Atlas Climático Interactivo de Canarias
Fuentes de datos, metodología y resultados

**Grupo de Geografía Física y Medio Ambiente de la Universidad de Las Palmas de Gran
Canaria (ULPGC)**

Pablo Lucas Mayer Suarez: pablo.mayer@ulpgc.es
Angel Luis de Luque Söllheim: angel.luquesolheim@ulpgc.es
Fabián García Hernández: fabian.garcia@fpct.ulpgc.es

Diciembre 2022

Contenido

Resumen ejecutivo	3
Introducción.....	3
Metodología	4
1. Metodología de generación de mapas de variables esenciales.....	4
1.1 Temperatura.....	7
1.2 Precipitación.....	8
1.3 Humedad Relativa	11
1.4 Velocidad del viento.....	13
1.5 Nubosidad.....	15
2. Generación de mapas de Köppen	16
3. Generación mapas de tendencias	16
Resultados.....	18
4. Mapas de las diferentes variables climáticas.....	18
4.1 Temperatura.....	18
4.2 Precipitación.....	22
4.3 Humedad Relativa	25
4.4 Intensidad de viento.....	28
4.5 Nubosidad	30
5. Mapas de Köppen.....	32
6. Mapas de tendencias	35
Agradecimientos.....	39
Referencias	40

Resumen

Las islas de reducidas dimensiones horizontales (no mayores de 30-50 km de diámetro) y compleja orografía con cumbres superiores a los 1.500 m de altitud, profundos barrancos y escarpadas costas, tienen diversos topoclimas. Estos son observables a partir de la generación de mapas climáticos a una resolución espacial menor de los 300 metros. En este trabajo se han obtenido datos de estaciones meteorológicas, de reanálisis y de teledetección de las principales variables climáticas (temperatura, precipitación, humedad relativa, viento y nubosidad) de los últimos 30 - 50 años y se han generado mapas anuales y mensuales promediados entre 1991 y 2020 a unos 100 metros de resolución espacial de las Islas Canarias. Estas variables climáticas básicas son utilizadas, en una segunda fase, para el desarrollo de mapas de clasificación de Köppen y de mapas de tendencias decadales de la temperatura y la precipitación. Los primeros terminan de definir los topoclimas de forma detallada en las islas, muy relacionados con la compleja topografía, y los segundos permiten vislumbrar los cambios de estas variables climáticas a pequeña escala espacial, pero con probable relación con el cambio climático experimentado en esta región del Atlántico. Estos mapas son el resultado de un trabajo de procesado de datos observados y representación precisa posterior a una resolución espacial de 100 metros. Los mapas anuales y mensuales promediados para todo el periodo de análisis (últimos 30 años), así como los mapas climáticos de Köppen actualizados y mapas de tendencias, son accesibles de forma gratuita a través de la web del Sistema de Información Territorial de Canarias (SITCAN) del Gobierno de Canarias.

Introducción

La generación de este atlas, a iniciativa del Gobierno de Canarias, es fruto del convenio de colaboración firmado entre Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. En este proyecto también ha participado de manera activa la empresa GRAFCAN, SA, gracias a la cual se pueden mostrar los resultados en un entorno virtual a través de la web. Los objetivos de este atlas interactivo son los siguientes: (i) exponer de forma descriptiva las peculiaridades del clima de Canarias con textos explicativos, además de mapas de alta resolución espacial de forma interactiva y con gráficos dinámicos y (ii) mostrar los efectos del cambio climático reciente a partir de mapas de tendencias a alta resolución espacial con información sobre su validez estadística y de interpretación directa.

En general, los atlas digitales proveen datos de cobertura global de diferentes variables climáticas a una resolución de entre 50 a 5 km como, por ejemplo, el descrito por Harris et al. (2014), de 21 km de resolución entre 1960 y 2018, para el “Global Climate and Weather data” (WorldClim) y el reciente atlas del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) con mapas de temperaturas, precipitaciones y tendencias globales a unos 25 km de resolución descrito por Iturbide et al. (2021). Estos son ilustrativos del clima y sus cambios en grandes llanuras, desiertos y cuencas continentales, no así para pequeños sistemas montañosos en general e islas de orografía compleja como el caso que nos ocupa. Otros proveen datos de mayor resolución espacial pero no cubren el periodo climático reciente (1991-2020), sino anteriores por ejemplo el descrito por Fick et al. (2017) de 1 km de resolución espacial, pero del periodo

entre 1970 y 2000. Otros centrados en islas o regiones específicas como el de “Climate of Hawaii”, descrito por Giambelluca et al. (2014) y el Atlas Climático Digital de la Península Ibérica de Ninyerola et al. (2005) muestran mapas de variables climáticas a unas resoluciones entre 200 y 300 m. Aunque son resoluciones espaciales convenientes para regiones de orografía compleja, el segundo no cubre el archipiélago canario.

Es por todo ello que este trabajo se ha centrado en la generación y difusión de mapas climáticos de Canarias a una resolución espacial sin precedentes -de 100 m- con el objetivo de permitir la visualización del máximo de detalles climáticos y sus cambios en el periodo climático reciente de 1991 a 2020. La primera parte de la metodología en este documento se centra en la descripción de la generación de los mapas de las variables climatológicas esenciales. Estas, con sus unidades, son las siguientes:

- La temperatura (mínima, media y máxima en °C).
- La precipitación (acumulación mensual y anual en mm)
- Humedad relativa (en %)
- Velocidad del viento (en m/s)
- Nubosidad (frecuencia nubosa en %)

En una segunda fase, tras finalizar el desarrollo y evaluación de las variables esenciales principales como la temperatura y la precipitación, se procedió a elaborar los mapas de clasificación climática de Köppen y de tendencia decadal de la temperatura y de la precipitación. Seguidamente se muestra la metodología empleada para la generación de los diferentes productos que se muestra en el atlas.

Metodología

1. Metodología de generación de mapas de variables esenciales

Los datos de las observaciones de los últimos 50 años (1970-2020) han sido adquiridos a partir de redes gestionadas por organismos nacionales y regionales competentes entre las que destacan la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), la Red de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) cuya base de datos coincide con las del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), los Cabildos Insulares de La Palma, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. También se han adquirido datos de reanálisis superficiales del ERA5-Land y MESCAN-SURFEX generados por el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF) de 9 y 5 km de resolución espacial respectivamente del portal web de Copernicus.

Los datos obtenidos a partir de las observaciones de las estaciones de medición son series temporales mensuales, y estas han sido sometidas a procesos de control y corrección con el objetivo de depurar errores, corregir inhomogeneidades e interpolación final para la generación de mapas. Estos procesos se reducen principalmente a tres, referidos en el informe con estos nombres:

- Filtrado. Análisis pormenorizado de todas las series filtrando aquellas con menos de 5 años completos, variando este umbral según la cantidad de series disponibles para cada parámetro y teniendo en cuenta su variabilidad (7 para temperatura y humedad relativa, 15 para precipitación y 5 para vientos). Detección de errores con valores

extremos que superan umbrales estadísticos establecidos a partir de los datos de la propia serie y cuando estos aparecen de forma aislada sin reflejo en las demás series de la red, por tanto, no relacionadas con el clima sino con peculiaridades ocurridas con la medición en la estación de observación. El tercer paso es un rellenado de huecos espurios por correlación cruzada (mayor de 0,86) con las series cercanas en cada isla.

- Homogeneización. Proceso de homogeneización de las series a partir de la detección y corrección de saltos de la media en series aisladas, y por lo tanto no relacionadas con el clima, sino con peculiaridades ocurridas con la medición en la estación de observación. Para este proceso se ha utilizado el software “climatol” (Guijarro, 2004; Guijarro, 2016) disponible como *paquete de R*. Este es semiautomático y diseñado para tratamiento iterativo de grandes redes de datos diarios y/o mensuales. Se ha considerado en todo caso, que los datos provistos por las distintas redes son correctos en general, detectando y corrigiendo fragmentos de los saltos más evidentes en series aisladas y comprobando que estas correcciones disminuyen ligeramente las desviaciones estándar y apenas provocan cambios en las tendencias de la red en cada isla.
- Interpolación. Generación de un modelo espacial por regresión lineal múltiple, con corrección por residuos a partir de las observaciones de las estaciones meteorológicas homogeneizadas y puntos de reanálisis. La interpolación lineal múltiple se enriquece con información geográfica con un mapa digital de elevaciones del terreno de 25 m de resolución espacial de origen Lidar obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y modificado posteriormente a 100 m para su utilización en este atlas. Los parámetros geográficos extraídos de este mapa digital que afectan a la distribución de las variables climáticas son: la latitud (LAT), la longitud (LON), la elevación (ELE), la orientación (ORI) y la pendiente (PEN). Por regresión lineal de cada uno de estos parámetros geográficos y los datos homogeneizados sobre los puntos de las estaciones, se obtiene en cada iteración temporal un coeficiente de regresión, $a_1, \dots, a_5$, mostrados en la siguiente ecuación 1. El resultado de la aplicación del modelo espacial una vez determinados los coeficientes de regresión, no es exacto. Para mejorar las estimaciones se genera en paralelo una capa de residuos (RES) que representa las diferencias entre las estimaciones del modelo espacial y las observaciones introducidas. La inclusión de los residuos en la interpolación final permite la generación de un mapa optimizado con respecto a las observaciones homogeneizadas. Cada punto del mapa generado (Y) en cada iteración temporal depende de los coeficientes de regresión obtenidos, los parámetros geográficos y los residuos, tal y como se muestra a continuación (ecuación 1).

$$Y = a_1 \cdot LAT + a_2 \cdot LON + a_3 \cdot ELE + a_4 \cdot ORI + a_5 \cdot PEN + RES \quad (1)$$

En el último paso de la interpolación se aplica una limitación de valores máximos y mínimos en zonas con pocas observaciones (áreas costeras remotas, acantiladas y zonas montañosas altas). Se estable umbrales máximos y mínimos a partir de los datos de las series climáticas homogeneizadas para impedir que el modelo derive a valores irreales por lejanía respecto puntos con observaciones. Como elemento de evaluación, tras la generación de cada mapa, se extrae una gráfica que muestra en el eje horizontal el resultado previsto por el modelo de regresión y en el eje vertical el dato observado

homogeneizado tal y como se muestra en la figura 1 de ejemplo. El mejor resultado es aquel en el que los puntos de cada estación identificada por su código se encuentren en la diagonal representada de forma ideal por la línea azul. Tras el ajuste lineal verdadero representado por la línea roja, se obtiene tres estadísticos: el coeficiente de correlación al cuadrado (R^2), la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y el error absoluto medio (MAE). Hay que destacar que el resultado previsto por el modelo de regresión no considera el residuo ya que de considerar éste se obtendría un ajuste casi perfecto con los datos alineados sobre la línea azul. Se han utilizado estas gráficas para identificar estaciones con resultados anómalos alejadas de la diagonal y sometidas, por tanto, a revisión individual volviendo al proceso de filtrado para su eliminación o bien al de homogeneización para su posterior corrección.

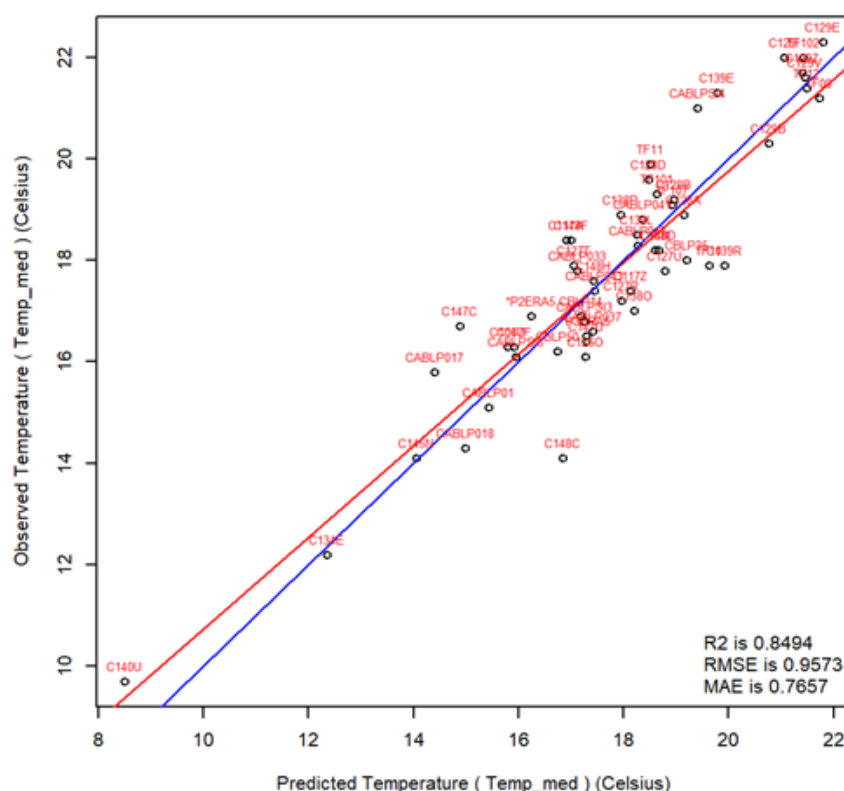


Figura 1. Tipo de gráfico de ejemplo utilizado como herramienta de evaluación tras la generación de cada mapa.

Tras estos procesos realizados con las series mensuales, se obtiene los mapas mensuales y anuales de cada variable promediada para los periodos climáticos analizados, entre 1991 y 2020, salvo la precipitación que son acumulaciones mensuales y acumulación anual en mm promediados para un periodo mayor entre 1980 y 2020. Hay que destacar que estos periodos pueden diferir en cierta medida en cada isla dependiendo de la disponibilidad de datos. El proceso final, tras una revisión de los resultados, es ponerlos a disposición del usuario a partir de una herramienta web desarrollada para tal fin. A continuación, se muestran detalles de la metodología del desarrollo de cada variable donde la nubosidad, sin embargo, ha requerido un proceso distinto al ser el origen de estos, datos de teledetección.

1.1 Temperatura

Las series de temperatura mínima, máxima y media en cada estación meteorológica han sido facilitadas por las instituciones involucradas en la operatividad de las redes de medición. Tal y como se muestra en la tabla 1.1. la distribución numérica y espacial es desigual y dispersa a escala insular, pues existen amplias zonas sin información. Las tres redes de medición que se han utilizado (AEMET, Cabildos Insulares de Tenerife y La Palma e ICIA) suman un total de 420 series.

En el proceso de filtrado han sido útiles para este trabajo en torno al 50% de ellas (un total de 211), debido a la necesidad de considerar sólo las que tienen una longitud mínima de 7 años completos en el periodo de análisis (1991-2020). Para suplir las carencias de datos en áreas con pocas estaciones y guiar a las demás en el proceso de homogeneización, se han incluido puntos de reanálisis del ERA5-Land (ver detalles en las referencias) de unos 9 km de resolución espacial. Estos puntos son modelizados, aunque asimilando datos de observaciones durante la ejecución del modelo del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF). Posteriormente son puestos a disposición de todos los usuarios a través del sistema de distribución de datos de Copernicus. Los puntos de grid de reanálisis han requerido modificar su posición en el entorno original, a la altura indicada por el reanálisis y en áreas abiertas, evitando fondos de barranco. La segunda parte del proceso de filtrado ha consistido en detectar las temperaturas extremas en las series. Estas se han considerado como aquellas que superan el umbral de tres veces el rango intercuartílico por encima del tercer cuartil (75%) de la serie completa (temperaturas altas extremas) y por debajo del primer cuartil (25%) de la serie (temperaturas bajas extremas). Previamente a la eliminación de estos valores extremos se comparan con las del resto de las series para determinar si podían estar relacionadas con olas de calor o de frío, procediendo a la eliminación si estos valores extremos ocurrían de forma aislada sin aparición de extremos en otras series que coincidan temporalmente. En un tercer proceso se procedió al rellenado de pequeños huecos por correlación cruzada, comparando las series de la red por cercanía. Solo aquellos que obtienen una correlación mayor del 0,86 son rellenados. En general el balance final en todo el archipiélago es que un 0,02% de valores extremos son eliminados mientras que un 2,2% de huecos espurios son rellenados con respecto a la cantidad total de datos de las series de temperatura procesadas. En la siguiente tabla 1.1 se muestra por isla las series utilizadas de cada institución para cada isla y las resultantes al final tras todo el proceso de filtrado.

Tabla 1.1. Disponibilidad de series de temperatura y resultado tras el proceso de filtrado.

	AEMET		CABILDO INSULAR			ICIA		ERA5-Land	TOTAL
	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años	Series compartidas con la AEMET	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años		
La Palma	36	28	17	6	0	6	5	6	45
La Gomera	34	21	0	0	0	2	2	2	25
El Hierro	24	16	0	0	0	1	1	3	20
Tenerife	120	48	56	50	27	9	8	9	115
Gran Canaria	68	32	0	0	0	6	5	7	44
Fuerteventura	16	6	0	0	0	2	2	5	13
Lanzarote	15	12	0	0	0	8	2	7	21
TOTAL	313	163	73	50	27	34	25	39	277

En el proceso de homogeneización de las temperaturas se ha tomado unos umbrales de SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) entre 40 y 45 lo que implica correcciones, en promedio, del 20% de las series en todo el archipiélago.

En el proceso de interpolación se ha aplicado el modelo de regresión lineal múltiple a partir de un mapa de elevaciones del IGN de 100 m de resolución, como paso final tras el proceso de filtrado y de homogeneización. El modelo se aplica para el territorio de cada isla por separado obteniendo en cada una de ellas un mapa de temperatura mínima, media y máxima mensual y anual promediados para todo el periodo entre 1991 y 2020. Se muestran los resultados estadísticos numéricos al comparar los datos interpolados de los mapas (sin considerar los residuos), con los datos observados homogeneizados así como un ejemplo de mapa general de las islas extraído de la aplicación web en el apartado de resultados.

1.2 Precipitación

Las series de precipitación utilizadas para generar los mapas han sido de acumulación mensual de precipitación en mm. La metodología de procesado de series y generación de mapas de precipitación es, en general, similar al realizado con la temperatura salvo que el número de estaciones es más numeroso. Por este motivo se ha prescindido de puntos de reanálisis y se ha sectorizado las redes de medida en vertientes norte, sur y cumbres en las islas de mayor altura como La Palma y Tenerife. Tal y como se observa en la siguiente tabla 1.2, de las 1.467 series disponibles en las bases de datos de diferentes instituciones (AEMET, Cabildos Insulares e Instituto Canario de Investigaciones Agrarias –ICIA–), aproximadamente el 48% han podido utilizarse (706 series), pues se han eliminado duplicidades en las series compartidas por la AEMET y los Cabildos Insulares y aquellas que no cumplen con el criterio general de tener, al menos, 15 años de datos en el periodo de análisis en el proceso de filtrado.

Tabla 1.2. Disponibilidad de series de precipitación y resultado tras el proceso de filtrado.

	AEMET		CABILDO INSULAR			ICIA		TOTAL
	Nº de series	Nº de series ≥ 15 años	Nº de series	Nº de series ≥ 15 años	Series compartidas con la AEMET	Nº de series	Nº de series ≥ 15 años	
La Palma	123	47	18	0	0	6	1	48
La Gomera	105	24	0	0	0	2	2	26
El Hierro	62	26	0	0	0	1	0	26
Tenerife	388	105	57	31	27	9	5	141
Gran Canaria	196	103	318	237	114	6	4	344
Fuerteventura	32	15	50	40	12	2	1	56
Lanzarote	35	27	49	38	20	8	0	65
TOTAL	941	347	492	346	173	34	13	706

Hay que señalar que, dada la irregularidad de la distribución de la precipitación en Canarias tanto en el tiempo como en el espacio, se ha incrementado el periodo de análisis de generación de los mapas de precipitación al máximo dado por la disponibilidad de series de medición. Es por ello

que se ha comprobado que este periodo de análisis no es el mismo en todas las islas. Mientras que en las de la provincia de las Palmas el periodo seleccionado fue de 1970 a 2020, en la de Santa Cruz de Tenerife varía en cada isla debido al escaso número de series en la década de 1970. Así, las series de la isla de La Palma y El Hierro comienzan en 1975, mientras que en la isla de La Gomera comienzan en 1980. En la siguiente figura 1.2.1 se muestra el promedio anual de las series disponibles en las islas occidentales (a) y orientales (b). Se puede observar, en el primer grupo de islas (a) el mayor número de series operativas se concentra en el periodo 1982-2008. A partir de este último año la disminución del número de series es drástica en El Hierro, donde no llegan a 10 –hay meses que sólo hay 5 datos disponibles para toda la isla- y en La Gomera, pues hay menos de 15 pluviómetros registrando datos. Este problema no se observa en las islas orientales (b) gracias a la labor realizada, en un primer momento, por el Servicio Hidráulico de las Palmas y, posteriormente, por los Consejos Insulares de Aguas pertenecientes a los Cabildos Insulares, así como a la labor realizada por la AEMET en el mantenimiento de los observadores de estas redes pluviométricas.

En la fase de filtrado además de desechar las series de menos de 15 años, se detectaron los valores extremos de cada serie, tomándose como tal aquellos que superan el umbral de 9 veces la desviación estándar de la serie completa. Estos se compararon con los valores extremos de las demás series siendo eliminados en el caso de ser eventos únicos aislados y permaneciendo en el caso de aparición de valores extremos en series de su entorno coincidentes temporalmente.

En la fase de homogenización de las series se detecta y corrige saltos de la media de cada serie debido a causas no climáticas. Al igual que con la temperatura, se ha utilizado Climatol como software de homogeneización. Éste compara de forma iterativa cada tramo de serie con los de su entorno, corrigiendo aquellos tramos afectados por saltos en la media no contrastados por series de su entorno, y por ello, no relacionados con el clima. El umbral de SNHT para la precipitación mensual se ha situado en torno a 20 y ha realizado correcciones al 15% de las series.

En el proceso de interpolación se ha utilizado el modelo espacial por regresión lineal múltiple con corrección por residuos a partir de las observaciones de las estaciones meteorológicas homogeneizadas. Para ello se utilizó la ecuación (1) pero con unos coeficientes a_i obtenidos por regresión a partir de las propias series de precipitación. En las islas de mayor altura como Tenerife y La Palma se realizó la separación mostrada en la figura 4.2.1, en la sección de resultados, con el objetivo de representar esta variable de forma fiel a los datos de las observaciones y evitar que se vincule esta variable de forma casi directa a la orografía en las zonas con escasez de observaciones. Se puede observar en estas figuras que la separación ha sido la siguiente: laderas norte con influencia de los vientos alisios del noreste y laderas sur, ambas por debajo de los 1.200 m de altitud y zona alta por encima de esta cota.

El resultado final son mapas interpolados de precipitación acumulada mensual (unos 12 mapas, uno por mes), y un mapa de precipitación acumulada anual en cada isla. Estas acumulaciones mensuales y anuales han sido promediadas para cada isla según la disponibilidad de datos. Así, las islas orientales (Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote) con mayor cantidad de datos de precipitación el periodo utilizado es de 1970 al 2020, mientras que las occidentales es de 1975 al 2020 las islas de La Palma, El Hierro y Tenerife y de 1980 al 2020 la isla de la Gomera.

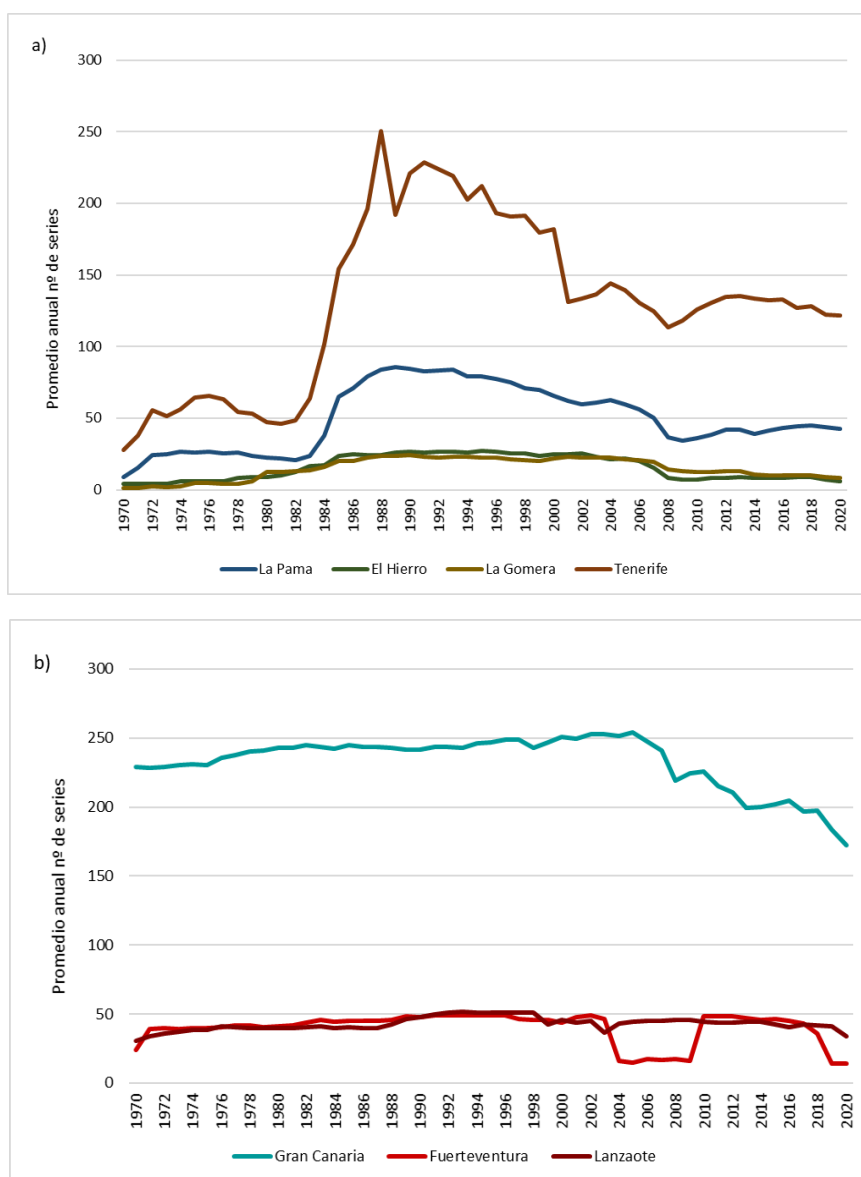


Figura 1.2.1. Promedio anual del número de series de precipitación en las islas occidentales (a) y en las orientales (b)

1.3 Humedad Relativa

La información higrométrica la proporciona un total de 150 estaciones distribuidas de manera irregular por las islas. El escaso número de series en todas las islas, salvo Tenerife (gracias a la incorporación de los datos de la red de AGROCABILDO), motiva la incorporación de puntos de cuadrícula con datos de humedad relativa de reanálisis del UERRA (MESCAN-SURFEX) de 5,5 km de resolución espacial, con el objetivo de completar las series en las zonas con menor cobertura por estaciones terrestres. Se ha seleccionado este reanálisis porque tiene una resolución espacial que duplica a la del ERA5-Land, y es capaz de definir en mayor detalle la humedad relativa por alturas y en distintas laderas de las islas montañosas. Estos puntos de reanálisis se posicionan en áreas remotas con escasez de estaciones de medición. Al igual que con los puntos del ERA5-Land para las temperaturas, estos puntos se recolocan a su altura correcta y lo más abierto a los vientos alisios posible, evitando los fondos de barranco. En la tabla 1.3 siguiente se muestra el número de estaciones por islas y las instituciones que las han cedido para la generación de los mapas climáticos mensuales y anuales de humedad relativa del aire promediados entre 1991 y 2020. Empero, en algunas islas menores se ha tenido que disminuir el periodo hasta el 2018, dado que es el año en que terminan los datos de reanálisis del UERRA.

Tabla 1.3. Disponibilidad de series de humedad relativa y resultado tras el proceso de filtrado.

	AEMET		CABILDO INSULAR		ICIA		UERRA	TOTAL
	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años	Nº de series	Nº de series ≥ 7 años		
La Palma	23	8	17	6	6	5	16	43
La Gomera	11	5	0	0	2	2	7	13
El Hierro	13	5	0	0	1	1	3	11
Tenerife	74	13	56	50	9	8	3	71
Gran Canaria	25	6	0	0	6	1	20	44
Fuerteventura	11	2	0	0	2	1	16	26
Lanzarote	8	2	0	0	8	7	13	20
TOTAL	165	59	73	56	34	25	78	228

Dado el carácter oceánico que envuelve las islas canarias la humedad relativa del aire es alta, superando el 70% de media anual. Este valor enmascara diferencias entre las zonas más próximas a la costa, las medianías, especialmente las de barlovento afectadas por el contacto con el mar de nubes, y las zonas de cumbre. En las primeras el promedio anual de la humedad relativa del aire oscila entre el 60% y el 77%, mientras que en las medianías hay grandes diferencias entre las orientadas al norte y nordeste, con promedios en torno al 77%, frente a las del sur y suroeste con valores del 65%. Una vez que nos introducimos en las zonas de cumbre la humedad disminuye hasta alcanzar valores inferiores al 30% por encima de los 2.500 m de altitud. En la siguiente figura se muestra el comportamiento mensual medio de la humedad relativa en tres zonas típicas del archipiélago. Se trata de las medianías a unos 500 metros de altitud orientadas al norte, así como las medianías orientadas al sur y zonas de cumbre por encima de la cota de los 2.000 metros obtenidos de las series utilizadas.

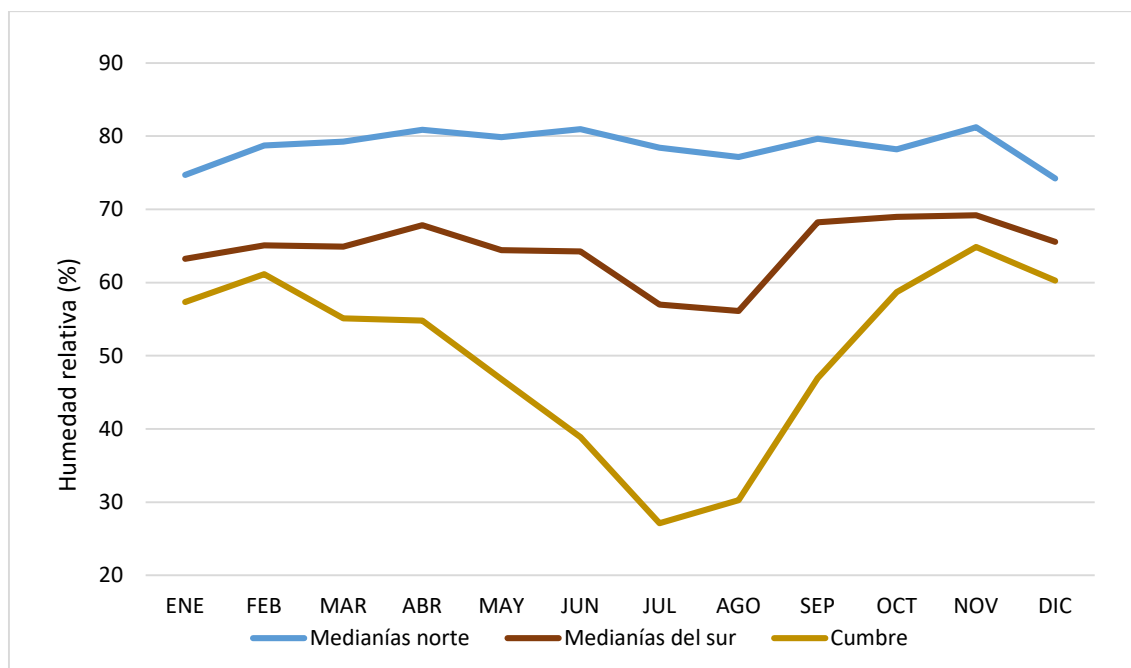


Figura 1.3. Humedad relativa mensual promedio en tres ámbitos diferentes del archipiélago.

En la fase de filtrado, además de eliminar las series cortas, se han detectado y eliminado datos anómalos con humedades relativas inferiores al 20%. En la fase de homogeneización se ha utilizado el *paquete de R* Climatol y el umbral de SNHT medio utilizado ha sido en torno a 35, detectando y corrigiendo saltos inhomogéneos a un 30% de las series en las islas.

En la fase de interpolación, al igual que en la precipitación, en las islas de mayor altura se realizó una separación por zonas tal y como se muestra en la figura 4.3.2. en la sección de resultados. Esta separación es idéntica a la realizada en el caso de la precipitación para las islas de Tenerife y La Palma. Se incluye en este caso a la isla de Gran Canaria en el proceso de segmentación. El objetivo es separar las zonas de cumbre, con ambiente significativamente más seco, por encima del mar de nubes, cuyo límite en Canarias se sitúa a unos 1.200 metros de altitud (Dorta, 1996). Por debajo de esta cota se separa en estas tres islas la ladera norte más nubosa y húmeda de la sur. Las islas montañosas pequeñas como La Gomera y el Hierro no tienen estaciones suficientes como para realizar esta segmentación.

1.4 Velocidad del viento

El desarrollo de los mapas de viento se ha centrado principalmente en la intensidad, no en la dirección, debido a que, en Canarias, en promedio predomina los flujos del alisio del norte al noreste durante todo el año. Son importantes los vientos en aguas costeras y en los canales entre islas, áreas con muy pocas observaciones en general. Es por ello que los datos de reanálisis han sido útiles para mostrar esta variable. Los primeros análisis se realizaron con campos de reanálisis de superficie del ERA5-Land de 10 km de resolución y UERRA (MESCAN-SURFEX) de 5 km de los últimos 20 años (2001 al 2020). Éstos han demostrado que los datos de mayor resolución espacial como el UERRA son capaces de representar con un mayor detalle las intensidades de viento en zonas marítimas, sobre todo en los canales entre islas, afectados por vientos de mayor intensidad. Se muestra en la siguiente figura 1.4 el promedio anual (a), el promedio en julio (b) y el promedio de enero (c) de los últimos 20 años a 400 m de resolución espacial.

Posteriormente se han obtenido los mapas de intensidad de viento a 100 m de resolución espacial de las superficies terrestres de cada isla, a partir de los datos de las estaciones de observación y añadiendo datos UERRA de superficie (MESCAN-SURFEX) en puntos costeros y áreas con pocas observaciones en laderas, recolocándolas a su altura correcta, evitando fondos de barrancos y en áreas abiertas al flujo de los vientos alisios. También se han añadido puntos UERRA (HARMONIE) en zonas altas con pocas observaciones, sin embargo, éstos no son datos de superficie sino a partir de capas por niveles de presión. El nivel presión se transforma un valor de altura estándar en metros sobre el nivel medio del mar utilizando una tabla de equivalencia mostrada como tabla 1.4.1. A partir de esta altura estándar se asigna un punto de grid de la capa más cercano al punto geográfico de la cumbre de la isla correspondiente. Estos datos de reanálisis también han sido obtenidos de la web de Copernicus y están representados en la siguiente tabla 1.4.2. de estaciones y puntos de viento identificados como UERRA-HARMONIE. Destaca en esta tabla la gran cantidad de puntos de superficie UERRA-SURFEX debido a que son puntos sobre las aguas costeras, sin obstáculos, que rodean completamente cada isla.

Estas series ya filtradas tomando un límite de 5 años, son sometidas al proceso de homogeneización corrigiendo en torno al 17% de estaciones terrestres que son las más expuestas a saltos no ocasionados por el clima.

Finalmente se aplica en cada isla el proceso de interpolación por regresión lineal múltiple separando las islas de mayor altura por zonas este y oeste y por alturas por debajo y encima del mar de nubes, obteniendo los mapas mostrados en la sección de resultados del viento por isla a unos 100 m de resolución espacial.

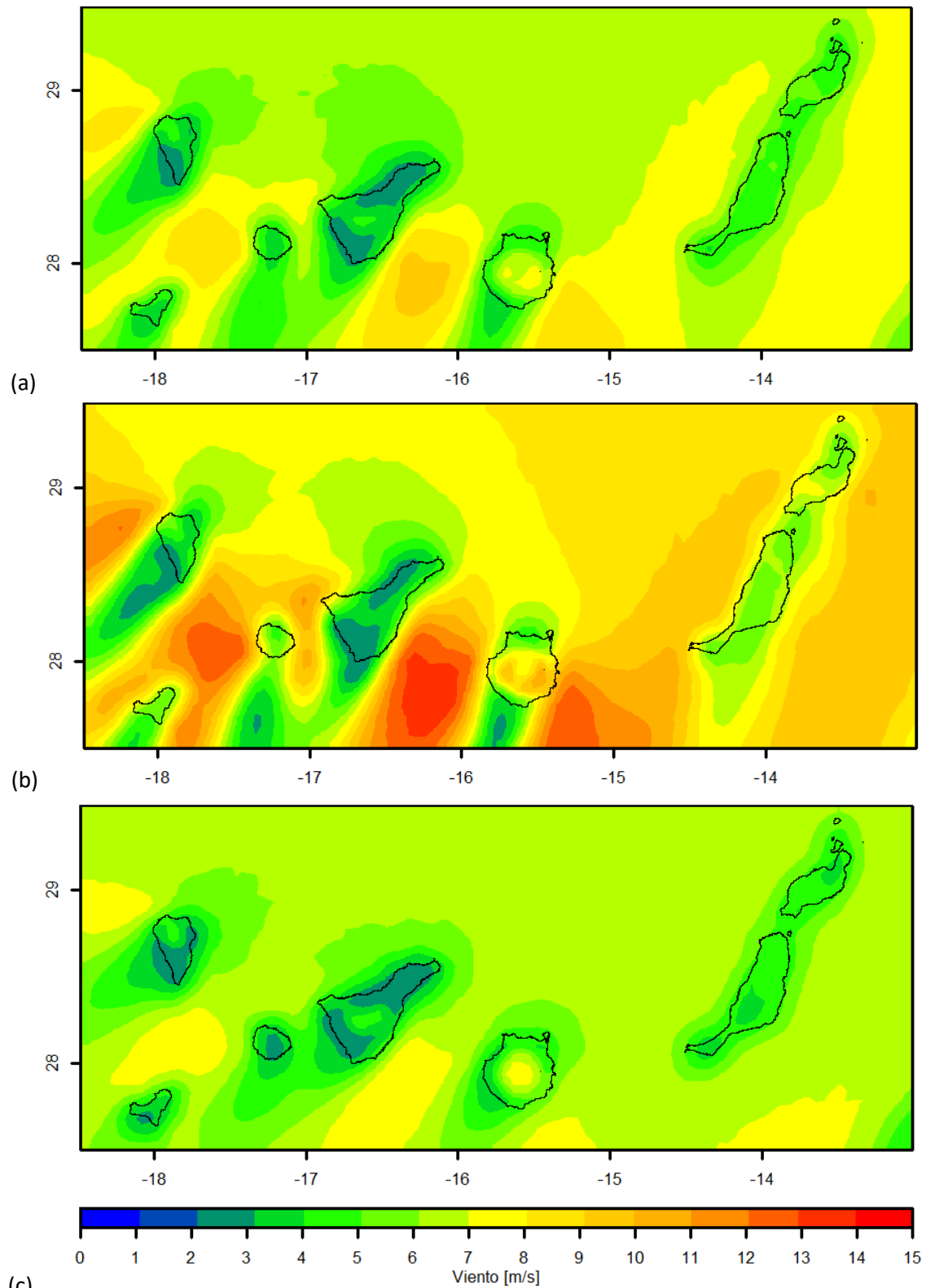


Figura 1.4. Viento del UERRA para archipiélago canario promediados desde el 2001 al 2020 a 400 m de resolución. (a) Promedio anual, (b) promedio de julio y (c) promedio de enero.

Tabla 1.4.1. Tabla de equivalencia de niveles de presión en altitudes estándar.

Nivel de presión en hPa	altitud estándar en metros
700	3000
750	2400
800	2000
825	1700
850	1500
875	1300
900	900
925	750
950	600

Tabla 1.4.2. Disponibilidad de series de viento y resultado tras el proceso de filtrado.

	AEMET		CABILDO INSULAR		ICIA		UERRA-HARMO	UERRA-SURFEX	TOTAL
	Nº de series	Nº de series ≥ 5 años	Nº de series	Nº de series ≥ 5 años	Nº de series	Nº de series ≥ 5 años			
La Palma	8	7	0	0	6	5	19	136	167
La Gomera	8	7	0	0	2	2	13	87	109
El Hierro	7	6	0	0	1	1	7	72	86
Tenerife	23	15	56	51	9	8	13	200	287
Gran Canaria	31	26	0	0	6	5	15	183	229
Fuerteventura	8	7	0	0	2	2	4	271	284
Lanzarote	9	6	0	0	7	3	0	198	207
TOTAL	94	74	56	53	33	27	71	1144	1369

1.5 Nubosidad

La identificación de áreas nubosas parte de datos de teledetección del sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) de 1 km de resolución. Se ha determinado la frecuencia nubosa mensual y anual promediada entre 2000 y 2014, siguiendo la metodología y datos proporcionados Wilson y Jetz (2016). El procedimiento consiste en calcular la frecuencia nubosa mensual en cada punto a partir de las cuatro imágenes diarias del sensor Modis obtenidas por los dos satélites de órbita polar de la NASA (Terra y Aqua). Sin embargo, según se describe, se utilizó las dos imágenes diurnas y productos de nubosidad relacionados para evitar una disminución de precisión por utilizar solo canales infrarrojos en la determinación de la nubosidad con las dos imágenes nocturnas diarias. En concreto se utilizó el *flag* de nubosidad MOD09GA, derivado del satélite Terra que pasa cada día aproximadamente sobre las 10:30 hora local, y el MYD09GA del satélite Aqua que pasa sobre las 13:30 hora local. Estos productos tal y como describe Liu y Liu (2013) para las últimas versiones, utilizan varios algoritmos de clasificación nubosa, separan convenientemente áreas nubosas de superficies terrestres, mejorando especialmente la discriminación de aquellas de gran albedo, como son las siguientes: aguas con reflexiones especulares, regiones nevadas, arenosas o urbanas. Estos ficheros

(MOD09GA y MYD09GA) proporcionan en cada punto y en cada día, un valor positivo (nuboso) o negativo (no nuboso) en el periodo entre febrero de 2000 y marzo de 2014 y permiten calcular la proporción mensual y anual de nubosidad en cada kilómetro del globo y almacenarlos en ficheros geotiff que quedan finalmente disponibles de forma gratuita a través de internet (<http://www.earthenv.org//cloud>). Para el atlas interactivo se adquirieron estos ficheros mensuales y anuales y se obtuvo una climatología de la nubosidad del archipiélago canario. Se muestra la frecuencia nubosa anual promediada entre el 2000 y el 2014 re proyectada a unos 400 m (figura 4.4).

2. Generación de mapas de Köppen

Concebida inicialmente por el físico alemán Wladimir Köppen en 1918, y revisada posteriormente por él mismo y por Rudolf Geiger en 1936, la clasificación de Köppen define distintos tipos de clima a partir de los valores medios mensuales de la precipitación y de la temperatura del aire. Para la delimitación de los distintos tipos de clima establece umbrales de temperatura y precipitación, basados principalmente en su influencia sobre la distribución de la vegetación y la actividad humana y dividiendo los climas del mundo en cinco grupos principales: tropical, seco, templado, continental y polar, identificados por la primera letra. Cada grupo se divide, a su vez, en subgrupos describiendo un tipo de clima, que indica el comportamiento de las temperaturas y las precipitaciones. Los tipos de clima se identifican con un símbolo de 2 o 3 letras.

En Canarias se pueden considerar dos grandes grupos de climas principales, de acuerdo con trabajos previos (López Gómez, 1979; Aemet, 2012): los secos (Climas B), donde las precipitaciones anuales son inferiores a la evapotranspiración potencial anual, y los climas templados (Climas C) cuya principal característica es la humedad y las temperaturas que oscilan entre rangos diversos (la media del mes más frío entre 3°C –o 0°C- y 18°C), y la temperatura media del mes más cálido superior a 10°C.

Para la generación de estos mapas de clasificación de Köppen ha sido necesario obtener previamente los mapas mensuales y anuales de temperatura y precipitación de los últimos 30 años tal y como se ha descrito en los apartados previos de mapas esenciales. A continuación, se ha realizado un ejercicio de álgebra de mapas utilizando los umbrales de temperatura y precipitación descritos por Köppen y Geiger, obteniendo, finalmente, los mapas de clasificación de Köppen actualizados mostrados en el apartado de resultados en la figura 5.1.

3. Generación mapas de tendencias

El análisis de las tendencias de temperatura media y precipitación son de gran importancia para evaluar el cambio climático en las islas, pues permiten diagnosticar las alteraciones producidas en las variables estudiadas por causas antrópicas durante los últimos 30, 40 o 50 años.

Dada una serie temporal, por ejemplo, de temperatura, la tendencia es la velocidad a la que cambia esta variable durante un período de tiempo. La tendencia puede ser lineal o no lineal. La regresión lineal simple se usa más comúnmente para estimar la tendencia lineal (pendiente) y

la significancia estadística (mediante una prueba t de Student). La hipótesis nula no es una tendencia (es decir, un clima invariable). La prueba no paramétrica de Mann-Kendall (M-K), también se puede utilizar para evaluar la significación de la tendencia. En este estudio se ha utilizado la función “kendallTrendTest” del paquete “EnvStats” en R. Esta función aplicada a todos los puntos de los mapas de temperatura y precipitación anual, obtiene la serie temporal de 30 y 50 años respectivamente, realiza la corrección de continuidad y obtiene los valores p (probabilidad mínima definida por la distribución con la que podemos rechazar la hipótesis nula) del estadístico S de Man-Kendall, además de la tendencia anual. Esto permite seleccionar las tendencias estimadas por el método de Theil (1950) y Sen (1968) con valores p por debajo del 10%. Estas son lineales y con significancia estadística del 95% en la tendencia tanto para las series de temperatura como de precipitación. Los mapas de tendencias generadas a partir de los mapas esenciales y mostrados en el apartado 6 de resultados, se superpone una máscara semitransparente sobre aquellos puntos con valores p del estadístico S de Man-Kendall por encima del 10% y por ello, de significancia estadística baja.

El periodo temporal total de las tendencias mensuales y anuales de temperatura media se ha establecido desde 1991 hasta el 2020, unos 30 años, con una frecuencia anual en todas las islas, tal y como se muestra en la tabla 6.1 en el apartado de resultados. La tendencia mensual y anual de la precipitación se inicia, sin embargo, desde 1970 hasta el 2020, unos 50 años, salvo las islas occidentales cuyo inicio se ha retrasado por escasez de datos en ciertas vertientes en los años setenta y principios de los ochenta. Por ello, se inicia la tendencia de precipitación en 1980 en isla de La Gomera, 1985 en El Hierro y 1986 en La Palma y Tenerife. Tampoco se ha considerado por la misma razón algún mapa de temperatura en la isla de Lanzarote, iniciándose el cálculo de tendencia en 1993.

Resultados

A continuación, se muestran mapas y resultados específicos extraídos de cada variable con el objetivo de que el usuario del atlas pueda interpretarlos en la aplicación web. En este informe se describe los resultados generales obtenidos de los mapas anuales promediados, sin embargo, en la aplicación web (SITCAN) el usuario puede obtener, además, los mapas mensuales promediados para todo el periodo analizado (últimos 30 años para la temperatura y humedad relativa, últimos 40 a 50 años para la precipitación, últimos 20 años para el viento, 14 años para la nubosidad, últimos 30 años para los mapas de Köppen, últimos 30 años mapas de tendencias de temperatura y últimos 40 a 50 años mapas de tendencias de precipitación). La distribución de este apartado es idéntica que para el de metodología con los resultados de los mapas esenciales en primer lugar, los mapas de Köppen a continuación y terminando con los mapas de tendencias al final.

4. Mapas de las diferentes variables climáticas

4.1 Temperatura

En la tabla 4.1. se presentan los resultados estadísticos tras la generación de los mapas de temperatura mínima, media y máxima en todas las islas, comparando el promedio anual de los puntos de los mapas modelizados con el promedio anual observado para todo el periodo entre 1991 y 2020. En general, se observan correlaciones al cuadrado en torno a 0,80 y errores entre 0,60 a 1,0°C salvo en Lanzarote y Fuerteventura con correlaciones más bajas entre 0,30 y 0,60. En la siguiente figura se muestra el resultado del archipiélago completo de la temperatura media promediada para todo el periodo de todas las islas a baja resolución espacial (400 m); en las siguientes dos figuras 4.1.2 y 4.1.3 los mapas de temperatura mínima, media y máxima de la isla de Tenerife y Gran Canaria a alta resolución (100 m) respectivamente. Los datos numéricos mostrados en estas dos últimas figuras se corresponden con las temperaturas mínimas, medias y máximas promediadas de las estaciones meteorológicas utilizadas, unas 115 en Tenerife y unas 44 en Gran Canaria tal y como se indica en la tabla 1.1.

Tabla 4.1. Resultados estadísticos de temperaturas anuales promediadas en el periodo de 1991 al 2020 obtenidas en los mapas comparados con las observaciones.

Islas	Nº de estaciones definitivas	R2 (Correlación al cuadrado)			RMSE (Raíz cuadrada del error cuadrático medio)			MAE(Error absoluto medio)		
		Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max
La Palma	45	0,83	0,90	0,88	1,11	0,84	0,89	0,85	0,60	0,68
La Gomera	25	0,86	0,89	0,85	1,13	0,89	0,99	0,98	0,72	0,83
El Hierro	20	0,90	0,90	0,84	0,95	0,88	1,08	0,78	0,68	0,87
Tenerife	115	0,81	0,86	0,83	1,30	0,94	1,03	0,95	0,74	0,82
Gran Canaria	44	0,78	0,86	0,70	1,21	0,82	1,13	1,01	0,67	0,96
Fuerteventura	13	0,37	0,27	0,26	1,20	0,82	1,10	0,56	0,68	0,80
Lanzarote	21	0,54	0,60	0,62	0,69	0,61	0,58	0,58	0,47	0,46

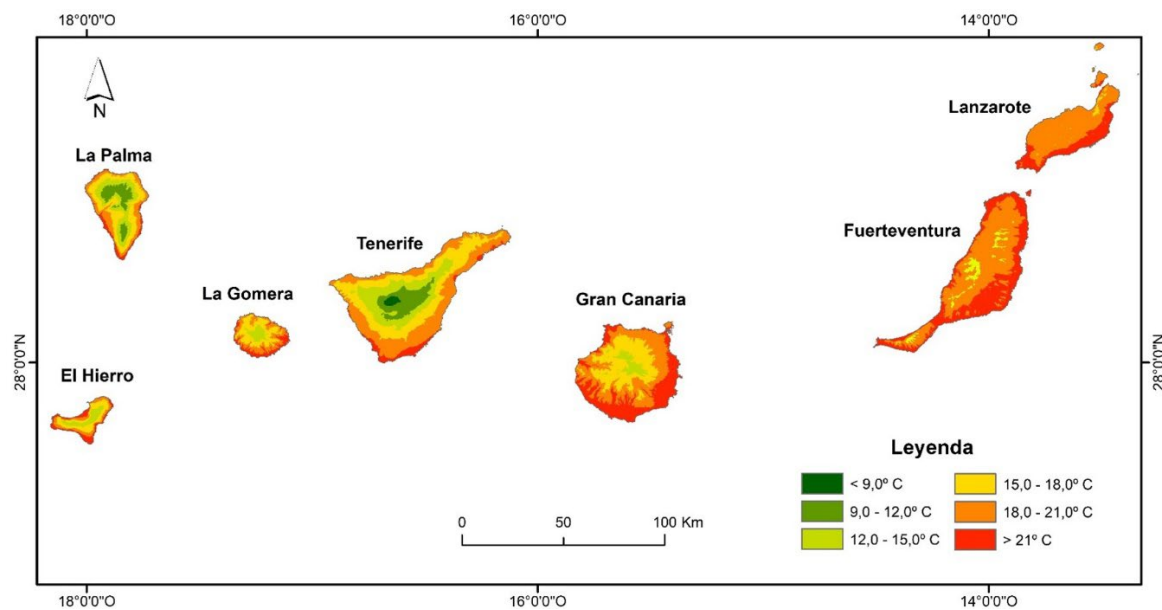


Figura 4.1.1 Temperatura media de Canarias promediada del periodo de 1991 a 2020. Mapas a 400 m de resolución espacial.

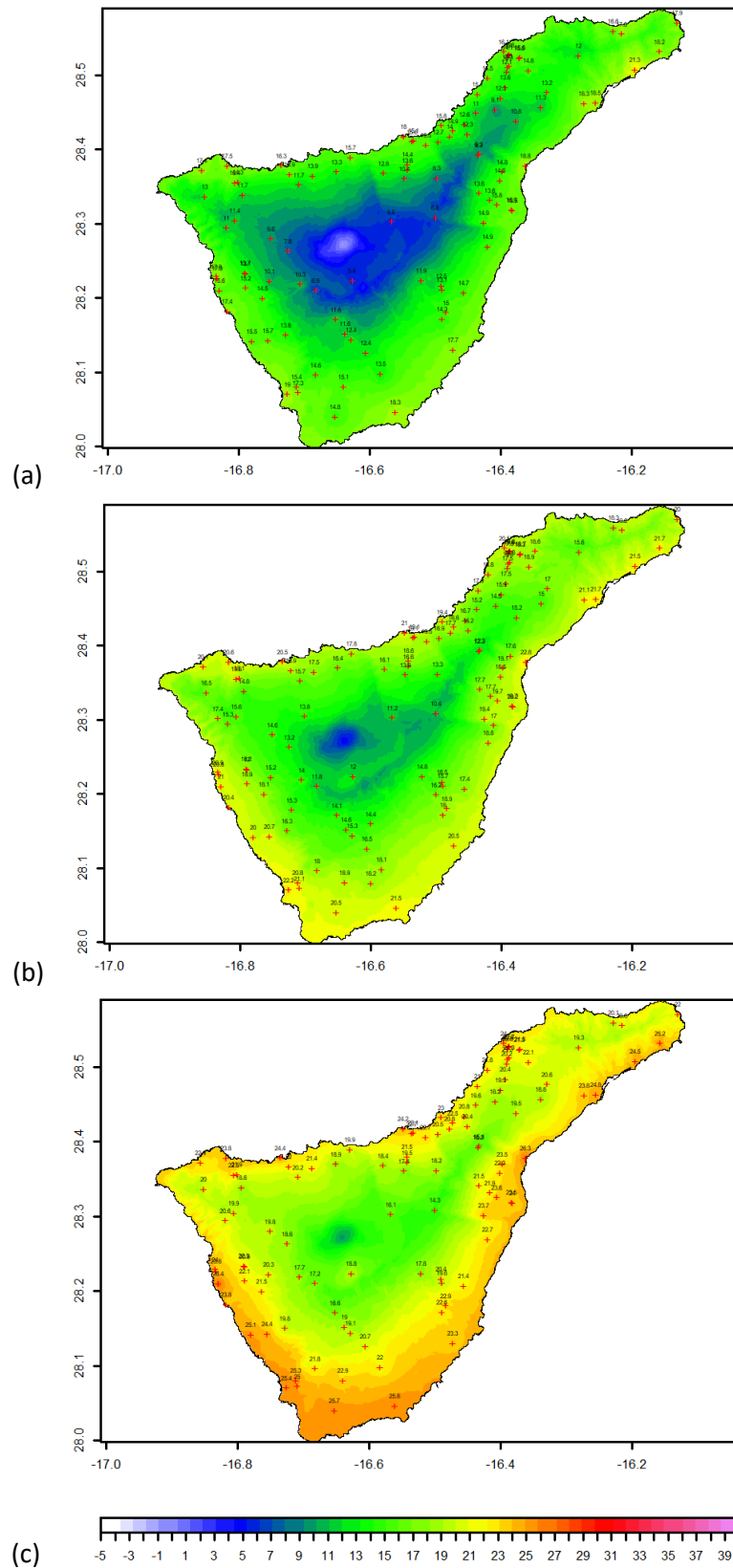


Figura 4.1.2. Mapas de temperatura de la isla de Tenerife a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1991-2020. (a) Temperatura mínima, (b) Temperatura media y (c) temperatura máxima. Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores son las temperaturas medidas.

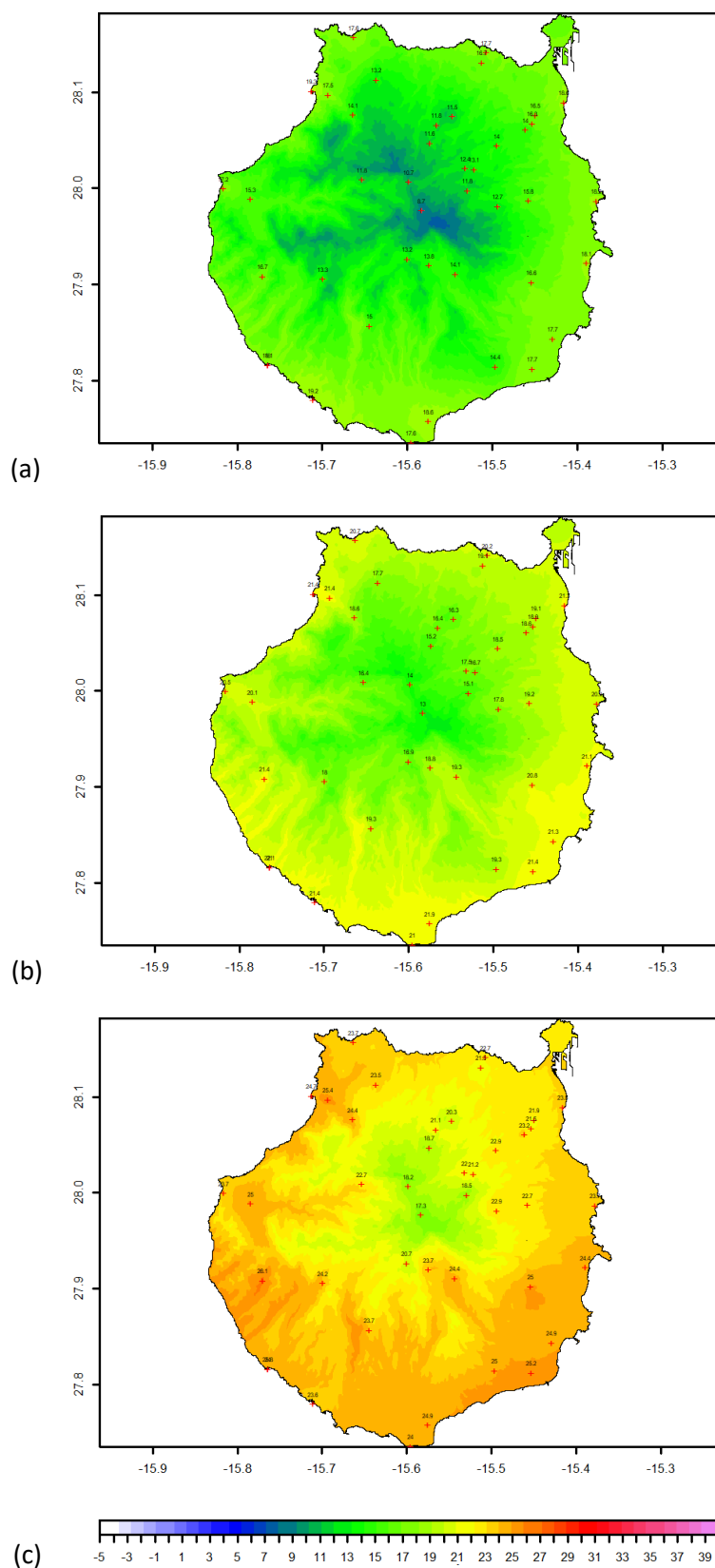


Figura 4.1.3. Mapas de temperatura de la isla de Gran Canaria a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1991-2020. (a) Temperatura mínima, (b) Temperatura media y (c) temperatura máxima. Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores son las temperaturas medidas.

4.2 Precipitación

Se han generado los mapas de precipitación acumulada mensual y anual en mm para cada isla promediados. Uno de los principales rasgos de la precipitación en Canarias es la gran disparidad que se observa en los valores de la precipitación acumulada anual promediada en los últimos 45 años, con extremos que oscilan entre los 1.350 mm en el Nordeste de La Palma y valores inferiores a 100 mm al año en amplios sectores de las vertientes meridionales y suroccidentales de Tenerife y Gran Canaria, así como gran parte de la superficie insular de Fuerteventura y Lanzarote. En la tabla 4.2. se compara el acumulado anual de los puntos de los mapas modelizados con el acumulado anual observado para el periodo analizado en cada isla. Se observa que las islas con mayores errores son El Hierro y La Gomera, presumiblemente, debido al bajo número de estaciones con series largas de más de 15 años. En la figura 4.2.1. se muestra la precipitación acumulada anual de las islas más montañosas con las vertientes septentrionales más lluviosas, como es el caso de La Palma y Tenerife. En la figura 4.2.2. se muestran los resultados para las islas de Gran Canaria y Fuerteventura. La primera con la vertiente sur más seca y la segunda con los registros en general más bajos del archipiélago en los periodos analizados desde 1970 al 2020. En la figura 4.2.1. de La Palma y Tenerife se expone las separaciones de zonas realizadas tanto en la fase de homogeneización como en la fase de interpolación.

Tabla 4.2 Resultados estadísticos de precipitación acumulado anual en mm obtenidos en los mapas comparados con las observaciones de las estaciones.

Islas	Nº de estaciones definitivas	Periodo de análisis	R2 (Correlación al cuadrado)	RMSE (Raiz cuadrada del error cuadrático medio)	MAE(Error absoluto medio)
La Palma	48	1975 - 2020	0,99	20,5	14,34
La Gomera	26	1980 - 2020	0,85	65,6	56,2
El Hierro	26	1975 - 2020	0,50	104,3	82,1
Tenerife	141	1975 - 2020	0,98	22,7	14,8
Gran Canaria	344	1970 - 2020	0,91	51,2	40
Fuerteventura	56	1970 - 2020	0,77	14,8	12,3
Lanzarote	65	1970 - 2020	0,82	11,9	9,1

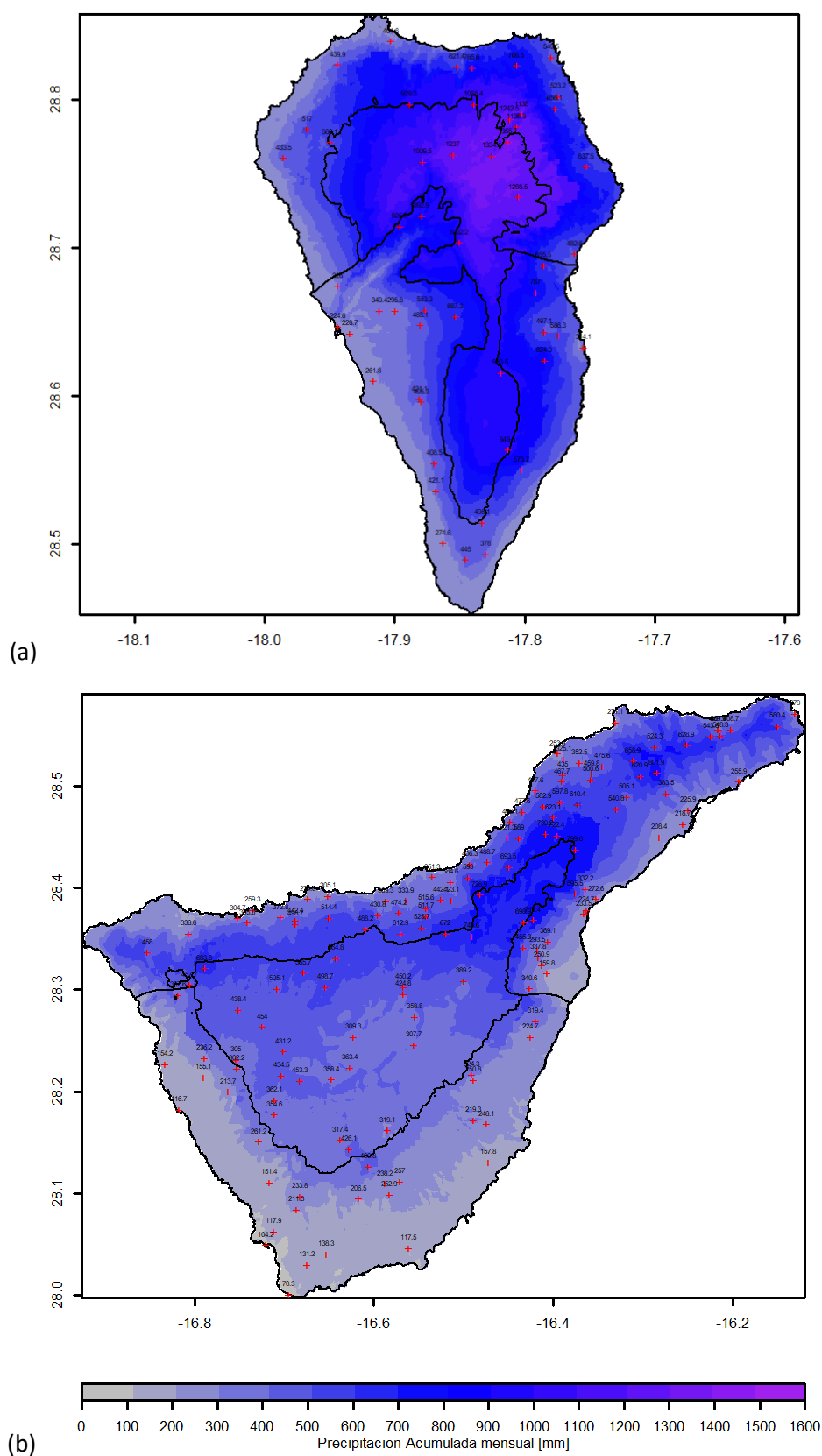


Figura 4.2.1. Precipitación acumulada anual en mm a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1975-2020. (a) Isla de La Palma, (b) Isla de Tenerife. Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores numéricos son las acumulaciones promediadas de cada estación.

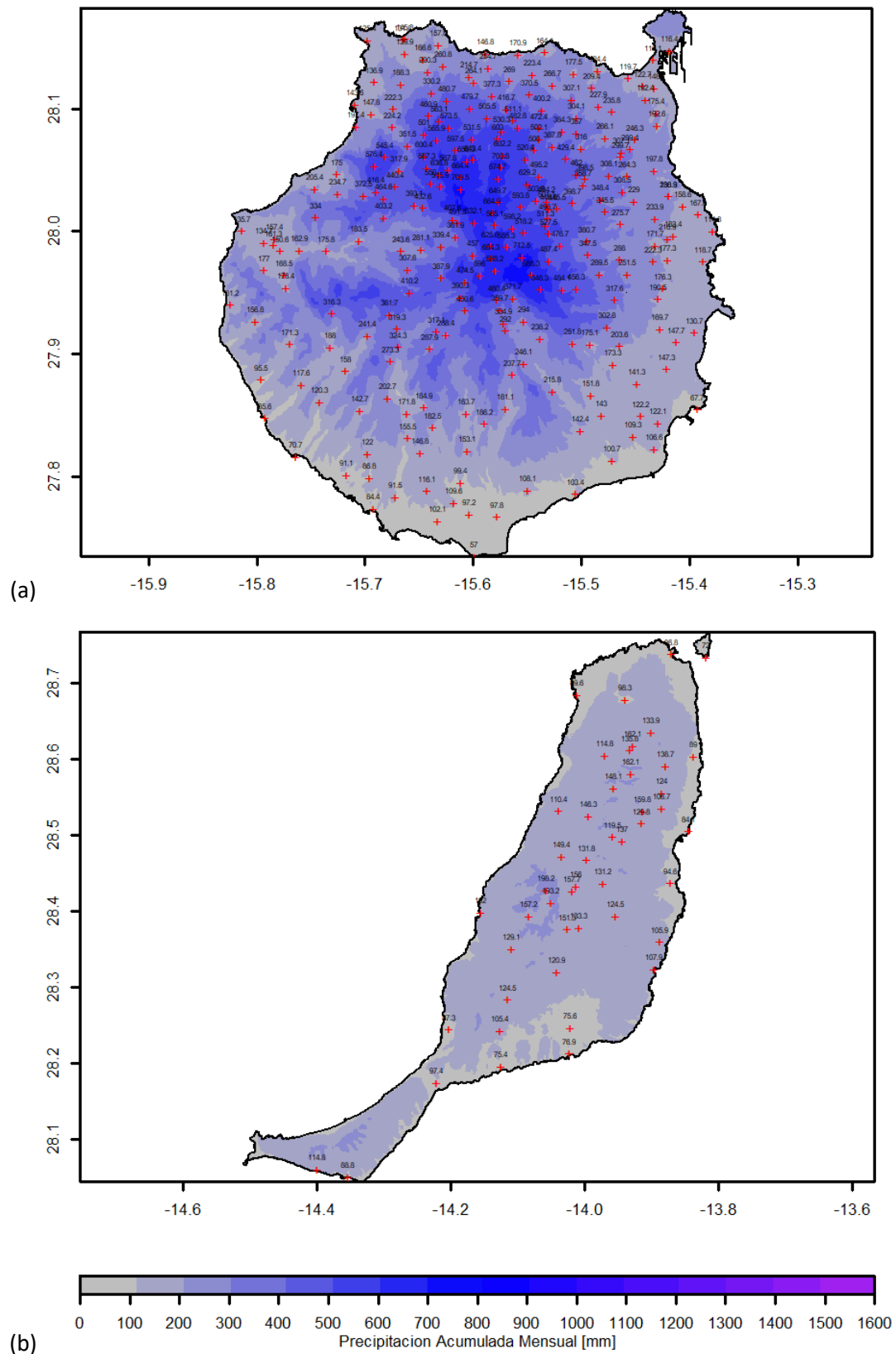


Figura 4.2.2. Precipitación acumulada anual en mm a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1970-2020. (a) Isla de Gran Canaria, (b) Isla de Fuerteventura. Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores numéricos son las acumulaciones promediadas de cada estación.

4.3 Humedad Relativa

En la tabla 4.3 se pueden observar los resultados estadísticos al comparar las humedades relativas anuales promediadas en el periodo de 28-30 años obtenidas en los mapas, con respecto a las observaciones en cada isla. Una vez más se evidencia que las islas pequeñas como La Gomera y El Hierro, con escasez de estaciones de medición, así como las islas bajas como Lanzarote y Fuerteventura son las que obtienen resultados estadísticos con mayor error. En la figura 4.3.1 se enseñan los mapas resultantes de todo el archipiélago a unos 400 m de resolución espacial. En general, se distinguen, las áreas más secas en zonas de cumbre por encima del nivel nuboso y medianías orientadas al sur. En la figura 4.3.2 se presentan las islas de mayor altura divididas en amplias zonas según los valores de humedad relativa media anual. Los valores más altos se corresponden con la zona nubosa entre los 700 y 1.200 metros de altitud, en laderas norte y noreste, mientras que las zonas de menor humedad relativa se sitúan por encima de los 1.200 metros de altitud. En el caso de la isla de Lanzarote (fig. 4.3.3.) hay poca variabilidad en los valores de la humedad relativa, aunque en el extremo norte e islotes de La Graciosa y Alegranza los valores se incrementan al estar muy influenciadas por la humedad procedente de los vientos alisios. Por otro lado, también se observa en Gran Canaria la sequedad en las laderas de medianías orientadas al sur.

Tabla 4.3 Resultados estadísticos de humedad relativa promediada anual de los mapas comparados con las observaciones de las estaciones.

Islas	Nº de estaciones definitivas	Periodo de análisis	R2 (Correlación al cuadrado)	RMSE (Raíz cuadrada del error cuadrático medio)	MAE(Error absoluto medio)
La Palma	43	1991 - 2018	0,98	1,20	0,84
La Gomera	13	1991 - 2018	0,68	3,08	2,16
El Hierro	11	1991 - 2018	0,52	4,66	4,01
Tenerife	71	1991 - 2020	0,98	1,07	0,71
Gran Canaria	44	1991 - 2020	0,96	1,68	1,17
Fuerteventura	26	1991 - 2018	0,65	2,83	2,33
Lanzarote	20	1991 - 2018	0,55	2,43	1,99

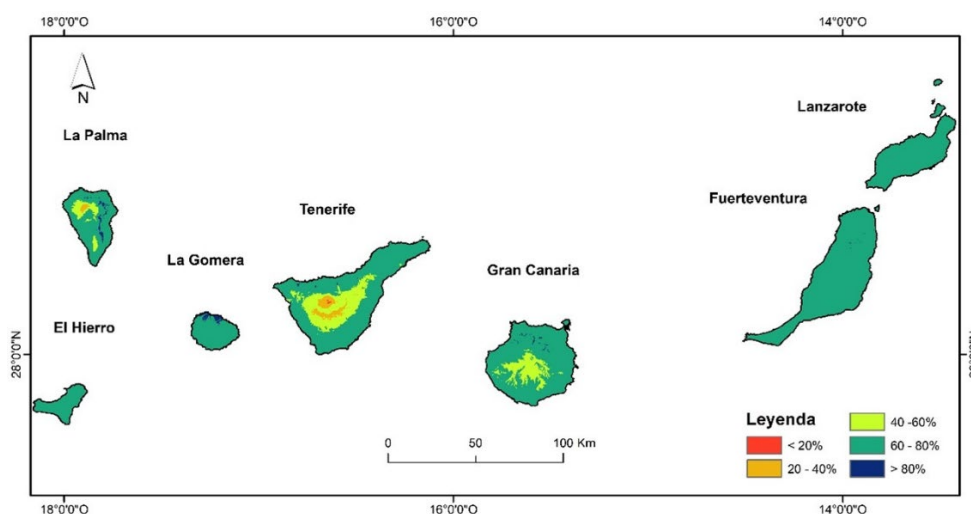


Figura 4.3.1. Humedad relativa promediada en el periodo 1991-2020 en Tenerife y Gran Canaria y 1991-2018 en el resto de islas a unos 400 m de resolución espacial.

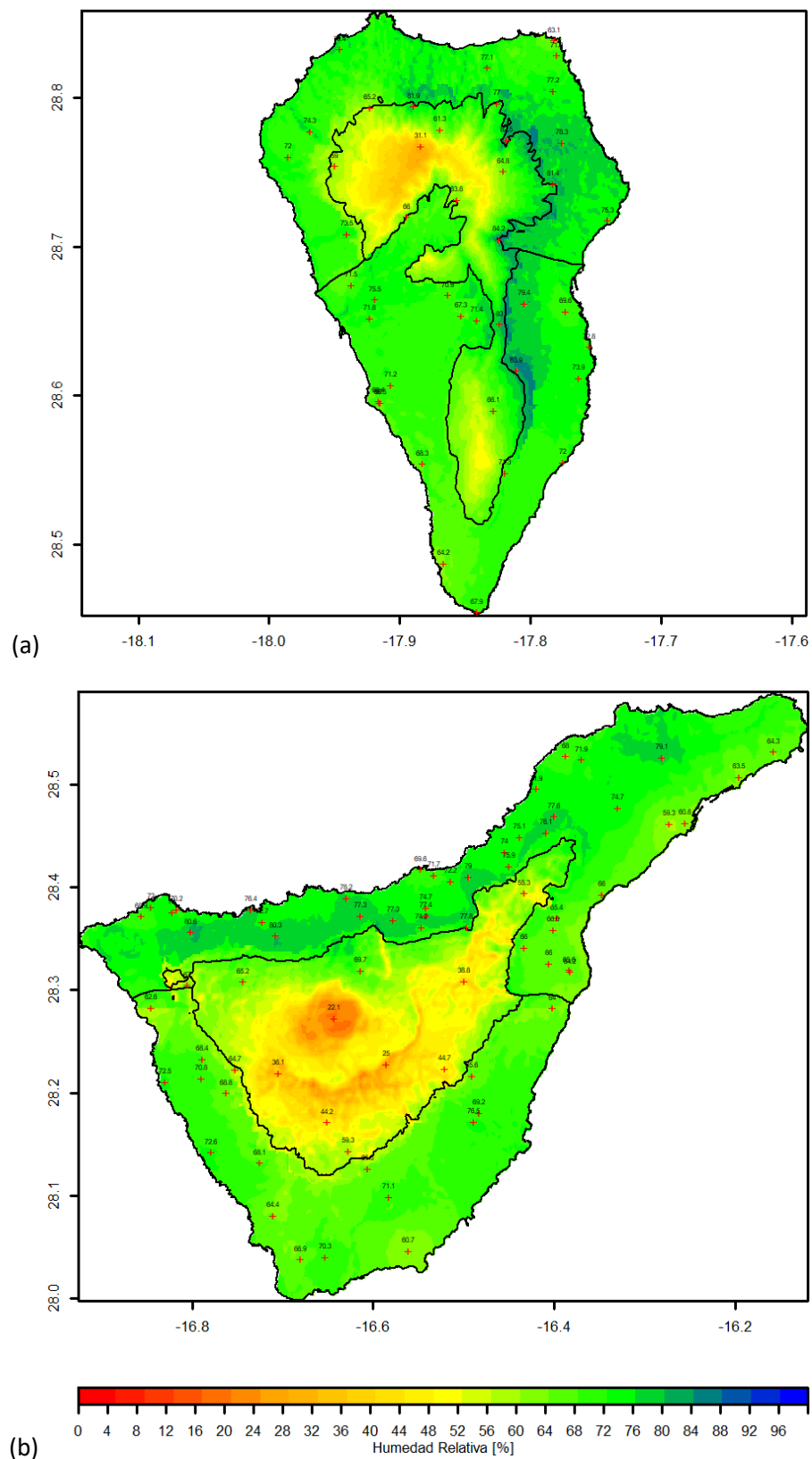


Figura 4.3.2. Humedad relativa a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1991-2018 para la isla de La Palma (a) y entre 1991-2020 para la Isla de Tenerife (b). Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores numéricos son los valores promediados de las humedades de cada estación.

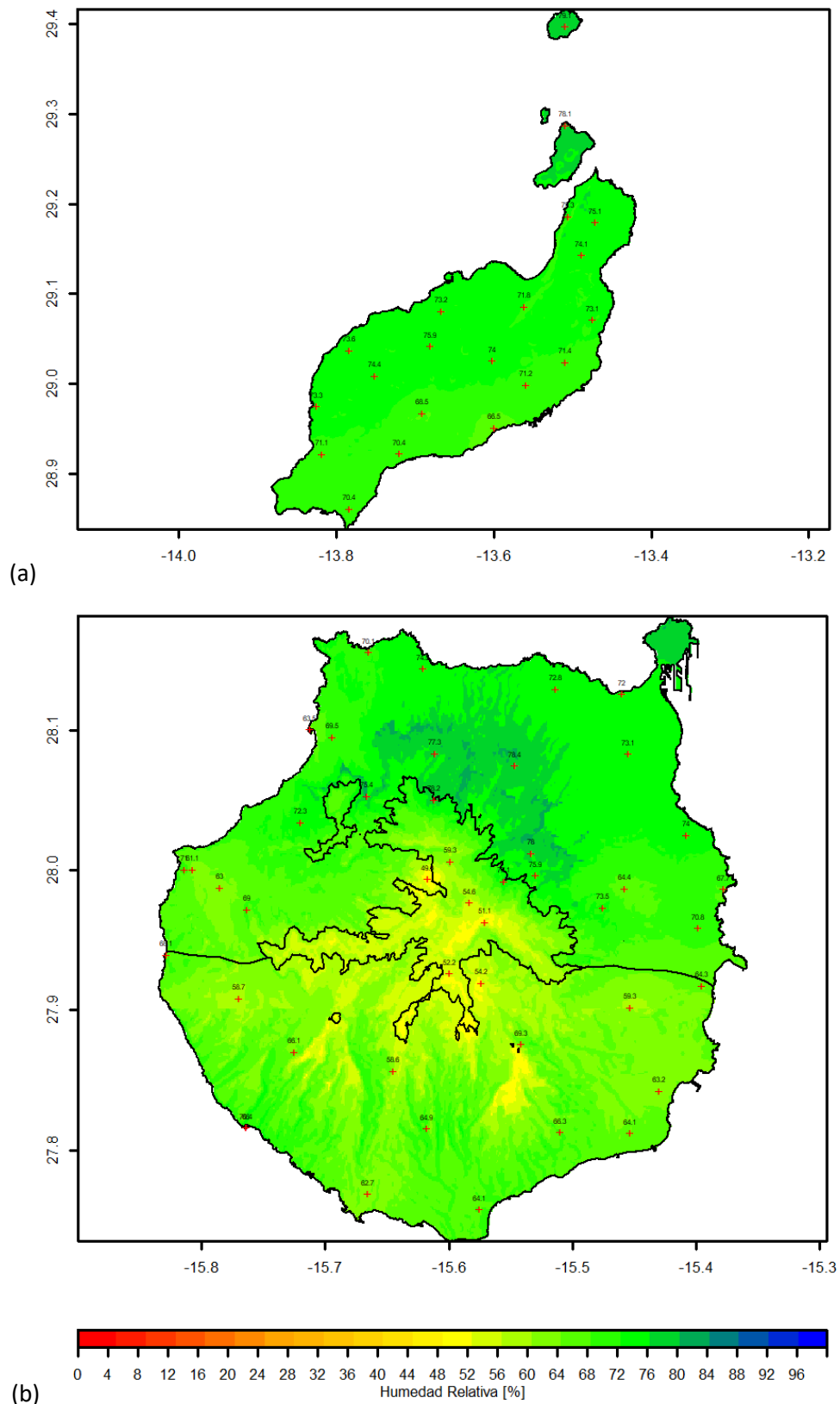


Figura 4.3.3. Humedad relativa a 100 m de resolución espacial promediados para el periodo 1991-2018 para la isla de Lanzarote (a) y entre 1991-2020 para la Isla de Gran Canaria (b). Las cruces indican las posiciones de las estaciones meteorológicas utilizadas y los valores numéricos son los valores promediados de las humedades de cada estación.

4.4 Intensidad de viento

La intensidad de viento para los promedios de los mapas entre 2001 y 2020 comparados con las observaciones se sitúa en general el R2 en torno a 0,79, el RMSE en 0,48 m/s y el MAE en 0,41 m/s. En la figura 4.4.1 se pueden observar los mapas de intensidad del viento correspondientes a Tenerife y El Hierro y en la figura 4.4.2 los mapas de intensidad del viento resultantes para Gran Canaria y Lanzarote. Destaca el bloqueo al flujo del alisio que realiza el relieve tanto al norte como al suroeste de estas y el incremento de intensidad en las aguas y costas surorientales y noroccidentales debido a la influencia del alisio. Este bloqueo al flujo no es tan significativo en islas bajas como Lanzarote y Fuerteventura. En zonas altas de cumbre, por encima del mar de nubes, no destaca en promedio la intensidad del flujo frecuente del nororeste con respecto a áreas más bajas.

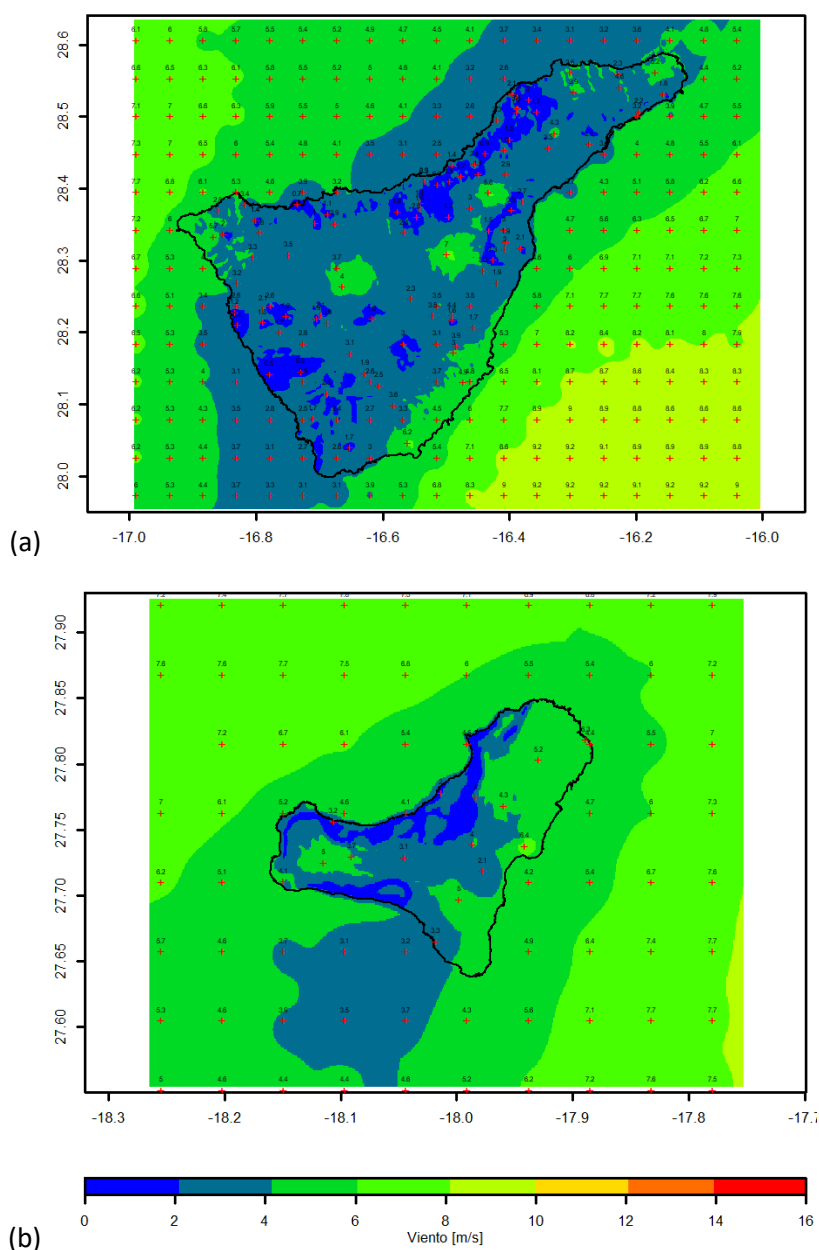


Figura 4.4.1. Mapas de intensidad de viento en m/s promediados entre 2001 y 2020 correspondiente a las islas de Tenerife y el Hierro.

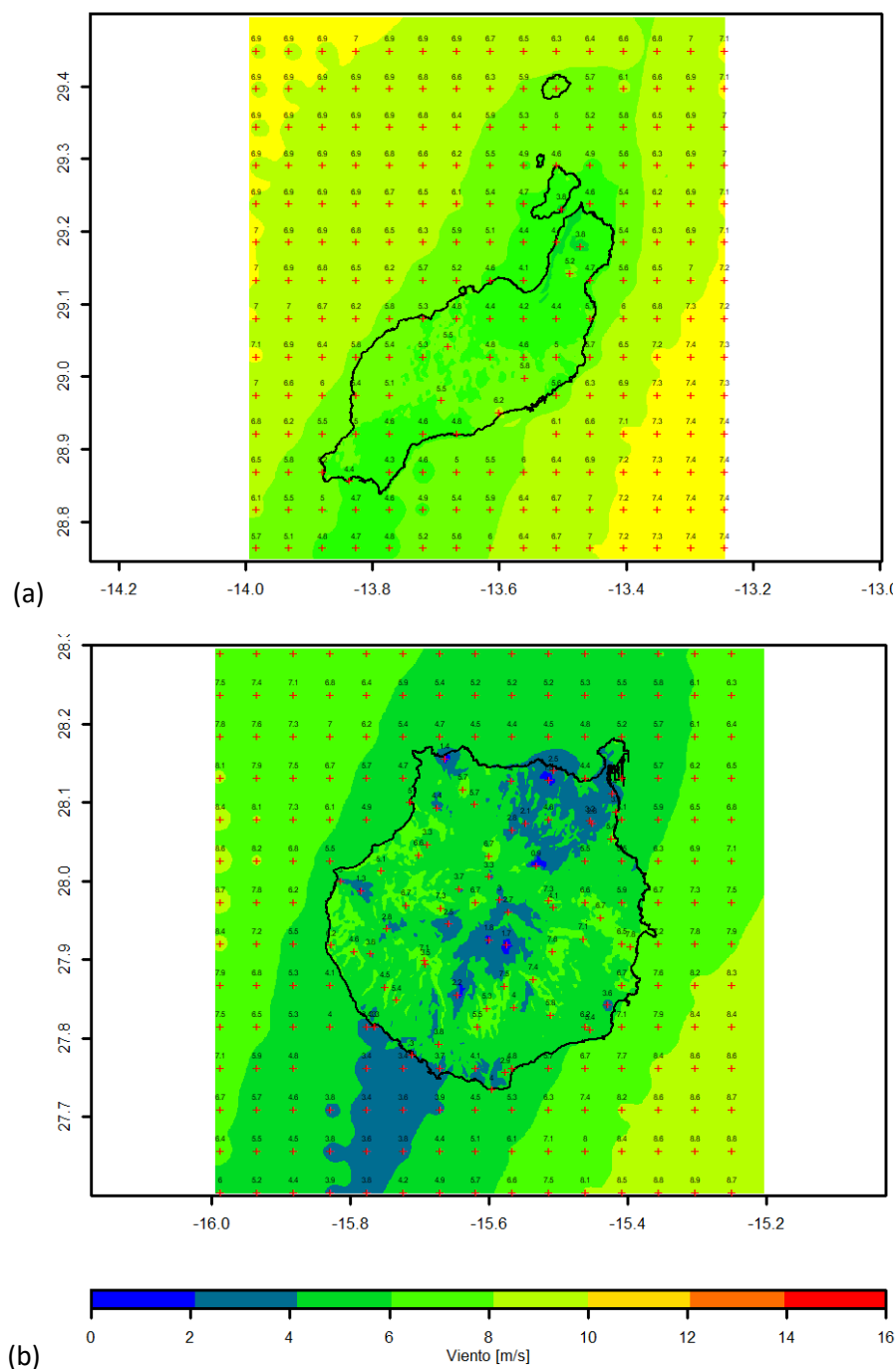


Figura 4.4.2. Mapas de intensidad de viento en m/s promediados entre 2001 y 2020 correspondiente a las islas de Lanzarote y Gran Canaria

4.5 Nubosidad

En la figura 4.5.1 se muestra como resultado la frecuencia nubosa anual promediada entre 2000 y 2014. Aunque originalmente los datos son a 1 km de resolución se ha reprojectado a 400 m realizando un suavizado y coloreado cada 5%. En esta figura destacan áreas azuladas al suroeste y cumbres de las islas más montañosas con menor frecuencia anual de nubosidad, en torno a un 30% y en el otro extremo en tonos grisáceos resaltan áreas más nubosas al norte y noreste de estas islas montañosas con frecuencias por encima del 60%. Tal y como se puede observar en la figura 4.5.2, la frecuencia nubosa en el mes de julio (a) obedece a la nubosidad asociada a los vientos alisios, afectando principalmente a costas y medianías orientadas al norte y noreste y (b) la nubosidad en enero de mayor altura y provocada por distintas situaciones meteorológicas, incluido el régimen de alisios.

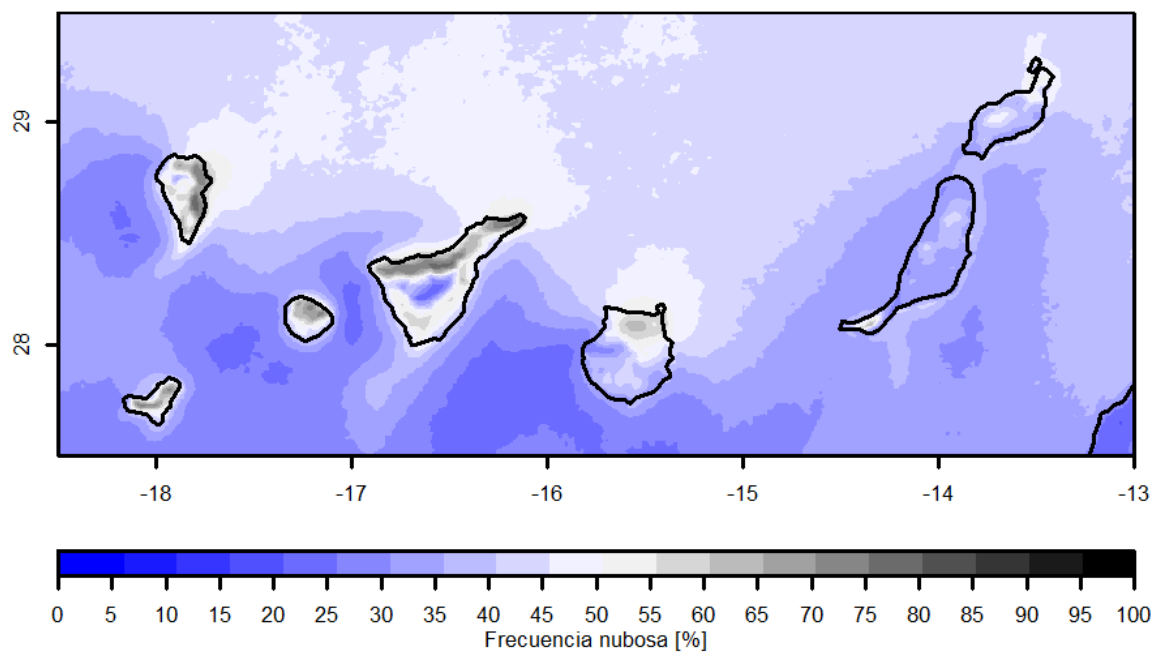


Figura 4.5.1. Frecuencia nubosa anual a 400 m de resolución espacial promediada entre 2000 y 2014.

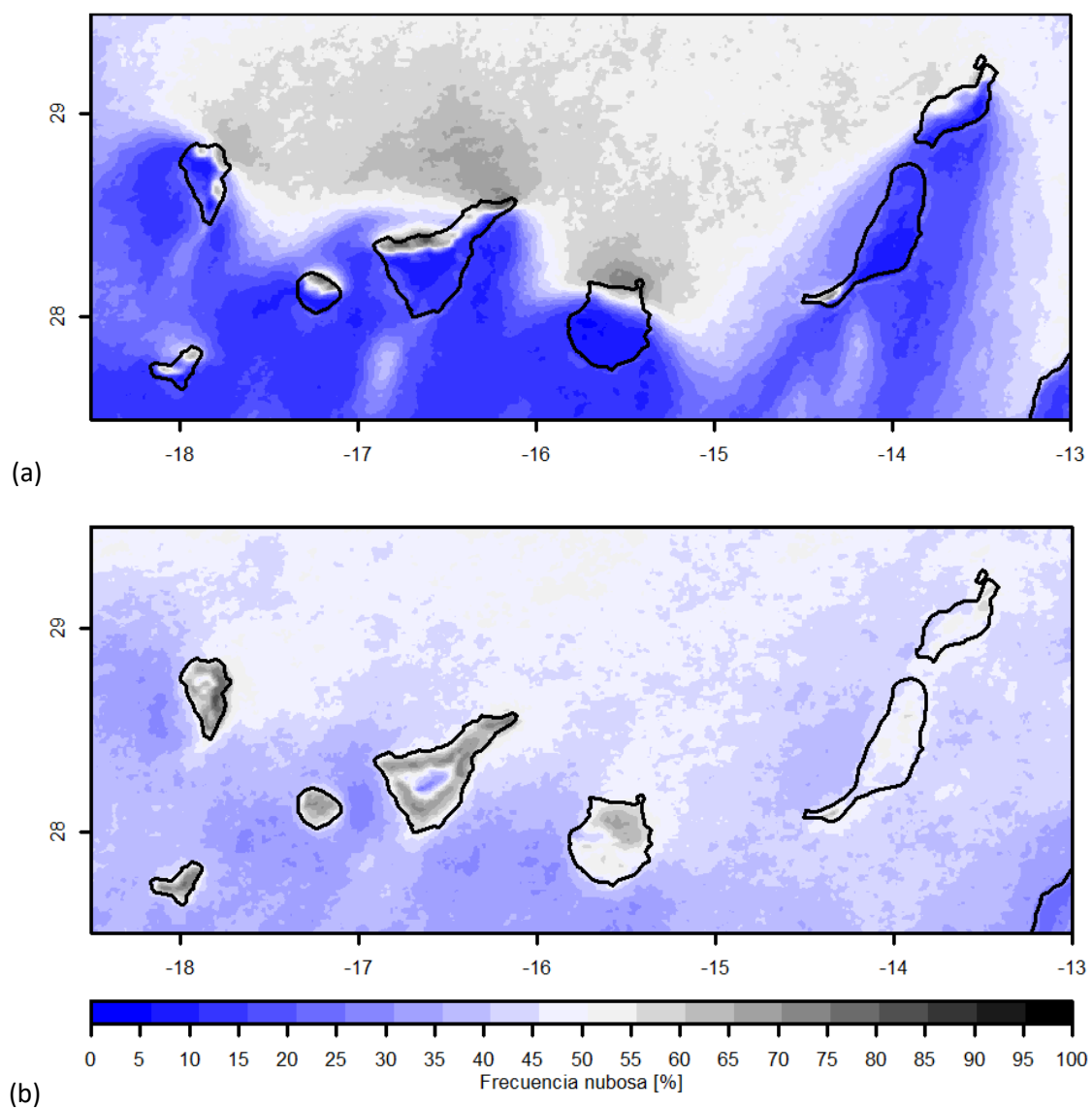


Figura 4.5.2. Frecuencia nubosa del mes de julio (a) y enero (b) a 400 m de resolución espacial promediada entre 2000 y 2014.

5. Mapas de Köppen

Los mapas de la clasificación climática de Köppen obtenidos para el archipiélago canario a partir de los mapas mensuales y anuales de temperatura mínima, media y máxima, además de los mapas de precipitación de los últimos 30 años, se muestran en la figura 5.1. Tal y como era esperar se han encontrado dos grandes grupos de climas principales los secos (Climas B), donde las precipitaciones anuales son inferiores a la evapotranspiración potencial anual, y los climas templados (Climas C) cuya principal característica es la humedad y las temperaturas que oscilan entre rangos diversos: la media del mes más frío entre 3°C –o 0°C- y 18°C, y la temperatura media del mes más cálido superior a 10°C. También una pequeña superficie con clima D con invierno muy frío y veranos frescos en las zonas más altas del Teide. En la tabla 5.1 se describe de forma pormenorizada estos climas con sus siglas observados en Canarias, mientras que en la tabla 5.2 se muestra el porcentaje de área afectada en cada isla por cada tipo clima.

Tabla 5.1. Descripción de las siglas de los climas encontrados en Canarias.

Siglas	Tipo de clima	Criterio precipitación	Criterio temperatura
BWh	Desértico cálido	Precipitaciones muy escasas, inferior a 200 mm anuales	Temperatura media anual superior a los 18°C
BSh	Estepario cálido	Precipitación esteparia escasa, entre 200 y 300 mm anuales	Temperatura media anual superior a los 18°C
BSk	Estepario frío	Precipitación esteparia escasa, entre 200 y 300 mm anuales	Temperatura media anual inferior a los 18°C
Csa	Templado (C) con verano seco (s) y clima subtropical (a)	Precipitación menor de 30 mm en el mes de verano mas seco	La Temperatura media del mes mas frío entre 0 y 18°C. Se supera los 22°C en el mes más cálido
Csb	Templado (C) con verano seco (s) y fresco (b)	Precipitación menor de 30 mm en el mes de verano mas seco	La Temperatura media del mes mas frío entre 0 y 18°C. No se supera los 22°C en el mes más cálido
Dsc	Clima continental (D) con verano seco (s) y frío (c)	Precipitación menor de 30 mm en el mes de verano mas seco	Temperatura media del mes mas frío inferior a 0°C y la del mes más cálido superior a 10°C

Tabla 5.2. Porcentaje de áreas afectadas por cada clima en cada isla.

Isla	BWh	BSh	BSk	Csa	Csb	Dsc	TOT
La Palma	4,0	11,8	0,6	12,2	71,5	0,0	100
El Hierro	10,0	33,5	6,4	13,9	36,1	0,0	100
La Gomera	13,8	32,2	3,7	12,1	38,3	0,0	100
Tenerife	15,6	17,6	5,8	12,7	48,0	0,4	100
Gran Canaria	36,0	30,0	5,4	18,8	9,8	0,0	100
Fuerteventura	93,8	1,1	5,0	0,0	0,0	0,0	100
Lanzarote	95,5	2,4	2,1	0,0	0,0	0,0	100

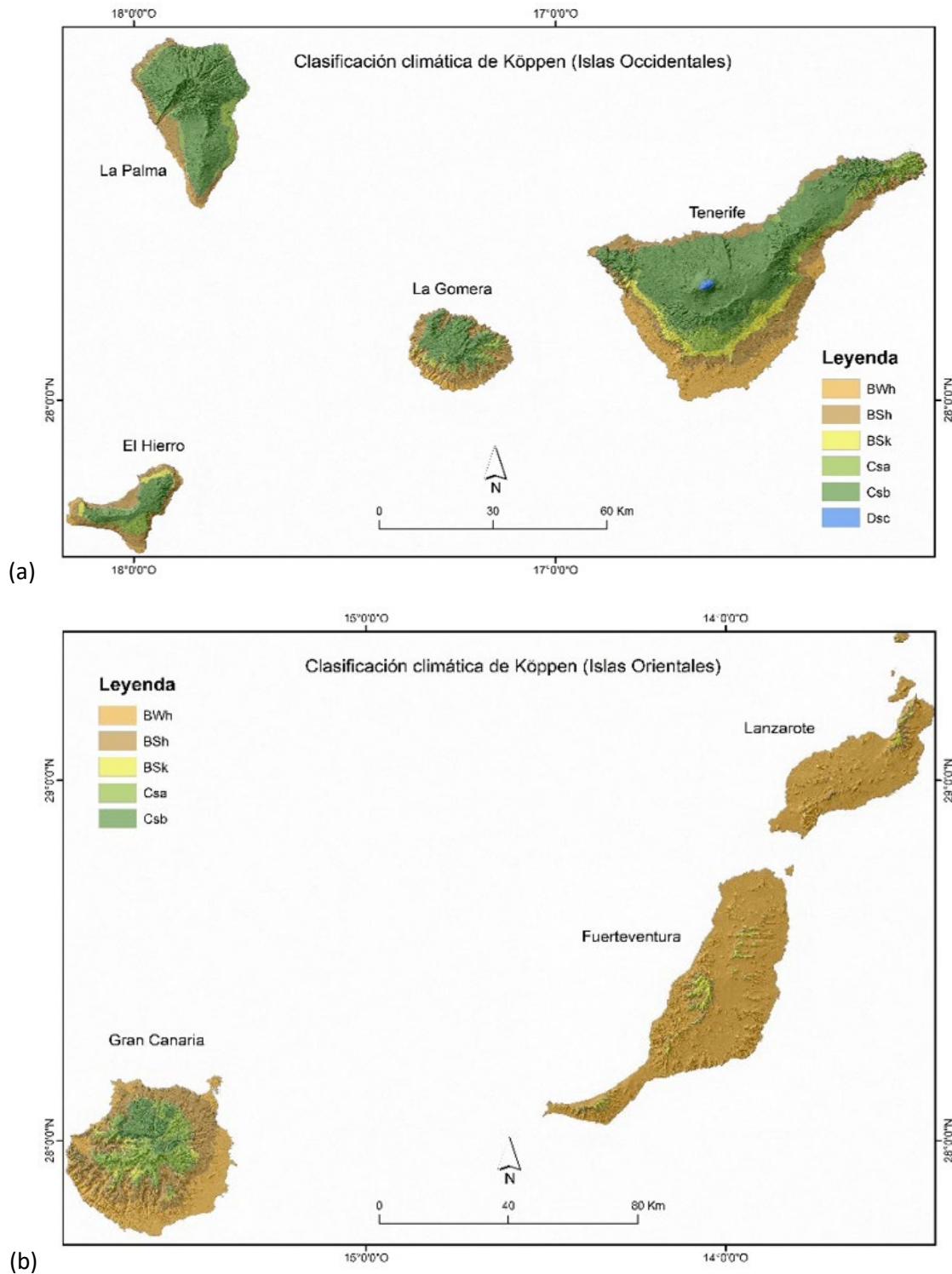


Figura 5.1 Mapas de clasificación climática de Köppen (a) Islas occidentales, (b) Islas Orientales

Los primeros (Climas B) desértico cálido o estepario, los vamos a encontrar principalmente en Lanzarote y Fuerteventura y zonas bajas de las demás islas, especialmente las orientadas a sotavento de los vientos alisios. En general, son de tipo BWh (desértico cálido), cuyo rasgo principal es la escasez de las precipitaciones, inviernos con temperaturas suaves mientras que

en verano las temperaturas son altas. En las islas más orientales de Lanzarote y Fuerteventura ocupan más del 90% de la superficie, mientras que, en las zonas de costa y medianías bajas de Gran Canaria, expuestas al segundo y tercer cuadrante, ocupan una amplia franja en torno al 36% de la superficie insular. Menor presencia tiene este tipo de clima en las islas occidentales (un mínimo del 4% de la superficie insular de La Palma y entre el 10-16% en el resto). Bordeando estas áreas encontramos un tipo de clima estepario cálido (BS), donde los inviernos son suaves y los veranos cálidos o muy cálidos. Dependiendo de si la temperatura media anual es superior o inferior a 18°C diferenciaríamos los climas BSh o BSk. Tal y como se muestra en la tabla inferior el clima BSh está ampliamente representado en las medianías de Gran Canaria, La Gomera y El Hierro (con superficies superiores al 30%), mientras que el clima BSk se circunscribe a pequeñas áreas de medianías situadas a sotavento y a cotas superiores que a los otros dos tipos de clima.

Los segundos, climas de inviernos templados y veranos secos y cálidos (Climas C), se localizan en las medianías y algunas zonas de menor altitud situadas a barlovento. Ocupan amplias superficies sobre todo de las islas occidentales, especialmente en La Palma isla donde el 84% de la superficie insular dominan los climas templados, frente al 61% de la isla de Tenerife, el 50% de La Gomera y El Hierro y el 29% de Gran Canaria. En todos estos espacios se diferencian los climas Csa y Csb. En el primero el verano es caluroso pues se supera el promedio de 22°C en el mes más cálido, mientras que, en el segundo, el verano es más fresco pues no se supera este umbral en el mes más cálido. Tal y como se muestra en la tabla inferior el clima Csb es el que mayor superficie ocupa, especialmente en las medianías y zonas de cumbre de las islas más montañosas.

Finalmente, Hay que señalar que los climas continentales de invierno muy frío (Grupo D en la clasificación de Köppen), podrían identificarse en las zonas más altas del Teide, pues la temperatura media del mes más frío es inferior a -3°C (o 0°C) y la del mes más cálido superior a 10°C. Se trataría de una pequeña superficie (menos del 0,5% insular).

6. Mapas de tendencias

La unidad de medida de la tendencia para el caso de la temperatura es de cambio en grados centígrados (°C) por década. En la siguiente tabla 6.1 se identifican los periodos en años utilizados en cada isla, así como los resultados generales de tendencias decadales máximas (calentamientos) y mínimas (enfriamientos), estadísticamente significativos a partir de los promedios anuales de los mapas de temperatura media. En la tabla 6.2 se puede observar el equivalente para las tendencias decadales de precipitación mensual. En las figuras siguientes se presentan los mapas de tendencia decadal con una trama granular sobre áreas de baja significancia estadística. La figura 6.1 muestra los mapas de tendencia decadal de temperatura media en la isla de La Palma y Gran Canaria, indicando calentamientos con colores anaranjados-rojizos y enfriamientos con colores grises-azulados. La tendencia decadal de la precipitación de las islas de Tenerife y Lanzarote se presenta en la figura 6.2.. Al igual que con la temperatura se muestra áreas con tendencia a disminuir la precipitación con colores marrón-anaranjado y tendencias a aumentar la precipitación con colores grises-azulados. Aparece, en general, un gran porcentaje de área con baja significancia estadística en los mapas de precipitación en todas las islas.

Tabla 6.1. Tendencias decadales de temperatura por isla.

Tendencias decadales de temperatura	Año inicio tendencia	Año final tendencia	Total años	Enfriamiento o tendencia mínima registrada y zona (°C/ década)	Calentamiento o tendencia máxima registrada y zona (°C / década)
La Palma	1991	2020	30	No se observa	+1.4 puntual en el noreste y +0,4 en costas este y oeste
La Gomera	1991	2020	30	No se observa	+1.2 puntual en cumbre y +0.8 en el este
El Hierro	1991	2020	30	No se observa	+0.8 en el oeste y norte
Tenerife	1991	2020	30	-0.8 en Buena Vista-Teno (Noroeste), -0.6 en Benijos-Agua Mansa (Norte centro)	+0.8 en triángulo Adeje-Vilaflor-Granadilla, +0.2 a +0.8 en costa este desde el Médano hasta San Andrés
Gran Canaria	1991	2020	30	-0.4 Puntual en Barranco Agaete (Noroeste)	+0.8 a +1.4 en triángulo Mogán-Fataga-Maspalomas, +0.4 a 0.8 en costa sur desde Puerto de Mogán hasta Bahía Feliz
Fuerteventura	1991	2020	30	No se observa	+0.4 En Morrojaable y costa sureste e interior sureste desde Gran Tarajal hasta Aeropuerto
Lanzarote	1993	2020	28	No se observa	+0.2 a +0.4 en Playa de Famara y costa este desde el Puerto del Carmen hasta Arrieta

Tabla 6.2. Tendencias decadales de precipitación por isla.

Tendencias decadales de precipitación	Año inicio tendencia	Año final tendencia	Total años	Disminución de precipitación registrada y zona (mm/década)	Aumento de precipitación registrada y zona (mm/década)
La Palma	1986	2020	35	-20 en zona montañosa de cumbre vieja, -10 en zonas costeras de la mitad sur	+15 en costa norte de Don Pedro y Los Franceses
La Gomera	1980	2020	41	-10 en pequeñas zonas del centro de la isla	No se observa
El Hierro	1991	2020	30	No se observa	+10 en extremo oeste y norte en Guarazoca y Las Puntas
Tenerife	1986	2020	35	-10 en suroeste en triángulo Vilaflor-Arona-La Quinta, en el este entre Granadilla y Las Vegas, zona entre Arafo y El Gaitero	+5 en zona Teno (Noroeste), Santa Cruz-Taco (Este)
Gran Canaria	1970	2020	51	No se observa	No se observa
Fuerteventura	1970	2020	51	No se observa	No se observa
Lanzarote	1970	2020	51	No se observa	No se observa

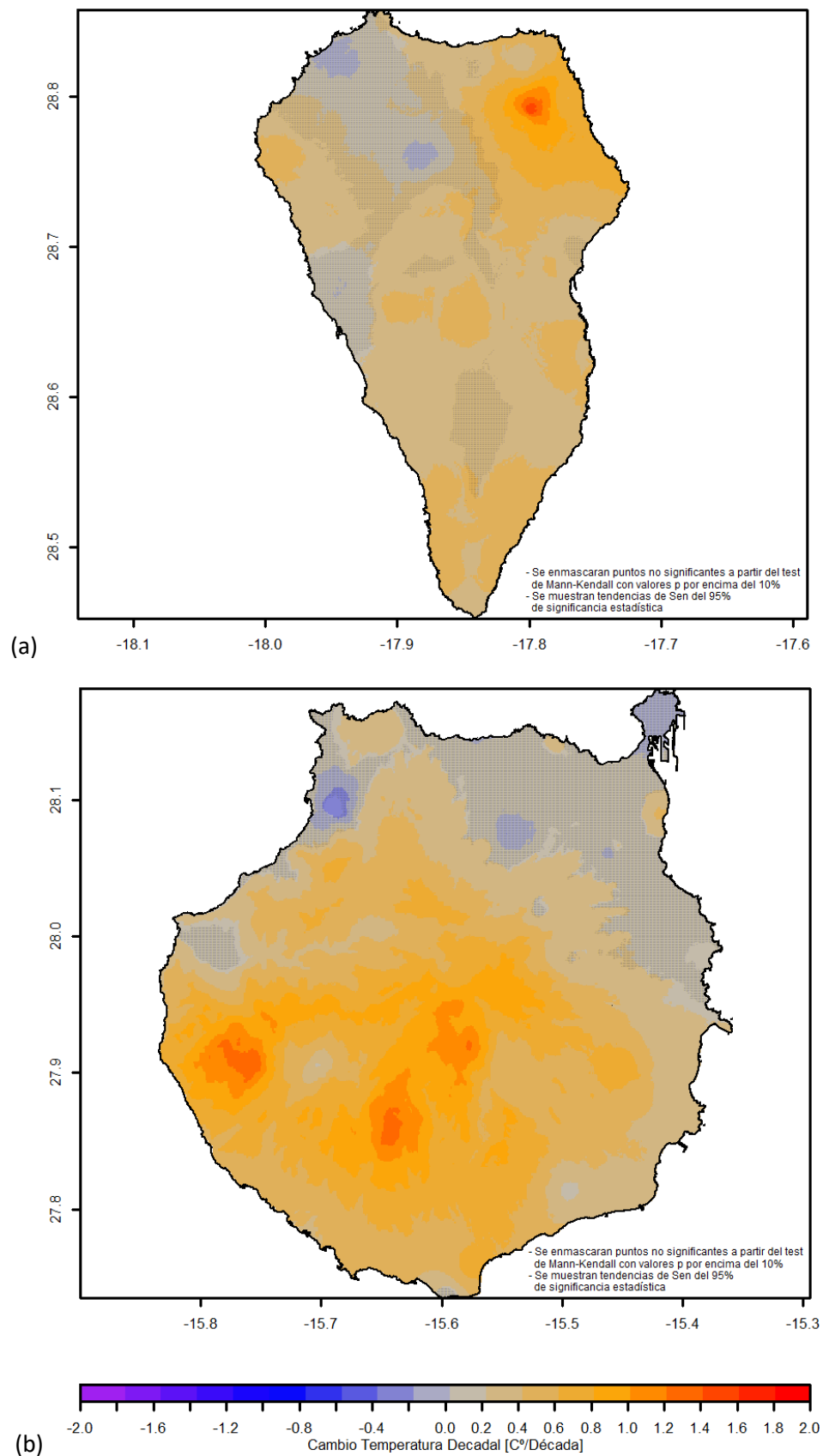


Figura 6.1 Tendencia decadal de temperatura en °C/década entre 1991 y 2020 para (a) La isla de la Palma y (b) La isla de Gran Canaria

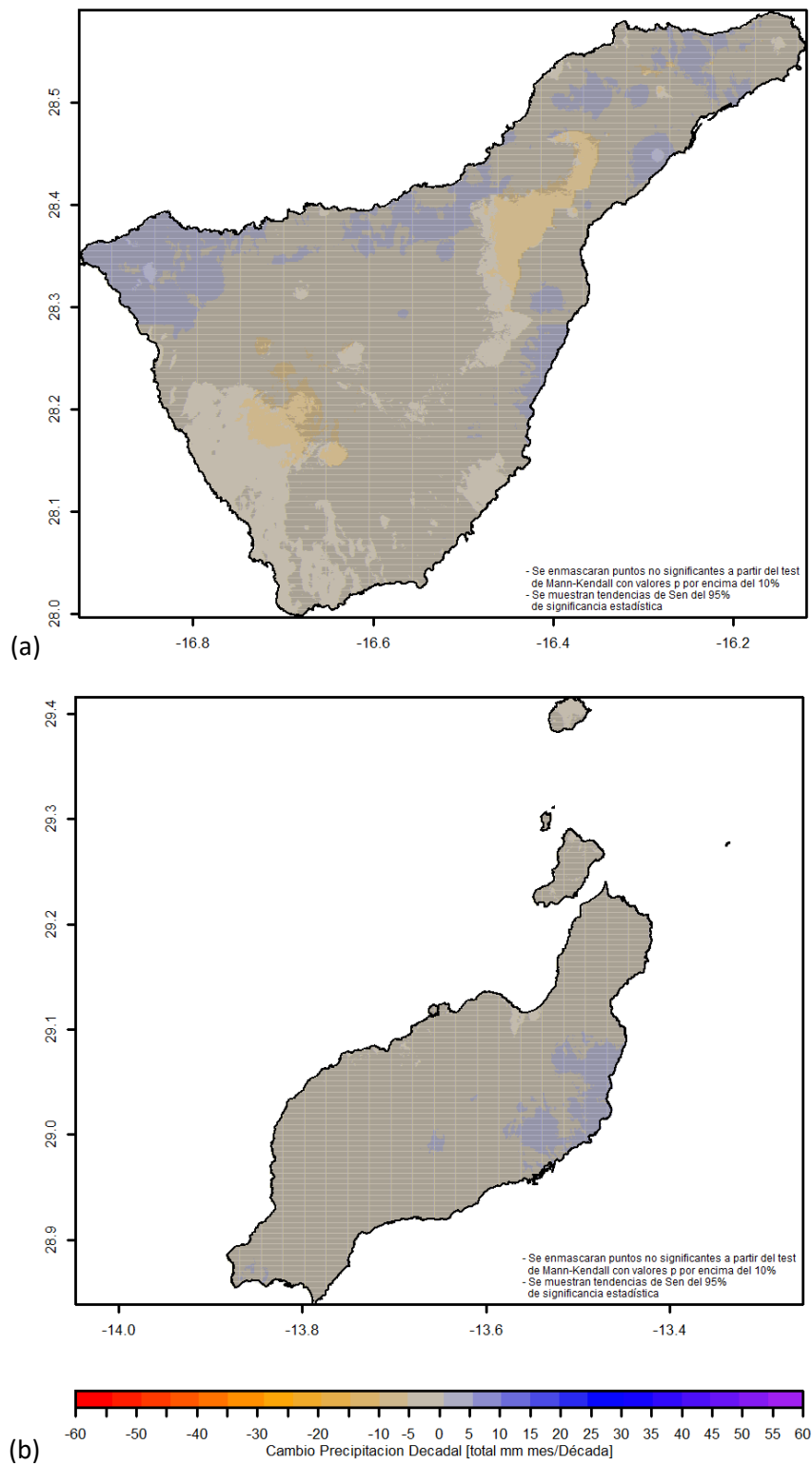


Figura 6.2 Tendencia decadal de precipitación en mm mes/década para (a) La isla de Tenerife entre 1986 2020 y (b) La isla de Lanzarote entre 1970 y 2020.

Agradecimientos

El proyecto del Atlas Climático Interactivo de Canarias se desarrolló en virtud de un convenio de colaboración institucional firmado en diciembre de 2020 entre La Universidad de Las Palmas de Gran Canaria y la Consejería de Transición Ecológica, Lucha contra el Cambio Climático y Planificación Territorial del Gobierno de Canarias, para la mejora de la información climática y de cambio climático en Canarias.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la labor realizada durante décadas por los organismos públicos encargados de la gestión de redes de observación meteorológica, así como por la multitud de observadores que, a lo largo de estos años, han trabajado de manera anónima en la recopilación de estos datos instrumentales con fines climáticos. Con respecto a los organismos y personas que han respondido enviando las bases de datos disponibles, queremos señalar los siguientes:

- La Agencia Estatal de Meteorología, concretamente a la sección de Climatología del Centro Oriental en las personas de Pino Domínguez y Orlando Pazos.
- A los Cabildos Insulares de La Palma (Juan Manuel Hernández Rodríguez), la red Agrocabildo perteneciente al Cabildo de Tenerife (Ramón López Frías), Los Consejos Insulares de Aguas de Gran Canaria (José Imar Chirivella), Fuerteventura (Domingo Montañez Mointañez) y Lanzarote.
- A los gestores de las redes del Sistema de Información Agroclimática para Regadío (SIAR) y al Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA).
- Al Instituto Astrofísico de Canarias que amablemente nos han cedido los datos de las estaciones automáticas ubicadas en los telescopios ubicados en las islas de La Palma y de Tenerife (Julio A. Castro-Alemán) cuyos datos se incorporarán en versiones posteriores del Atlas.

Referencias

Agencia Estatal de Meteorología (Aemet). Instituto de Meteorología (I.P.) (2012). Atlas climático de los archipiélagos de Madeira, Canarias y Azores.

Dorta Antequera, Pedro. (1996). Las inversiones térmicas en Canarias. Investigaciones Geográficas. 15. 10.14198/INGEO1996.15.01.

ERA5-Land. Explanation and data acces: <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>

Fick, S.E. and R.J. Hijmans, 2017. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 37 (12): 4302-4315.

Giambelluca, T.W., X. Shuai, M.L. Barnes, R.J. Alliss, R.J. Longman, T. Miura, Q. Chen, A.G. Frazier, R.G. Mudd, L. Cuo, and A.D. Businger. 2014. Evapotranspiration of Hawai'i. Final report submitted to the U.S. Army Corps of Engineers—Honolulu District, and the Commission on Water Resource Management, State of Hawai'i.

Guijarro, J.A. (2004). "CLIMATOL: software libre para la depuración y homogeneización de datos climatológicos". *Asociación Española de Climatología. Serie A*;4. <http://hdl.handle.net/20.500.11765/9036>

Guijarro, J.A. (2016): Automatización de la homogeneización de series climáticas: nuevas funciones del paquete Climatol 3.0. *X Congreso Internacional de la Asociación Española de Climatología (Alicante, 5 a 8 de octubre), en prensa*. Peterson TC, Easterling DR, Karl TR, Groisman P, Nicholls N, Plummer N, Torok S, Auer I, Böhm R, Gullett D, Vincent L, Heino R, Tuomenvirta H, Mestre O, Szentimrey T, Salinger J, Førland E, Hanssen-Bauer I, Alexandersson H, Jones P, Parker D (1998): Homogeneity Adjustments of 'In Situ' Atmospheric Climate Data: A Review. Int. J. Climatol., 18, pp:1493-1518.

Harris, I., P.D. Jones, T.J. Osborn, and D.H. Lister (2014), Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology 34, 623-642. doi:10.1002/joc.3711

Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Bedia, J., Cimadevilla, E., Díez-Sierra, J., Manzanar, R., Casanueva, A., Baño-Medina, J., Milovac, J., Herrera, S., Cofiño, A.S., San Martín, D., García-Díez, M., Hauser, M., Huard, D., Yelekci, Ö. (2021) Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WG1 Atlas. Zenodo, DOI: 10.5281/zenodo.3691645. Available from: <https://github.com/IPCC-WG1/Atlas>

Liu R, Liu Y. Generation of new cloud masks from MODIS land surface reflectance products. Remote Sensing of Environment. 2013; 133: 21–37. doi: 10.1016/j.rse.2013.01.019

López Gómez, J. y López Gómez A. (1979). El clima de Canarias según la clasificación de Köppen. Estudios Geográficos, 156, 321-340.

Ninyerola M., X. Pons y J.M. Roure. (2005) Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. © Universidad Autónoma de Barcelona. (DL: B-42538-2005, ISBN: 932860-8-7) (<http://opengis.uab.es/wms/iberia/>)

Sen, P.K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association 63, 1379-1389.

SITCAN. Sistema de Información Territorial de Canarias. 1. Descarga de mapas anuales promediados por isla en el grupo de Medio Ambiente: <https://opendata.sitcan.es/group/medio-ambiente?page=1>

Theil, H. (1950). A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis, I-III. Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch. A. 53, 386-392, 521-525, 1397-1412

UERRA (MESCAN-SURFEX) Surface data explanation and data access: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-uerra-europe-single-levels?tab=overview> , (HARMONIE) by pressure levels explanation and data access: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-uerra-europe-pressure-levels?tab=overview>

Wilson AM, Jetz W (2016) Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions. PLoS Biol 14(3): e1002415. doi:10.1371/journal. Pbio.1002415