



TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de las causas sinópticas de las lluvias intensas en Canarias

Realizado por
Pablo González Sicilia

Dirigido por
Albano José González Fernández
Francisco Javier Expósito González

Grado en Física 2021-2022



Agradecimientos

A Albano y Xisco por la ayuda prestada desde el primer momento y por hacer posible este trabajo.

A mi familia y amigos, por su apoyo y comprensión incondicional.

Abstract

The climate in the Canary Islands is characterized by quasi permanent stability due to the air stratification over the archipelago. This configuration of layers is composed of a low and moist layer of air that flows over an isothermal surface, mainly because of the presence of the Canary Islands current and the trade winds from NE, a layer of thermal inversion that oscillates yearly between 700 *m* and 1500 *m*, and finally a dry layer of air with a NW winds circulation almost all year. Due to this, the climate perturbations in the islands are induced by the alteration of this layer configuration and therefore, these constitute the main generators of intense rainfall in the islands.

In this work, we study the synoptic configurations that produce “heavy rain” in the archipelago to classify the main causes of them, and their spatial and temporal distribution in the islands. To do this, we made a selection of dates of “heavy rain” and then, study manually the synoptic patterns that cause them, splitting the synoptic situations into three main types, *Lows*, *Troughs*, and *Cutoff Lows*, to create a temporal series of the precipitation data.

Then, to study the spatial distribution of the rain, we separate the times series of precipitation associated with each one of the synoptic patterns by:

- Separation by sectors in the surroundings of the archipelago.
- Creation of rain zones by clustering algorithms.

Pressure, geopotential height, and temperature mean anomalies, were calculated for each one of the sectors to identify the mean synoptic patterns. With this, various statistical parameters were obtained for the precipitation data, based on the sectors and rain zones, and so to study the spatial distribution of rain among the islands.

The results obtained for this work show that the method developed for the study is capable of identifying the main generators of “heavy rains” and their temporal and spatial distribution, but it cannot be used to make predictions about the mean values of rainfall.

In general, during the studied period, the rainfall pattern occurs throughout the winter months with no heavy rainfall events for the months from April to September. In addition, the synoptic situations with the highest number of associated dates are the *Troughs*, followed by the *Lows*, and the *Cutoff Lows*. Finally, the spatial distribution of “heavy rains” is highly conditioned by the orography, with the western islands registering the highest rainfall intensity values.

Resumen

El clima de Canarias se caracteriza por una gran estabilidad debido a la estratificación del aire sobre el archipiélago. Esta configuración de capas está compuesta por una capa baja y húmeda de aire que discurre sobre una superficie isotérmica, principalmente por la presencia de la corriente de Canarias y los vientos alisios del NE, una capa de inversión térmica que oscila anualmente entre 700 *m* y 1500 *m*, y finalmente una capa de aire seco con una circulación de vientos del NW casi todo el año. Debido a esto, las perturbaciones climáticas en las islas son inducidas por la alteración de esta configuración y por tanto, estas constituyen las principales generadoras de precipitación intensa en las islas.

En este trabajo, se estudian las configuraciones sinópticas que producen “lluvias intensas” en el archipiélago y así clasificar las principales causas de estas en las islas, así como su distribución espacial y temporal. Con este propósito, se llevó a cabo una selección de fechas de “lluvias intensas” y luego se estudió manualmente los patrones sinópticos que las causan, dividiendo las situaciones en tres tipos principales, *Borrascas*, *Vaguadas* y *DANAs*, para crear una serie temporal de los datos de precipitación.

Luego, para estudiar la distribución espacial de la lluvia, se separaron las series temporales de precipitación asociadas a cada uno de los patrones sinópticos mediante:

- Separación por sectores del entorno del archipiélago.
- Creación de zonas de lluvia mediante algoritmos de clusterización.

Se calcularon anomalías medias de presión, altura geopotencial, y temperatura para cada uno de los sectores con el fin de identificar los patrones sinópticos medios, y se obtuvieron diversos parámetros estadísticos de los datos de precipitación, en función de los sectores y zonas de lluvia, para estudiar la distribución de la lluvia en las islas.

Los resultados obtenidos para este trabajo, muestran que el método desarrollado es capaz de identificar las principales situaciones sinópticas generadoras de “lluvias intensas” y su distribución temporal y espacial, pero no puede ser utilizado para hacer predicciones sobre los valores medios de lluvia.

En general, durante el periodo estudiado, el régimen de lluvias ocurre a lo largo de los meses de Invierno, sin precipitaciones durante los meses de abril a septiembre. Además, las situaciones sinópticas con mayor número de fechas asociadas son las *Vaguadas*, seguidas de las *Borrascas* y las *DANAs*. Finalmente, la distribución espacial de las “lluvias intensas” está muy condicionada por el factor orográfico, siendo las islas occidentales las que registran los valores más altos de intensidad pluviométrica.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. El clima en las Islas Canarias.	1
1.1.1. Localización y composición.	1
1.1.2. Factores del clima predominante en Canarias.	2
1.1.3. Precipitaciones en Canarias.	2
1.2. Objetivos	5
2. Metodología	6
2.1. Obtención de los datos.	6
2.2. Tratamiento y selección de los datos de precipitación.	7
2.3. Identificación manual de los patrones sinópticos asociados a las situaciones seleccionadas.	7
2.3.1. Obtención y tratamiento de los datos	7
2.3.2. Caracterización de las situaciones sinópticas	8
2.4. Obtención de las anomalías de presión	11
2.5. Cálculo de los parámetros estadísticos y separación por sectores y tipos	11
2.5.1. Separación por sectores de las <i>Borrascas</i> y <i>DANAs</i>	11
2.5.2. Separación por tipos de las <i>Vaguadas</i>	12
2.6. Construcción de zonas de lluvia en Canarias y cálculo de los parámetros estadísticos en base a estas	13
3. Resultados	15
3.1. Resultados para <i>Borrascas</i>	15
3.1.1. Distribución espacial y temporal	15
3.1.2. Distribución de las precipitaciones por sectores	17
3.1.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia	18
3.2. Resultados para <i>DANAs</i>	20
3.2.1. Distribución espacial y temporal	20
3.2.2. Distribución de las precipitaciones por sectores	21
3.2.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia	22
3.3. Resultados para <i>Vaguadas</i>	23
3.3.1. Distribución espacial y temporal	23
3.3.2. Distribución de las precipitaciones por sectores	24
3.3.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia	26
4. Conclusiones	28
4.1. Resultados generales	28
4.2. Conclusiones finales	29
5. Bibliografía	30
Anexos	31

A. Anexo I: Figuras y Tablas	33
A.1. Figuras y Tablas de la Metodología	33
A.2. Tablas de Resultados	35

Índice de figuras

1.1.	Mapa orográfico de Canarias. Imagen tomada de: Visor Grafcan	1
1.2.	Pluviometría de Tenerife 1920-2010. Imagen tomada de: Agrocabildo	4
1.3.	Normales climatológicas de la precipitación en La Palma. Fuente: [1].	5
1.4.	Normales climatológicas de la precipitación en Lanzarote. Fuente: [1].	5
2.1.	Ejemplos de los patrones sinópticos de cada una de las situaciones elegidas.	10
2.2.	Sectores empleados en el estudio.	12
2.3.	Tipos de <i>Vaguadas</i>	13
2.4.	Zonas de lluvia en Canarias.	14
3.1.	Anomalías medias de MSLP por sector en <i>Borrascas</i>	16
3.2.	Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y sector en <i>mm/d</i> para <i>Borrascas</i>	17
3.3.	Anomalías medias de Z500 por sector en <i>DANAs</i>	20
3.4.	Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y sector en <i>mm/d</i> para <i>DANAs</i>	21
3.5.	Anomalías medias de Z500 por tipos para <i>Vaguadas</i>	23
3.6.	Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y tipo en <i>mm/d</i> para <i>Vaguadas</i>	25

Índice de tablas

2.1. Conjuntos de fechas generados con su número de días, el percentil y el número de puntos.	7
3.1. Distribución temporal de las <i>Borrascas</i>	15
3.2. Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para <i>Borrascas</i>	18
3.3. Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el sector 1 con separación de los datos por zonas de lluvia para <i>Borrascas</i>	19
3.4. Distribución temporal de las <i>DANAs</i>	20
3.5. Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para <i>DANAs</i>	21
3.6. Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por sectores y zonas para <i>DANAs</i>	22
3.7. Distribución temporal de las <i>Vaguadas</i>	24
3.8. Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para <i>Vaguadas</i>	24
3.9. Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el tipo 1-4 de <i>Vaguadas</i> con separación de los datos por zonas de lluvia.	26
3.10. Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el tipo 2-5 de <i>Vaguadas</i> con separación de los datos por zonas de lluvia.	26
A.1. Diferencias entre métodos de clusterización para el mismo número de zonas.	33
A.2. Tabla de caracterización de situaciones.	34
A.3. Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por sectores y zonas para <i>Borrascas</i>	35
A.4. Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por tipos y zonas para <i>Vaguadas</i>	36

1. Introducción

Summary

In this section, a brief introduction to the climate of the Canary Islands is made. Starting with an introduction of their location, distribution, and general weather to then, do a short summary about the rain in the archipelago, the general perturbations that cause it, and its spatial and seasonal distribution among the islands. Finally, the main objectives of this work are discussed.

1.1. El clima en las Islas Canarias.

1.1.1. Localización y composición.

Las Islas Canarias se encuentran situadas al oeste de la costa norte de de África. Con un área aproximada de 7500 km^2 se extienden desde $27^{\circ}37'N$ hasta $29^{\circ}25'N$ y desde $13^{\circ}20'W$ hasta $18^{\circ}10'W$. El archipiélago se encuentra conformado por 8 islas y varios islotes de las cuales, las occidentales son las que mayor relieve presentan y las orientales las más planas.



Figura 1.1: Mapa orográfico de Canarias. Imagen tomada de: [Visor Grafcan](#).

En concreto, entre las islas occidentales se encuentran el Hierro, la Palma, la Gomera y Tenerife, y entre las orientales Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa. Cabe destacar que la isla que mayor relieve presenta, es la isla de Tenerife, donde se encuentra el volcán del Teide con 3715 m de altitud, y la de menor relieve es La Graciosa con una altura máxima de 266 m .

1.1.2. Factores del clima predominante en Canarias.

A la hora de estudiar el clima de Canarias, uno de los trabajos más completos a los que se puede acudir es el realizado por Inocencio Font Tullot [2]. Los párrafos siguientes son un resumen de lo expuesto en dicha obra, para introducir los diferentes aspectos del clima de las islas relevantes para la realización de este trabajo.

Dada su localización, las Islas Canarias se encuentran directamente bajo la influencia de los vientos alisios lo que hace que el clima en las mismas sea generalmente estable. En general, la presencia de los vientos alisios del NE sobre el archipiélago es predominante durante casi todo el año, intensificándose en los meses de verano y debilitándose durante los de invierno. Junto a estos, se configura una corriente de aguas muy frías procedentes del Atlántico, conocida como la corriente de las Islas Canarias. Razón por la cual la temperatura del agua en las islas es de uno a dos grados menor que la del continente africano o las Azores. Esta corriente junto al alisio, propicia la aparición de una capa de aire húmedo y relativamente frío que circula a baja altura sobre las islas.

Por encima de esta capa, entre los 700 *m* y los 1500 *m* aparece una capa de subsidencia donde la temperatura suele aumentar entre unos 5 °C y 15 °C dependiendo de la época del año, siendo mayor en verano que en invierno. Una vez superada la inversión térmica, nos encontramos con una capa de aire seco donde la circulación predominante es del NW, que afecta a las zonas altas de las islas de mayor relieve. Esta estratificación de capas de aire, junto a la orografía de las islas, da lugar a que en las zonas a barlovento del alisio se produzca la formación de una capa de estratocúmulos, cuyo tope se sitúa justamente al comienzo de la capa de inversión térmica. Esta capa nubosa, conocida comúnmente como el "mar de nubes", puede llegar a generar precipitaciones débiles en las cumbres de las islas cuya situación es favorable para este tipo de meteoros.

Es esta configuración de capas de aire, con una capa húmeda a la que se sobrepone una seca separadas por una capa de inversión térmica, la responsable de que, en general, los patrones de tiempo en Canarias sean relativamente estables. Y son los cambios en este régimen, los principales causantes de las perturbaciones del clima en el archipiélago.

1.1.3. Precipitaciones en Canarias.

Como hemos visto, la configuración del tiempo en las islas es bastante estable debido a la presencia predominante de los vientos alisios y la formación de una capa de subsidencia que actúa como bloqueo frente al desarrollo vertical de nubes cumuliformes. De esta forma, la aparición de situaciones sinópticas que produzcan el cese del alisio, o la desaparición de la capa de subsidencia serán las principales causantes de lluvia en las islas.

Causas generales de precipitación.

En general, vamos a distinguir tres tipos principales de situaciones que llevan asociadas precipitaciones de cierta intensidad [3]:

- **Invasiones de aire polar marítimo:** Este tipo de situaciones tiene mayor presencia en altura que en superficie, aproximadamente entre los 1500 *m* y los 2000 *m*. Suelen ir acompañadas de fuertes descensos en la temperatura, con lo que el gradiente vertical de temperaturas aumenta, desapareciendo la característica capa de subsidencia y permitiendo el desarrollo de nubes de evolución. En general, se pueden producir precipitaciones según el grado de inestabilidad y la cantidad de vapor de agua presente en la masa de aire polar. En este tipo de situaciones juega un gran papel el relieve, de forma que aquellas islas con regiones favorablemente orientadas, pueden registrar acumulaciones diarias de más de 100 *mm*. No es así en el caso de las islas de menor relieve, donde únicamente en situaciones de gran inestabilidad se pueden llegar a registrar entre 30 *mm* y 50 *mm*. Estos eventos, a pesar de tratarse por separado, pueden darse en multitud de patrones sinópticos.
- **Depresiones frías en altura:** Se incluyen en este grupo las situaciones sinópticas que se manifiestan principalmente en altura (500 *hPa*, por ejemplo), aunque a la larga puedan adquirir un reflejo en superficie. Se incluyen por tanto en este grupo las denominadas Depresiones Aisladas en Niveles Altos o DANAs, que constituyen el grupo principal de depresiones frías en altura que puede afectar al archipiélago. La aparición de estas depresiones en la vecindad del archipiélago, suponen un cambio radical en la estratificación de las masas de aire, lo que induce una situación atmosférica de alta inestabilidad. Hay veces, en las que esta inestabilidad es suficiente para producir precipitaciones, sin embargo cuando estas adquieren un reflejo en superficie muy marcado, puede producirse el transporte de masas de aire tropical muy húmedo y caliente desde latitudes más meridionales, resultando en precipitaciones muy fuertes e incluso localmente torrenciales.
- **Borrascas:** Dada la posición de las islas, estas pueden verse afectadas por las *Borrascas* que se forman en la zona templada cuando la configuración sinóptica en la vecindad del archipiélago así lo permite. En general, la forma en la que este tipo de situaciones afecta a las islas depende de muchos factores, como pueden ser la posición del centro de la *Borrasca*, su intensidad, posición de los frentes, etc. Así pues, podemos encontrar diversos patrones que se repiten atendiendo a dichas condiciones, siendo además importante tener en cuenta el trayecto que sigue la misma a través del archipiélago. Una de las situaciones de mayor intensidad hídrica, sucede cuando se sitúan al oeste de las islas. En este caso, la propia circulación del aire proveniente del sur puede hacer ascender masas de aire con gran cantidad de vapor de agua que, debido al factor orográfico, dan lugar a lluvias muy intensas.

Importancia del factor orográfico en la precipitación.

El factor más importante en la distribución de la precipitación local en las islas, es el propio relieve. Esto se puede comprobar, atendiendo a la figura 1.2, donde se puede apreciar cómo la media de la lluvia recogida en Tenerife entre los años 1920 y 2010 aumenta con la altura, siendo mayor en las zonas altas, y reduciéndose conforme nos acercamos a la costa. Además, muestra claramente cómo las caras orientadas hacia el N-NE son las más húmedas, coincidiendo con las zonas que se encuentran a barlovento de los vientos alisios. En general, la precipitación en el archipiélago aumenta de este a oeste, siendo Lanzarote y Fuerteventura las islas más secas, recibiendo aproximadamente 200 *mm* anuales. Les sigue un segundo grupo formado por Tenerife, Gran Canaria y La Gomera, con una máxima anual de 500 *mm* y, finalmente, un tercer grupo formado por El Hierro y La Palma, que reciben aproximadamente 700 *mm* anuales [4].

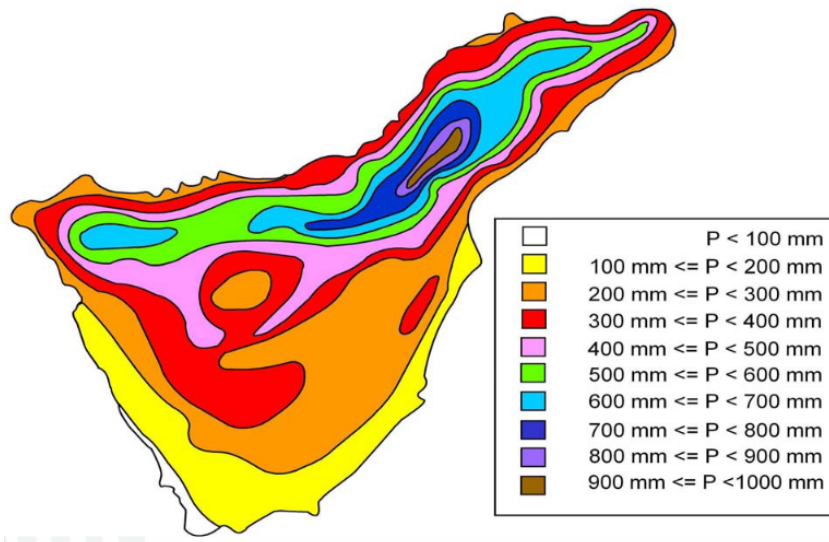


Figura 1.2: Pluviometría de Tenerife 1920-2010. Imagen tomada de: [Agrocabildo](#).

Distribución temporal de la precipitación.

En general, el régimen de precipitaciones en las islas, además de variar localmente con el relieve, presenta una gran estacionalidad. En concreto, los meses con mayor registro de precipitaciones son los meses de diciembre y enero y los más secos los meses de julio y agosto. [1]. Si nos fijamos en las figuras 1.3 y 1.4, donde se representa la serie temporal frente a la media de precipitación mensual para los años 1971-2000 en el aeropuerto de La Palma y 1973-2000 en el aeropuerto de Lanzarote, respectivamente, se puede comprobar cómo el patrón estacional de las precipitaciones se mantiene incluso entre las islas que presentan los extremos de lluvia en el archipiélago.

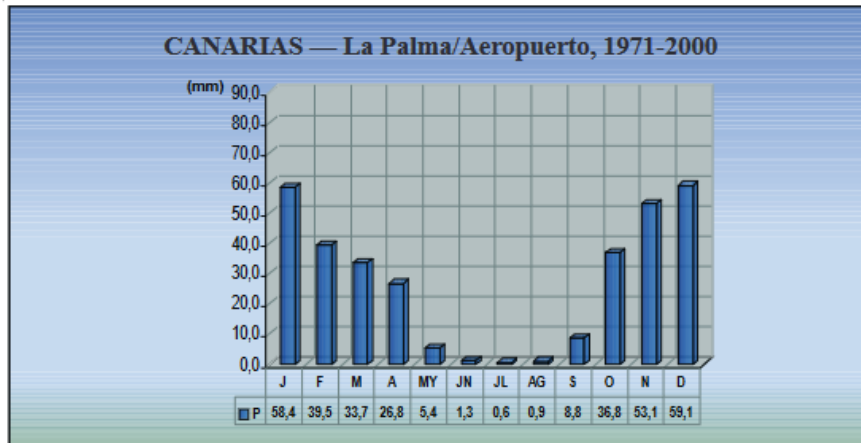


Figura 1.3: Normales climatológicas de la precipitación en La Palma. Fuente: [1].

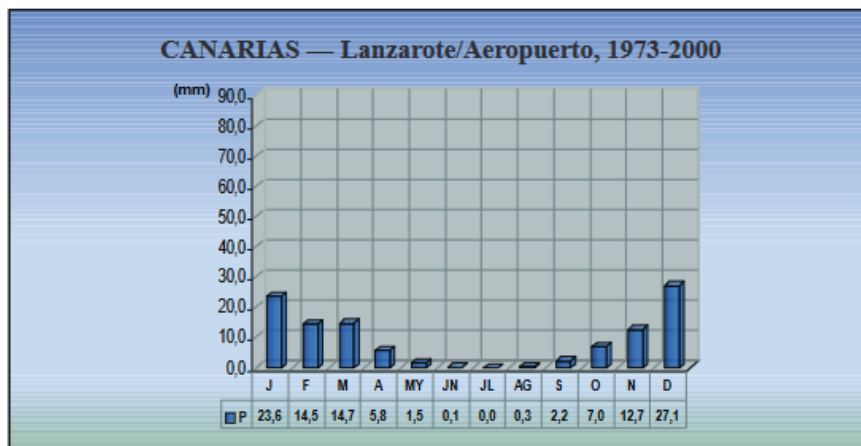


Figura 1.4: Normales climatológicas de la precipitación en Lanzarote. Fuente: [1].

1.2. Objetivos

Los objetivos principales de este trabajo son:

- Clasificación de las causas sinópticas de las lluvias fuertes en Canarias.
- Estudio de las distribuciones tanto espaciales como temporales de estas.

Con este fin, en el siguiente capítulo se describen los datos utilizados para la realización del estudio, y los métodos utilizados para obtener los días de lluvia intensa y para caracterizar las diferentes situaciones sinópticas asociadas. En el capítulo 3, se realiza el análisis de los principales resultados encontrados. Finalmente, se realiza una exposición de las conclusiones del estudio.

2. Metodología

Summary

In this section, a presentation of the different procedures or studies carried out on the data is made. Starting by presenting the rainfall data and the process used to select the dates with heavy rain then, explaining the manual identification of the synoptic patterns associated with each of the selected dates, introducing the treatment of the data, the three selected synoptic situations and the structure of the table made for the classification of the dates. Secondly, the different studies carried out to evaluate the pluviometric and synoptic conditions of each situation are presented, such as pressure, geopotential height, and temperature anomalies, the calculation of the different statistical parameters of each one of them, and the separation by sectors and types made on the situations with the corresponding calculation of the statistical parameters. Finally, an explanation of the cluster procedure carried out to create rain zones, and the different statistical parameters calculated based on them is given.

En general, el primer paso en este tipo de estudios comienza con la obtención de los datos de precipitación, seleccionándose los casos con los que se va a trabajar. A partir de ahí se realizan diversos estudios en los que se pretende evaluar algunas de las características de las situaciones de lluvia, como pueden ser los patrones sinópticos, las distribuciones espaciales y temporales de la precipitación, la cantidad de lluvia recogida, etc.

2.1. Obtención de los datos.

El primer paso del estudio fue la descarga y obtención de los datos de precipitación de las islas. En este caso, se empleó la base de datos *Spanish Precipitation At Daily Scale* (SPREAD) [5]. Esta incluye datos de 920 estaciones a lo largo de todas las islas, en un mallado o *grid* donde en cada punto o píxel del mismo, con un área de 5 km^2 , se realiza una interpolación de la precipitación diaria, en mm/d , en base a los datos recogidos por las estaciones entre 1971 y 2012.

Para este trabajo, con objeto de adaptar los datos a la serie climática más reciente, se redujo la base de datos de forma que, únicamente, se consideraron los datos de 1980 a 2009. El tipo de archivos de la base de datos SPREAD es “NetCDF”, por lo que hubo que hacer uso de la librería de *Python netCDF4* [6] para poder trabajar con ellos.

2.2. Tratamiento y selección de los datos de precipitación.

Una vez obtenidos los datos necesarios, se procedió a buscar una forma de seleccionar los días en los que se produjeron lluvias fuertes. El primer paso fue establecer cuándo se considera que una lluvia es fuerte. La primera idea fue realizar una segregación de los datos en base a los valores máximos de precipitación en todo el archipiélago. Sin embargo, debido a la posibilidad de recoger lluvias muy localizadas con carácter torrencial en algunos casos se descartó este procedimiento. La segunda opción, y la finalmente empleada, fue seleccionar los días de precipitaciones fuertes en base a que se superase un cierto número de puntos donde el valor de la precipitación estimada fuese mayor que un cierto valor del percentil histórico de los mismos.

La selección se hizo mediante un programa en *Python*, con el que se impusieron las restricciones ya comentadas, en total se obtuvieron 3 conjuntos de datos:

	Percentil	Número de píxeles	Número de días
Conjunto 1	99	80	155
Conjunto 2	99.85	10	147
Conjunto 3	99.7	25	146

Tabla 2.1: Conjuntos de fechas generados con su número de días, el percentil y el número de puntos.

Finalmente, de los tres conjuntos de fechas obtenidos se eligió trabajar con el conjunto 1, dado que es el que más días comprendía de los tres, y porque se buscaban lluvias no localizadas, es decir, que la condición del percentil se cumpliera para 80 o más puntos. Esto implica que la lluvia se producía en varias de las islas, o que se producía de forma localizada en una isla pero con una cierta extensión.

2.3. Identificación manual de los patrones sinópticos asociados a las situaciones seleccionadas.

2.3.1. Obtención y tratamiento de los datos

Con las 155 fechas seleccionadas se procedió entonces a la identificación “manual” de las causas sinópticas de las lluvias. Para ello, se usaron los datos del reanálisis del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), conocidos como ERA5 [7], de donde se tomaron la presión a nivel del mar (*MSLP*), el geopotencial a 500 *hPa* (*Z500*), y la temperatura a 500 *hPa* (*T500*) para construir los mapas sinópticos asociados a cada uno de los casos seleccionados.

Al igual que la base de datos SPREAD los datos se encuentran en formato NetCDF, por lo que se tuvo que volver a hacer uso de la librería *netCDF4* para poder acceder a los datos. En este caso, se tuvo que hacer un tratamiento de los datos originales para adaptarlos a las magnitudes que se usaron en el trabajo. En concreto, se pasaron la *MSLP* de *Pa* a *hPa*, la *Z500* de m^2s^{-2} a *dam*, y la *T500* de *K* a $^{\circ}C$. Para ello se hizo uso de las siguientes ecuaciones:

$$MSLP(hPa) = \frac{MSLP(Pa)}{100} \quad (2.1)$$

$$Z500(dam) = \frac{Z500(m^2s^{-2})}{10g} \quad g = 9,80655 \text{ ms}^{-2} \quad (2.2)$$

$$T500(^{\circ}C) = T500(K) - 273,15 \quad (2.3)$$

Para construir los mapas, se empleó un programa en *Python* que tomaba los datos del ERA5 y los representaba en el entorno de las islas. En concreto se hizo uso de las librerías *Cartopy* [8] y *Matplotlib* [9] para realizar la representación.

En total, se obtuvieron 4 mapas por día debido a que se tomaron los datos para las 00:00 y las 12:00 horas UTC. Así pues, por día se tienen 2 mapas para la *MSLP* (uno a las 00 y otro a las 12) y 2 mapas en los que se representaron conjuntamente la *Z500* y la *T500* (uno a las 00 y otro a las 12). Además de representar las isobaras de presión y el mapa de temperaturas, se pintaron ciertas isolíneas con el objetivo de diferenciar mejor los patrones sinópticos. En concreto, se representaron tanto la isoterma de $-20^{\circ}C$ como la isohipsa de 550 dam , entendida como la altura típica a 500 hPa , en los mapas de *Z500* y *T500*. También se representó la isobara de 1013 hPa , entendida como la presión estándar a nivel del mar, en los mapas de *MSLP*.

En relación con los datos de precipitación, se representaron también los datos de SPREAD para cada una de las fechas seleccionadas con el fin de observar preliminarmente los patrones de lluvia, y ver dónde se producían los máximos de precipitación en cada una de estas.

Finalmente, además de trabajar con los datos del reanálisis del ERA5, se hizo uso del Boletín Meteorológico Diario de AEMET [10], como medio para contrastar los datos del reanálisis del ERA5 y de precipitación de SPREAD en cada uno de los días, y conocer los tipos de frentes asociados a cada situación.

2.3.2. Caracterización de las situaciones sinópticas

Una vez se tuvieron los mapas, tanto del reanálisis como de precipitación, se realizó la caracterización de las diferentes situaciones mediante la construcción de una tabla, en la que se recogían diversos parámetros asociados a cada una de estas. Para ello, se separaron las diferentes situaciones sinópticas en 3 tipos, *Borrasca*, *Vaguada*, y *DANA*, atendiendo a una serie de condiciones:

- **Borrasca:** Para que la situación sinóptica fuese considerada la de una *Borrasca*, se tenían que cumplir al menos dos de las siguientes condiciones:
 1. Depresión en altura con un fuerte reflejo en superficie.
 2. Tamaño y profundidad considerable de la depresión.
 3. Que la isohipsa de 550 *dam* esté cerrada sobre la depresión.

Un ejemplo de un mapa sinóptico de esta situación, se puede ver en las figuras 2.1a y 2.1b, donde la isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la isobara de 1013 *hPa* se dibujan en azul, y la isohipsa de 550 *dam* en rojo.

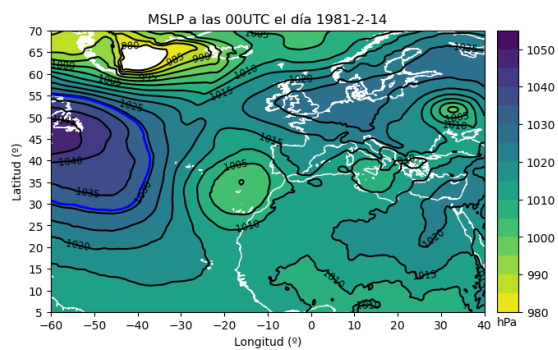
- **DANA:** Para que la situación sinóptica fuese considerada la de una *DANA*, se tenían que cumplir al menos dos de las siguientes condiciones:
 1. Depresión únicamente en altura a la que puede sumarse un débil reflejo en superficie.
 2. Baja cerrada en altura que contiene una masa de aire relativamente más fría que el aire a su alrededor.
 3. La isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ debe cerrarse sobre la depresión.

Las figuras 2.1c y 2.1d, muestran el patrón sinóptico típico de una *DANA*, donde la isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la isobara de 1013 *hPa* se dibujan en azul, y la isohipsa de 550 *dam* en rojo.

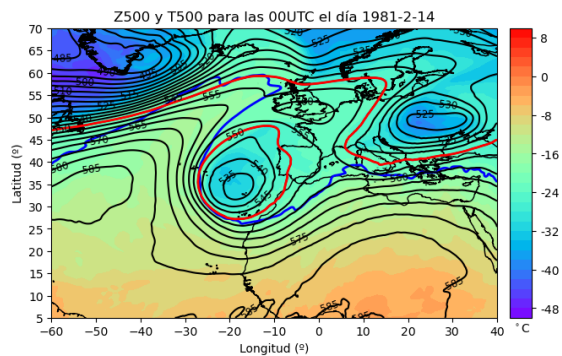
- **Vaguada:** Para que la situación sinóptica fuese considerada la de una *Vaguada*, se tenían que cumplir al menos dos de las siguientes condiciones:
 1. Depresión en altura con o sin reflejo en superficie.
 2. Patrón típico de una vaguada, una zona de bajas presiones alargada.
 3. La isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ debe definir el contorno de esta.

En las figuras 2.1e y 2.1f, se puede observar un ejemplo del patrón sinóptico de una *Vaguada*, donde la isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la isobara de 1013 *hPa* se dibujan en azul, y la isohipsa de 550 *dam* en rojo.

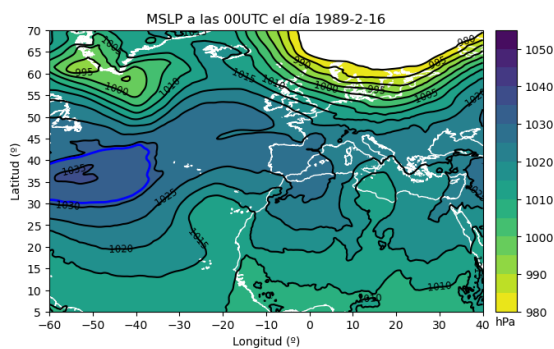
El procedimiento para la construcción de la tabla era el siguiente: primero se anotaba la fecha, y si había frente asociado se indicaba su tipo. Luego, se apuntaba si había baja en altura (500 *hPa*) o en superficie (*MSLP*) y la posición aproximada del centro de ambas en latitud y longitud. Una vez hecho esto, se diferenciaba entre los tres tipos de situaciones posibles ya nombrados, y se anotaban los máximos de precipitación y la isla donde se producían. En total, de las 155 fechas, se clasificaron en base a los tres tipos de situaciones 149, con lo que el conjunto de fechas quedó reducido. Un ejemplo de la clasificación, se puede ver en la tabla A.2 incluida en los anexos, donde se muestran las 36 primeras filas de la base de datos construida.



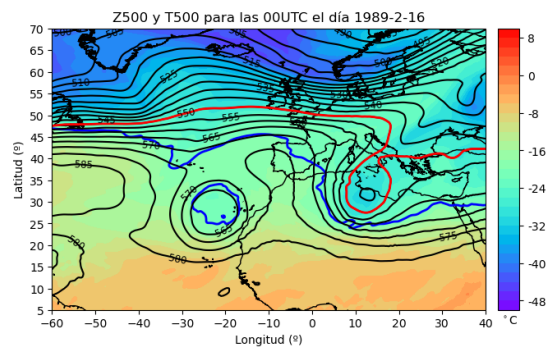
(a) *Borrasca* a nivel del mar.



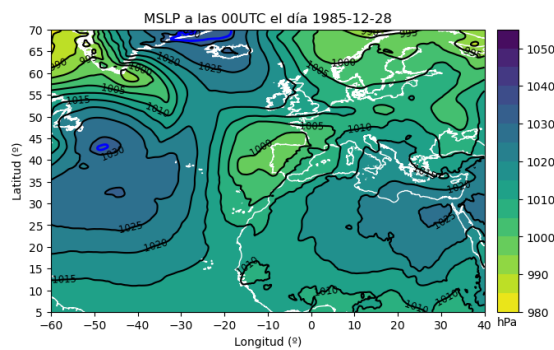
(b) *Borrasca* a 500 hPa.



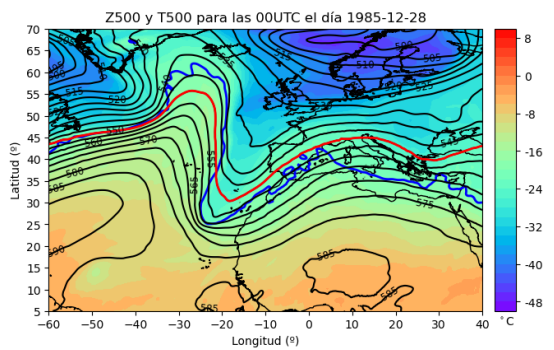
(c) *DANA* a nivel del mar.



(d) *DANA* a 500 hPa.



(e) *Vaguada* a nivel del mar.



(f) *Vaguada* a 500 hPa.

Figura 2.1: Ejemplos de los patrones sinópticos de cada una de las situaciones elegidas.

2.4. Obtención de las anomalías de presión

Las anomalías de presión y temperatura, ayudan a identificar los días y las zonas de aumento y disminución de la presión o la temperatura respecto a la media anual o mensual. Así pues, una anomalía positiva indica un aumento, una negativa indica un descenso, y una anomalía cercana a cero implica una zona o día con una presión similar a la media.

Para la obtención de estas, se calcularon los valores medios de *MSLP*, *Z500*, y *T500* mensuales y anuales para el período 1980-2009, a partir de los datos obtenidos del reanálisis ERA5. Cabe indicar, que en el caso de la media anual se eliminaron los meses de verano, debido a que de las 149 fechas, ninguna de estas pertenece a los meses de verano. Una vez se tuvieron los valores medios, se le restaron a los valores diarios de *MSLP*, *Z500*, y *T500*, obteniéndose las anomalías diarias respecto a la media mensual y anual respectivamente. A partir de ellas, se calcularon las anomalías medias, entendidas como la media de las anomalías diarias, para cada una de las situaciones. Se hallaron tanto las medias de las anomalías mensuales como de las anuales para todos los tipos de datos extraídos de ERA5, es decir, *MSLP*, *Z500*, y *T500*.

2.5. Cálculo de los parámetros estadísticos y separación por sectores y tipos

Una vez separadas las fechas por tipos, se realizó la separación de las situaciones por sectores o tipos, y el cálculo de diversos parámetros estadísticos de la precipitación total en el archipiélago. En concreto, se calcularon la media aritmética, la desviación estándar, la mediana y el percentil 90.

2.5.1. Separación por sectores de las *Borrascas* y *DANAs*

Con vistas a estudiar en mayor profundidad los patrones de lluvia, se seccionó el entorno de las islas en 6 sectores, tres en longitud y dos en latitud. Los límites de dichos sectores se sitúan en longitud a 20°W y 10°W , y en latitud a 36°N . La separación por sectores se puede ver en la figura 2.2 donde se indican los nombres dados a los diferentes sectores.

Luego, en base a la posición del centro de bajas presiones en *MSLP* para *Borrascas*, y en *Z500* para *DANAs*, se separaron las fechas de ambas situaciones por sectores. Una vez hecho esto, se calcularon por sector:

- La precipitación media por píxel.
- La desviación estándar de la precipitación por píxel.
- Las anomalías diarias y medias para *MSLP*, *Z500*, y *T500*.
- La media, desviación estándar, mediana y percentil 90 de la precipitación total en el archipiélago.

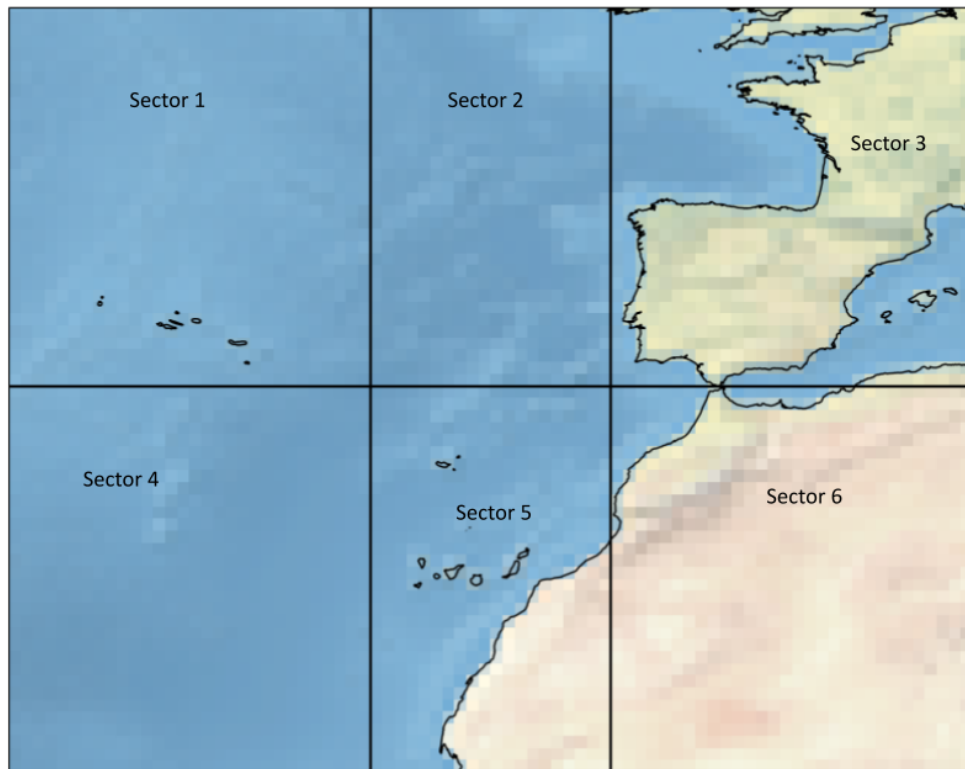


Figura 2.2: Sectores empleados en el estudio.

2.5.2. Separación por tipos de las *Vaguadas*

En el caso de las *Vaguadas*, la separación por sectores era completamente inviable dada su extensión, y que no poseen un centro de bajas presiones bien definido. Se optó entonces, por separarlas por tipos atendiendo al número de sectores que cruza su eje “aparente”. Por ejemplo, atendiendo a la figura 2.2 si una *Vaguada* cruza los sectores 1 y 5, se le asigna al tipo 1-5, si cruza los sectores 3 y 5, pertenece al tipo 3-5 y así sucesivamente. Las anomalías medias de $Z500$ permiten visualizar más claramente estos tipos. De esta forma en la figura 2.3, se pueden apreciar las distintas clases de *Vaguadas* obtenidas en base a los sectores que cruzan este eje.

La separación de los casos de *Vaguadas* se hizo manualmente al igual que con la separación y selección de situaciones. Para ello se añadió una nueva columna a la tabla comentada en el apartado 2.3.2 en la que se anotó el tipo de *Vaguadas*. Una vez realizada la separación, al igual que para los sectores en *Borrascas* y *DANAs*, se calcularon por tipos:

- La precipitación media por píxel.
- La desviación estándar de la precipitación por píxel.
- Las anomalías diarias y medias para $MSLP$, $Z500$, y $T500$ (varios de estos resultados se encuentran recogidos en la figura 2.3).

- La media, desviación estándar, mediana y percentil 90 de la precipitación total en el archipiélago.

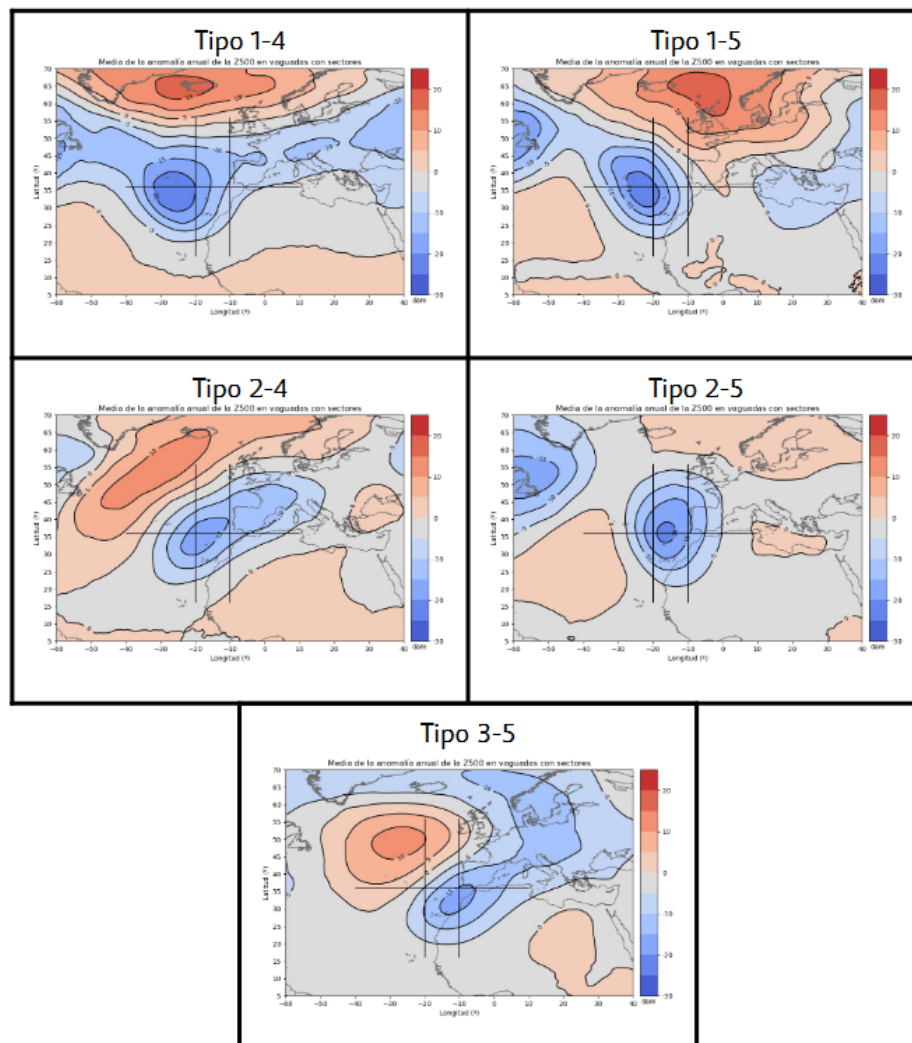


Figura 2.3: Tipos de *Vaguadas*.

2.6. Construcción de zonas de lluvia en Canarias y cálculo de los parámetros estadísticos en base a estas

El paso final del trabajo fue la creación de zonas de lluvia mediante algoritmos de agrupamiento. Para ello se hizo uso de la librería *scikit-learn* en *Python*, concretamente de su módulo de *clustering* [11].

En total, se implementaron dos métodos con el fin de comparar los resultados de cada uno y elegir el que mejor se adaptaba a las necesidades del trabajo. Además, en cada uno de los métodos se varió el número de zonas a construir, concretamente se realizaron selecciones de 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 zonas en total para ver cómo respondía el algoritmo y las diferentes zonas que se obtenían.

El objetivo principal de este procedimiento era estudiar la distribución espacial de lluvias en el archipiélago. En primer lugar, se tomaron todas las series temporales de cada uno de los píxeles de tierra y se aplicó un análisis de componentes principales (ACP), con el fin de reducir el número de características. A partir del resultado correspondiente, y con la ayuda de los algoritmos de *clustering*, se agruparon las regiones con series de precipitación similares en base al número de zonas estipulado. Los métodos implementados fueron el *Agglomerative clustering* y el *Spectral clustering*. En la tabla A.1, incluida en los anexos, se puede apreciar cómo responden ambos métodos para el mismo número de zonas.

Una vez obtenidas las diferentes zonas mediante cada uno de los dos métodos, se compararon con las distribuciones habituales de lluvia en el archipiélago, extraídas del Atlas climático de los archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores [1], y de las correlaciones de la lluvia entre islas del artículo de García Herrera et al. [4]. De esta forma, se buscó la selección de zonas más cercana a la realidad posible. El resultado final de todo el proceso, es el mostrado en la figura 2.4.



Figura 2.4: Zonas de lluvia en Canarias.

Una vez obtenidas las 9 zonas de lluvia, se procedió al cálculo de diversos parámetros estadísticos de la precipitación en base a los datos de precipitación de SPREAD, teniendo en cuenta la segregación por zonas de lluvia obtenidas mediante el procedimiento de *clustering*. En concreto, se calcularon:

- La media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total en el archipiélago por zona y sector para *Borrascas*.
- La media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total en el archipiélago por zona y sector para *DANAs*.
- La media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total en el archipiélago por zona y tipo para *Vaguadas*.

3. Resultados

Summary

This section presents the various results of this work. For this, the results were separated in each of the three situations chosen for a better understanding of them. For each of the situations there are three sections: spatial and temporal distribution, distribution of precipitation by sectors, and distribution of precipitation by rain zones. Due to the size of some of the tables obtained, two of them have been moved to the annexes, and a partial interpretation of the results has been made, to give a global idea of them.

3.1. Resultados para *Borrascas*

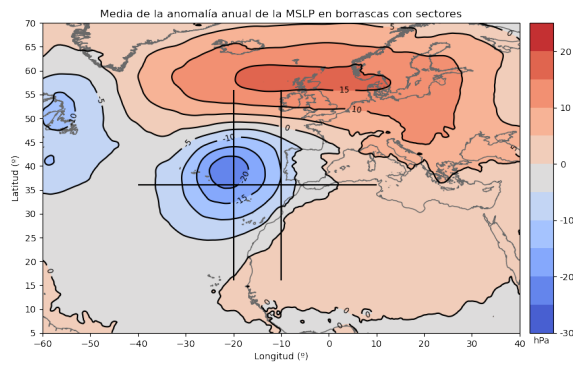
3.1.1. Distribución espacial y temporal

En la figura 3.1, se muestran las anomalías para cada uno de los sectores. Como se puede apreciar, de los 6 sectores definidos (ver figura 2.2), únicamente se encontraron casos de *Borrascas* en 5 de ellos.

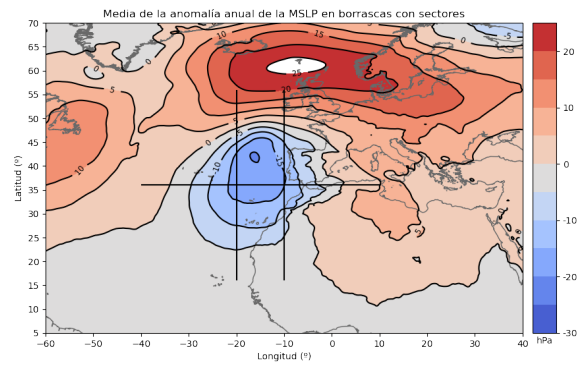
Meses	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5	Total
Enero	2	1	2	1	4	10
Febrero	0	0	0	2	1	3
Marzo	0	0	0	3	0	3
Abril	0	0	0	1	0	1
Septiembre	0	0	0	0	0	0
Octubre	0	0	0	1	0	1
Noviembre	2	1	1	2	2	8
Diciembre	6	1	0	13	2	22
Total Situaciones	10	3	3	23	9	48

Tabla 3.1: Distribución temporal de las *Borrascas*.

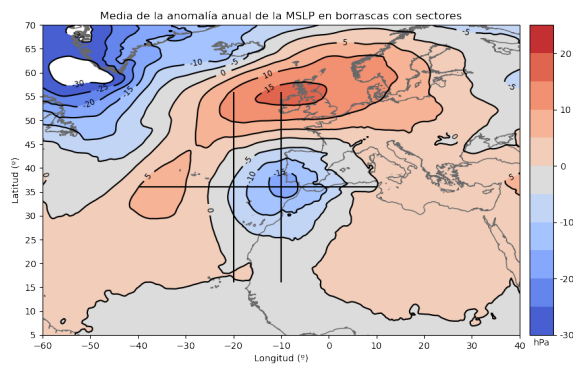
Atendiendo ahora a la distribución temporal mostrada en la tabla 3.1, podemos ver como en total, de las 149 situaciones de lluvia intensa, 48 están producidas únicamente por *Borrascas*. En general, los meses con mayor número de incidencias son diciembre y enero, con 22 y 10 casos respectivamente, y los sectores con mayor incidencia son el 4 y el 1, es decir, al oeste de las islas, con 23 y 10 situaciones registradas en cada uno. En general, la época de mayor incidencia de este tipo de situaciones tiene lugar en los últimos meses de otoño y los primeros de invierno momento en el que el retroceso del anticiclón de las Azores hacia latitudes altas, deja paso a la entrada de *Borrascas* del NW hacia las islas.



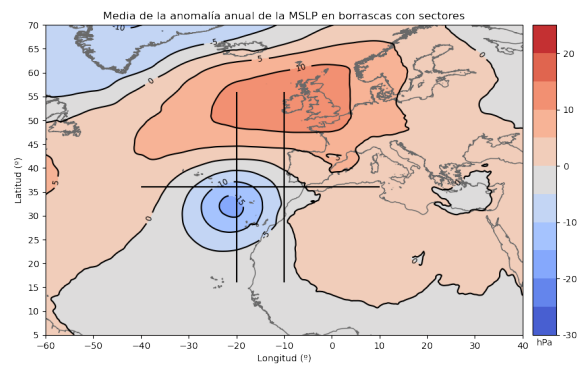
(a) Sector 1



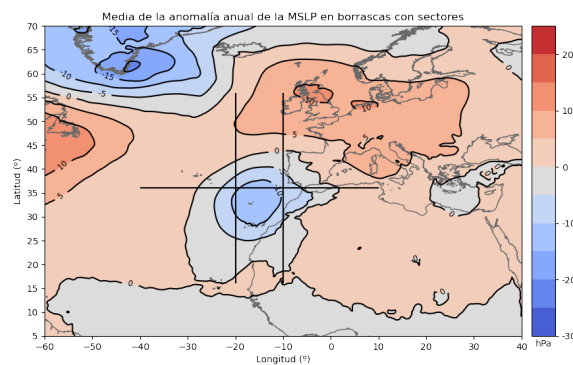
(b) Sector 2



(c) Sector 3



(d) Sector 4



(e) Sector 5

Figura 3.1: Anomalías medias de MSLP por sector en *Borrascas*.

3.1.2. Distribución de las precipitaciones por sectores



Figura 3.2: Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y sector en mm/d para *Borrascas*

En la tabla 3.2 se muestran la media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación media de todos los píxeles de tierra, atendiendo a cada uno de los sectores en los que se encuentra centrada la *Borrasca*. Se observa que la desviación estándar y la media se encuentran solapadas, siendo la primera mayor que la segunda en todos los sectores. Esto se puede entender atendiendo a los valores de la mediana y el percentil 90. Todos los valores de la mediana están por debajo de la media, lo que indica que existen algunos eventos en los que la precipitación es muy intensa. Esto se debe a que, al realizar la selección de fechas, se introdujo un sesgo en los datos, de forma que se tomaron situaciones con valores de precipitación elevados. Esto junto con la alta variabilidad de la lluvia en las islas, produce una distribución que refleja este carácter altamente variable de las precipitaciones, y el desplazamiento de la media hacia los máximos de lluvia.

Sector	Media (<i>mm/d</i>)	Desviación (<i>mm/d</i>)	Mediana (<i>mm/d</i>)	Percentil 90 (<i>mm/d</i>)
Sector 1	22.0	32.1	11.0	62.0
Sector 2	15.0	16.3	12.0	31.0
Sector 3	12.7	14.3	9.0	29.0
Sector 4	18.8	26.3	10.0	49.0
Sector 5	13.8	16.1	9.0	33.0

Tabla 3.2: Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para *Borrascas*.

En la figura 3.2 se pueden ver las medias y desviaciones de la precipitación por sector para cada uno de los píxeles de la base de datos de SPREAD. Se observa que, los patrones de lluvia varían mucho en función de la posición que tengan las *Borrascas*. Cuando estas se sitúan al oeste del archipiélago, no sólo producen precipitaciones intensas con más frecuencias, como se comentó anteriormente, sino, además, producen las precipitaciones más copiosas. Sin embargo, los valores medios tienen, en casi todos los casos, la misma distribución que la desviación estándar. Estos mapas permiten ver el patrón general de lluvias en el archipiélago, pero, a priori, no es posible dar cantidades aproximadas de precipitación debido al solapamiento entre los valores medios y la desviación típica.

3.1.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia

Los resultados del estudio por zonas obtenidas mediante el proceso de *clustering*, se incluyen en la tabla A.3 localizada en los anexos. Al igual que en el caso de la separación por sectores, se obtiene que la media y la desviación estándar están solapadas en algunos casos, siendo esta última mucho mayor que la primera. Cabe indicar que se ha desestimado el cálculo de la mediana, pues del estudio realizado por sectores se tiene que los datos de lluvia presentan una gran variabilidad. Sin embargo, sí se ha mantenido el cálculo del percentil 90 porque permite tener una idea aproximada de la intensidad de las lluvias.

Con el fin de realizar una interpretación parcial de los resultados, se ha elegido, a modo de ejemplo, el sector 1 y se ha construido la tabla 3.3. En este caso, atendiendo a la figura 3.1, podemos ver que la *Borrasca* se sitúa al NW de las islas, por lo que, en

su mayoría, los frentes vendrán en dirección SW o W. Si atendemos ahora a los valores de precipitación por zonas para el sector 1, las que más lluvia reciben, atendiendo al percentil 90, se corresponden con la 4, la 2, y la 6. En la figura 2.4 se puede ver que se corresponden con las zonas del Sur y Oeste de Tenerife, y la zona sur de Gran Canaria. Luego concuerda con la dinámica esperada de frentes, que al venir del W-SW "impactan" contra las islas de mayor relieve generando precipitaciones en las zonas W-SW de las mismas. Luego, a pesar del solapamiento entre los valores medios y las desviaciones, este estudio por zonas de precipitación sí que permite identificar los lugares de las islas que tienen una mayor tendencia a sufrir lluvias de carácter moderado a fuerte en base a la posición de la *Borrasca*.

Zona	Media (<i>mm/d</i>)	Desviación (<i>mm/d</i>)	Percentil 90 (<i>mm/d</i>)
Zona 0	27.0	32.9	70.1
Zona 1	26.8	38.1	74.0
Zona 2	31.8	33.7	81.1
Zona 3	22.5	41.1	61.2
Zona 4	27.5	44.2	100.0
Zona 5	17.5	19.7	46.0
Zona 6	26.0	32.7	87.2
Zona 7	18.1	29.0	40.0
Zona 8	12.7	12.4	31.0

Tabla 3.3: Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el sector 1 con separación de los datos por zonas de lluvia para *Borrascas*.

3.2. Resultados para *DANAs*

3.2.1. Distribución espacial y temporal

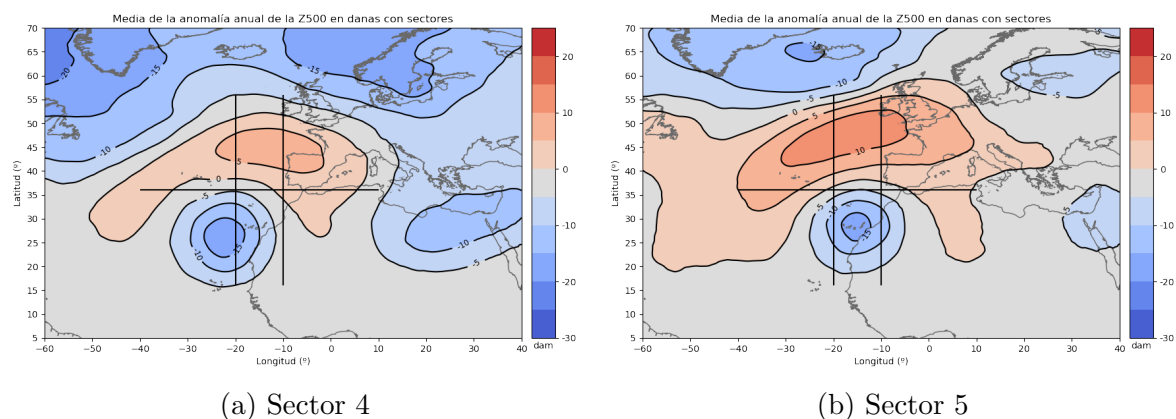


Figura 3.3: Anomalías medias de Z500 por sector en *DANAs*.

Meses	Sector 4	Sector 5	Total
Enero	2	1	3
Febrero	4	2	6
Marzo	1	1	2
Abril	2	0	2
Septiembre	0	1	1
Octubre	0	1	1
Noviembre	0	0	0
Diciembre	0	1	1
Total Situaciones	9	7	16

Tabla 3.4: Distribución temporal de las *DANAs*.

Las *DANAs*, en general, son los patrones sinópticos que menor presencia tienen en las islas como se puede apreciar en la tabla 3.4, y en las anomalías de la figura 3.3. De los 149 casos sólo 16 corresponden a este tipo de situaciones y de estos, sólo se encontraron casos en 2 de los 6 sectores definidos (ver figura 2.2). En general, no existe demasiada diferencia entre casos por sectores, sin embargo, sí que existe una clara tendencia en los últimos meses de invierno y los primeros de primavera. Cabe indicar que, en general, las *DANAs* de por sí no producen lluvias fuertes; es necesario que exista una capa de aire relativamente cálido y húmedo que entre en contacto con su núcleo de aire frío, para que se produzca desarrollo vertical y con este, lluvias importantes. Esta razón podría ser la causante del bajo número de casos registrados en este estudio.

3.2.2. Distribución de las precipitaciones por sectores

Al igual que con las *Borrascas*, para las *DANAs* se tiene la tabla 3.5, donde se muestran los resultados del cálculo de la media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación media de todos los píxeles de tierra por sector. Vuelve a repetirse también el solapamiento entre la media y la desviación estándar, hecho que, como ya se vio en los resultados para *Borrascas*, tiene relación con la forma de elegir las situaciones con las que se está trabajando.

Sector	Media	Desviación (mm/d)	Mediana (mm/d)	Percentil 90 (mm/d)
Sector 4	17.6	26.0	8.0	47.0
Sector 5	13.6	17.6	8.0	35.0

Tabla 3.5: Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para *DANAs*.

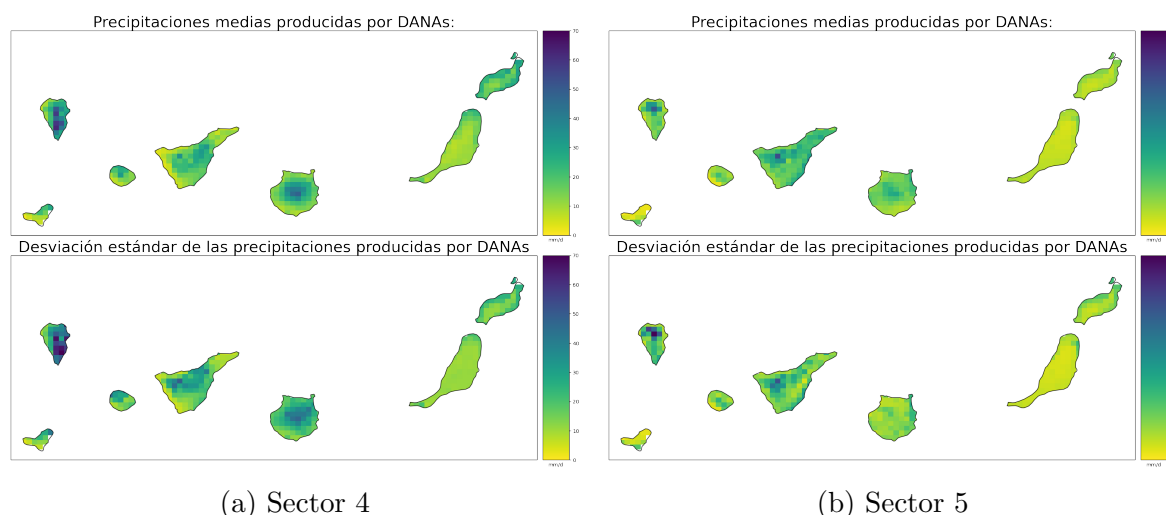


Figura 3.4: Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y sector en mm/d para *DANAs*.

Atendiendo ahora a la figura 3.4, donde se representan la media y la desviación estándar por píxel de precipitación de los datos de SPREAD, se puede comprobar como, a diferencia de las *Borrascas*, las *DANAs* tienen un patrón de lluvias mucho más uniforme sobre el archipiélago. Además, hay que recalcar la intensidad de las precipitaciones medias en la costa SE de la Palma en el Sector 4. Estas cantidades de lluvia podrían ser un indicador del fenómeno conocido por los autóctonos como “*Tiempo Herreño*” [12]. Este tipo de fenómeno se caracteriza por la presencia de un viento superficial de componente S (de ahí la denominación) que, al encontrarse con la isla, produce un alto desarrollo convectivo en la zona SE del macizo central de *Cumbre Vieja*. Esto se debe a que el aire húmedo procedente del mar, en su desplazamiento, es obligado a ascender por la orografía de la isla. En el caso de una *DANA*, este aire marítimo podría estar chocando con la bolsa de aire frío en su ascenso, produciendo esas fuertes precipitaciones reflejadas en la figura 3.4a.

3.2.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia

La última parte del estudio de los casos de *DANAs*, es la segregación de los datos de precipitación por zonas de lluvia obtenidas mediante el procedimiento de *clustering*. En la tabla 3.6 se pueden ver los valores obtenidos para la media, la desviación estándar y el percentil 90 por sector y zona. Si observamos, de forma general, los valores del percentil por zonas de lluvia y sectores, vemos que para ambos sectores las zonas con mayor valor del percentil se corresponden, en general, a las islas con mayor relieve, la Palma, Tenerife, y Gran Canaria (Zonas 0, 2, 3, 4, 5, y 6 atendiendo a la figura 2.4). Se obtiene también que, para el sector 4, el valor del percentil 90 en la zona 8 (Lanzarote y la zona norte de Fuerteventura), tiene un valor mucho mayor que el de varias de las islas de mayor relieve. Esto puede deberse a episodios de gran inestabilidad que, generalmente, son los que dan lugar a grandes precipitaciones en las islas orientales [3]. A pesar de esto, se puede apreciar un patrón de precipitaciones más abundantes en las islas de mayor relieve en el caso de las *DANAs*. Una posible explicación sería el ascenso de masas de aire húmedo debido al factor orográfico, que al entrar en contacto con las capas más frías en altura, generan desarrollo convectivo y, con ello, precipitaciones.

	Zona	Media (mm/d)	Desviación (mm/d)	Percentil 90 (mm/d)
Sector 4	Zona 0	30.6	46.8	94.0
	Zona 1	16.9	31.6	42.3
	Zona 2	13.8	21.4	37.0
	Zona 3	14.5	24.6	40.1
	Zona 4	20.3	22.0	55.0
	Zona 5	20.7	29.7	61.3
	Zona 6	12.2	17.8	36.3
	Zona 7	11.2	11.3	29.0
	Zona 8	22.6	20.8	54.0
Sector 5	Zona 0	17.2	29.4	47.6
	Zona 1	8.6	13.5	23.0
	Zona 2	16.2	16.3	35.0
	Zona 3	21.8	22.0	47.1
	Zona 4	23.4	21.1	52.0
	Zona 5	17.1	15.2	37.7
	Zona 6	11.6	13.6	33.7
	Zona 7	6.7	5.7	15.0
	Zona 8	10.5	14.3	28.4

Tabla 3.6: Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por sectores y zonas para *DANAs*.

3.3. Resultados para *Vaguadas*

3.3.1. Distribución espacial y temporal

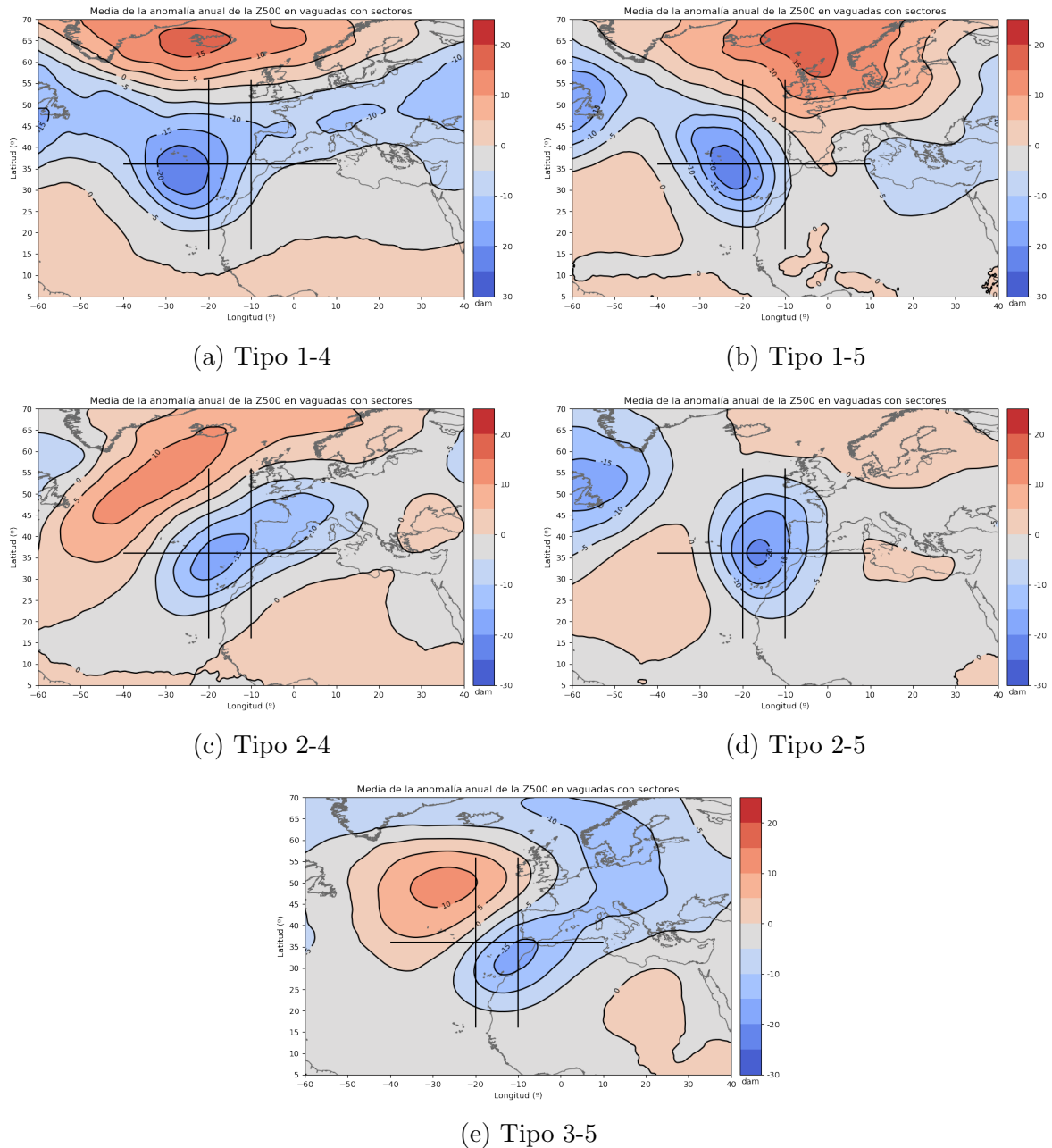


Figura 3.5: Anomalías medias de Z500 por tipos para *Vaguadas*.

Al igual que para el resto de situaciones, en la figura 3.5, se muestran las anomalías para cada tipo de *Vaguada*. En este caso, el método de elección mostrado en el apartado 2.5.2 dio lugar a 5 tipos de patrones que quedan caracterizados por sus anomalías.

Meses	Tipo 1-4	Tipo 1-5	Tipo 2-4	Tipo 2-5	Tipo 3-5	Total
Enero	2	1	0	5	10	18
Febrero	2	1	2	1	4	10
Marzo	0	1	4	2	4	11
Abril	0	1	1	0	0	2
Septiembre	0	0	0	1	0	1
Octubre	0	1	3	0	1	5
Noviembre	2	0	4	6	5	17
Diciembre	2	3	1	7	8	21
Total Situaciones	8	8	15	22	32	85

Tabla 3.7: Distribución temporal de las *Vaguadas*.

En la tabla 3.7 se puede observar la distribución temporal de las *Vaguadas* en base a su tipo. Se trata del patrón sinóptico con mayor presencia de los estudiados, con un total de 79 casos registrados. Se observa que los tipos con mayor incidencia son el 3-5 y el 2-5, seguidos por el 2-4, y finalmente los tipos 1-4 y 1-5, con el mismo número de casos cada uno. Atendiendo a la distribución por meses, noviembre, diciembre, y enero son los meses con mayor número de casos registrados aunque, en general, las fechas de mayor incidencia de *Vaguadas* se encuentran comprendidas entre los meses de otoño e invierno.

3.3.2. Distribución de las precipitaciones por sectores

Tipo	Media (mm/d)	Desviación (mm/d)	Mediana (mm/d)	Percentil 90 (mm/d)
Tipo 1-4	25.4	34.4	15.0	66.0
Tipo 1-5	23.1	33.6	12.0	56.0
Tipo 2-4	17.9	27.3	9.0	46.6
Tipo 2-5	17.0	24.2	10.0	42.0
Tipo 3-5	16.8	28.0	9.0	40.0

Tabla 3.8: Media, desviación estándar, mediana y percentil 90 para la precipitación total por sectores para *Vaguadas*.

Al igual que para el resto de situaciones, la forma de elegir los datos de precipitación induce un sesgo que aparece claramente representado en los parámetros estadísticos. Como puede observarse, tanto en la tabla 3.8, en los mapas de media y desviación estándar de la precipitación de la figura 3.6, los valores de la media y desviación estándar se encuentran solapados. Esto repercute en que no se puedan dar valores aproximados de la precipitación por tipos. Aun así, en base al percentil 90, sí que se pueden extraer los tipos de *Vaguada* que producen los máximos de precipitación. Por ejemplo, de la tabla 3.8, se puede comprobar cómo los casos que mayor precipitación generan, son el 1-4 y el 1-5. Luego, en general, los tipos de *Vaguadas* con menor incidencia, son los que mayores lluvias producen en las islas.

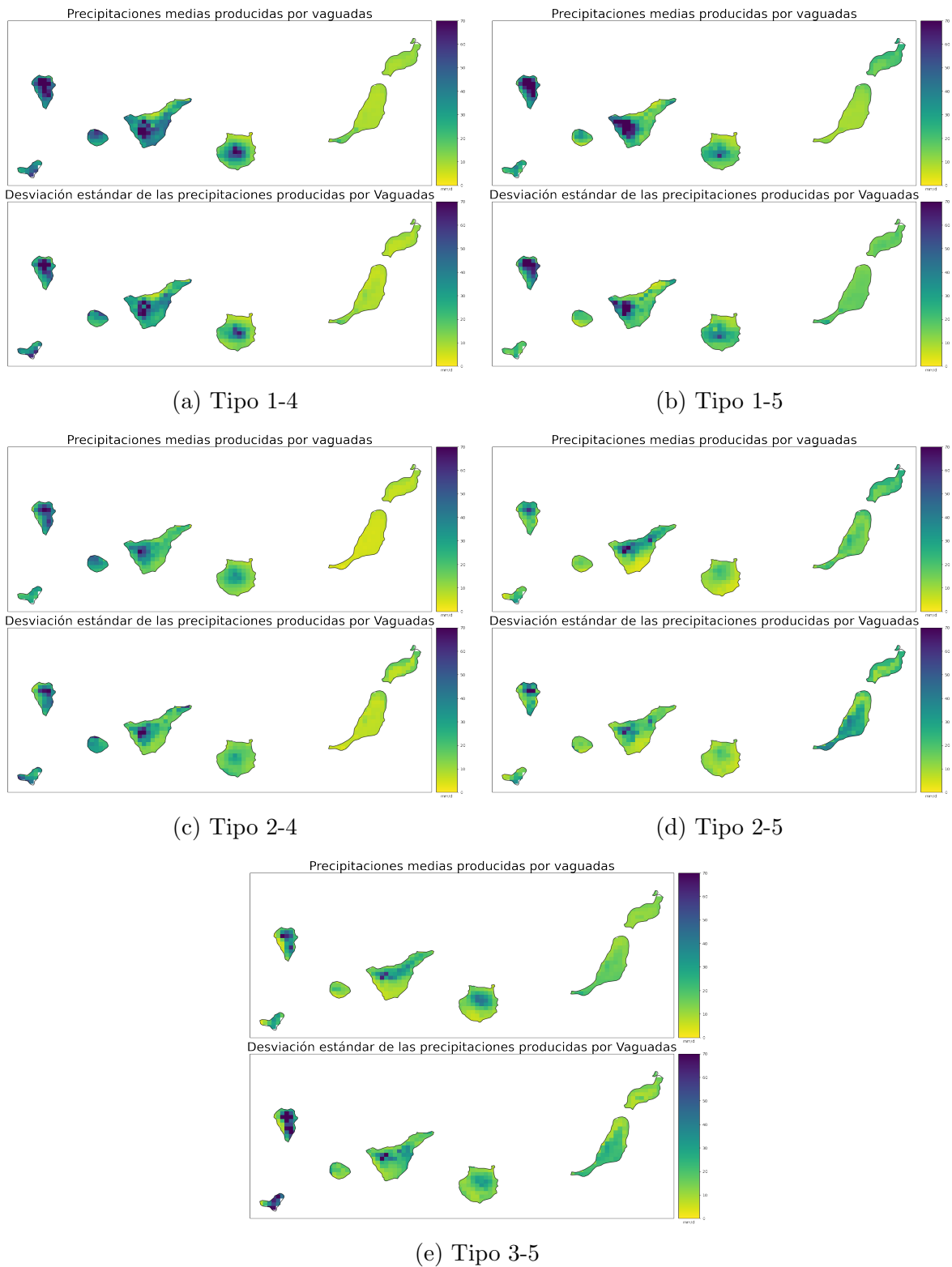


Figura 3.6: Media y desviación estándar de la precipitación por píxel y tipo en mm/d para *Vaguadas*.

Atendiendo ahora a la figura 3.6, podemos comprobar los patrones de lluvia en base a los tipos de *Vaguadas*. Por ejemplo, se puede apreciar claramente cómo la inclinación y posición de estas repercute en la distribución de lluvia en las islas. Así pues, las *Vaguadas* más cercanas a las islas occidentales dejan lluvias en la Palma, la Gomera, el Hierro, Tenerife, y Gran Canaria, mientras que conforme nos vamos a tipos donde el eje de estas está más próximo a las occidentales, las cantidades de lluvia aumentan significativamente en Lanzarote y Fuerteventura.

3.3.3. Distribución de la precipitación por zonas de lluvia

Los resultados completos del estudio por zonas de lluvia y tipos para *Vaguadas* se encuentran en la tabla A.4, ubicada en los anexos. Dada la cantidad de valores obtenidos por zonas y tipos, se ha realizado, a modo de ejemplo, la interpretación de los casos de *Vaguadas* ya discutidos en los apartados anteriores. Así pues, se construyeron las tablas 3.9 y 3.10 para este propósito.

Zona	Media (<i>mm/d</i>)	Desviacion (<i>mm/d</i>)	Percentil 90 (<i>mm/d</i>)
Zona 0	53.7	51.4	125.9
Zona 1	36.0	38.3	88.0
Zona 2	42.3	41.1	91.0
Zona 3	26.5	43.4	73.0
Zona 4	41.7	33.7	89.7
Zona 5	18.9	26.9	48.0
Zona 6	19.0	16.4	43.0
Zona 7	9.6	9.7	24.0
Zona 8	10.7	9.5	25.0

Tabla 3.9: Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el tipo 1-4 de *Vaguadas* con separación de los datos por zonas de lluvia.

Zona	Media (<i>mm/d</i>)	Desviacion (<i>mm/d</i>)	Percentil 90 (<i>mm/d</i>)
Zona 0	22.0	33.6	49.3
Zona 1	15.1	25.7	37.0
Zona 2	12.8	17.8	32.0
Zona 3	29.0	28.9	61.1
Zona 4	10.2	14.9	30.0
Zona 5	12.4	13.3	29.0
Zona 6	8.1	12.3	27.0
Zona 7	15.6	27.5	48.0
Zona 8	21.2	21.0	48.0

Tabla 3.10: Media, desviación estándar y percentil 90 de la precipitación total para el tipo 2-5 de *Vaguadas* con separación de los datos por zonas de lluvia.

En el apartado anterior, se comprobó en base a los tipos de *Vaguadas* cómo las precipitaciones varían con la posición de estas, de tal forma que, conforme nos desplazamos de este a oeste en los tipos, se reducen las precipitaciones en las islas occidentales y aumentan en las orientales. Así mismo, también se observó que los tipos con menor incidencia, son los que dejan lluvias más intensas en el archipiélago. A continuación se analiza, cómo se traducen estas dinámicas a las zonas de lluvia, empezando por el cambio en el patrón de lluvias en base al tipo de *Vaguada*.

Atendiendo a la tabla 3.9 y la figura 2.4 vemos que para el tipo 1-4, los valores del percentil 90 en general, aumentan de este a oeste de las islas, dándose las lluvias de mayor intensidad en la Palma (Zona 0) con un valor de 125,9 *mm/d* y las de menor en gran parte de la islas de Fuerteventura (Zona 7) con 24 *mm/d*. Esta situación se corresponde de media con la mostrada en la figura 3.5a, es decir, con las *Vaguadas* situadas más al oeste de las Islas Canarias. Si se observa la tabla 3.10, esta tendencia de reducción de la intensidad de la lluvia de oeste a este desaparece, siendo la zona con mayor intensidad la 3, correspondiente al Norte de Tenerife. Además, puede verse que los valores del percentil 90 en las islas occidentales aumentan de 24 *mm/d* y 25 *mm/d* a 48 *mm/d* en Lanzarote y Fuerteventura, respectivamente. Si se consideran ahora las anomalías de las *Vaguadas*, vemos que esta situación se corresponde con la mostrada en la figura 3.5d, donde las *Vaguadas* se sitúan de media sobre el centro del archipiélago.

Comparando los valores entre zonas de las tablas 3.9 y 3.10, se puede ver que esa diferencia de intensidades de lluvia, entre los tipos menos frecuentes y los más frecuentes, queda reflejada en los datos. En general, con la ayuda de la figura 2.4, se puede apreciar como todas las islas, salvo Lanzarote y Fuerteventura, ven reducido el percentil 90 de la precipitación total al pasar del tipo 1-4 al tipo 2-5, es decir, del menos frecuente al más frecuente (ver tabla 3.7). Esta reducción, como se vio anteriormente, queda reflejada en los valores medios y el percentil 90 de la precipitación total por sectores incluidos en la 3.8.

4. Conclusiones

Summary

In this last section, a review of the results is discussed based on the objectives set for this study. Then, a summary of the work is done, and some ideas are discussed to continue with it, and to improve the results obtained.

4.1. Resultados generales

De los 149 casos totales, extraídos de la separación entre los tres tipos de patrones sinópticos seleccionados, se tiene que 85 pertenecen a *Vaguadas*, 48 a *Borrascas* y 16 a *DANAs*. Además de esto, en general, todos los patrones sinópticos presentan su mayor rango de incidencia sobre el archipiélago durante los meses de Invierno y no se tiene ninguno en los meses de abril a septiembre. En el caso de las *DANAs* los tipos detectados se extienden mucho más, llegando a detectarse casos en casi todos los meses excepto noviembre y el intervalo de abril a septiembre como ya se indicó. Por tanto, la distribución temporal de lluvias coincide con la mostrada por Font Tullot [2] y el Atlas climático de los archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores [1].

Si se considera la distribución espacial, se tiene que:

- ***Borrascas***: En este caso, el mayor número de detecciones se tuvo en el sector 4, al oeste del archipiélago (ver figura 3.1), dado que la gran mayoría de situaciones de este tipo provienen del Atlántico desde el W-NW.
- ***DANAs***: El sector con mayor número de detecciones se corresponde con el 4 (ver figura 3.3), es decir, con una depresión en altura situada al W de las Islas Canarias.
- ***Vaguadas***: En este caso, el tipo de *Vaguada* (ver figura 3.5) con mayor incidencia se corresponde con el 3-5, es decir, este tipo de patrón sinóptico tiende a afectar más al archipiélago cuando su eje se extiende desde de la Península hasta las islas, con dirección NE-SW.

Con todo esto podemos concluir que, tanto las *Borrascas* como las *DANAs* que producen lluvias intensas suelen posicionarse al W de las islas, mientras que las *Vaguadas* tienden a afectar al archipiélago desde el cuadrante NE.

Como ya se mostró anteriormente, debido al método de selección de fechas, se introdujo un sesgo en los datos que produjo el solapamiento de la media y la desviación estándar de las distribuciones de precipitación. Debido a esto, no es posible hacer predicciones de cantidades de lluvia media por zonas, pero sí es posible obtener una visión parcial de la intensidad de estas y su distribución espacial, atendiendo al percentil

90 y los mapas de precipitación por sectores y tipos. Por lo tanto, en general, las zonas más afectadas por las lluvias fuertes (ver figura 2.4) se corresponden con las islas Occidentales, siendo dentro de este conjunto, aquellas con mayor relieve las que registran las precipitaciones más intensas. Al igual que en el caso de las distribuciones temporales de las precipitaciones, esto se encuentra en concordancia con la bibliografía consultada para Canarias.

Respecto a la intensidad de las lluvias por tipos de patrón sinóptico, se tiene que las *DANAs* son las que menos precipitaciones registran y con menor intensidad, mientras que las *Borrascas* y *Vaguadas* son las que mayor intensidad presentan, con valores globales muy similares entre ambas. Así pues, los mayores picos de intensidad registrados, se dan en la Palma para *Vaguadas*, y en el Sur de Tenerife para *Borrascas*.

4.2. Conclusiones finales

En general, este estudio ha sido capaz de dar cuenta de las distribuciones espaciales y temporales de las lluvias intensas en Canarias, así como de sus principales causas. Además, hay que recalcar que, de los 155 casos, sólo 6 de ellos no pudieron ser clasificados en base a los tipos de patrones sinópticos elegidos. Esto pone en evidencia que, al menos para este tipo de lluvias, la selección en base a *Borrascas*, *DANAs* y *Vaguadas*, permite dar una idea general de las causas sinópticas de las lluvias fuertes en la Islas Canarias. Sin embargo, a la hora de obtener las cantidades medias de lluvia con vistas a realizar una predicción de estas en base a cada tipo de situación, el método empleado no presenta una buena línea de trabajo, debido a la forma de seleccionar los datos de “lluvias fuertes”.

Atendiendo a planes de trabajo futuros, se podría mejorar el método de selección de fechas intentando sesgar lo menos posible los datos, o trabajar con otras distribuciones estadísticas que se ajusten mejor a los valores extraídos de la selección. Además de esto, sería interesante incluir una variable asociada a los frentes, e identificar los patrones de lluvia en base a su tipo, su origen y su movimiento a lo largo del archipiélago. Finalmente, el análisis manual de las situaciones realizado podría usarse como método para contrastar procedimientos automáticos, en vistas a realizar un programa que sea capaz de identificar situaciones sinópticas en base a datos de reanálisis.

5. Bibliografía

- [1] Agencia Estatal de Meteorología (España) and Instituto de Meteorología (Portugal). Atlas climático de los archipiélagos de Canarias, Madeira y Azores. Agencia Estatal de Meteorología, 2012. doi: 10.31978/281-12-006-X. URL http://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/segundoAtlasclimatologic.
- [2] Inocencio Font Tullot. El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. 1956. URL <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9616>.
- [3] Inocencio Font Tullot. El clima de las Islas Canarias. Anuario de estudios atlánticos N^o5, pages 57–103, 1959. ISSN 0570-4065. URL https://mdc.ulpgc.es/digital/document/content/aea_1313.
- [4] Ricardo García Herrera, David Gallego Puyol, Emiliano Hernández Martín, Luis Gimeno Presa, and Pedro Ribera Rodríguez. Influence of the North Atlantic Oscillation on the Canary Islands Precipitation. Journal of Climate, 14(19):3889–3903, October 2001. ISSN 0894-8755, 1520-0442. doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<3889:IOTNAO>2.0.CO;2. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3889:IOTNAO>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0442(2001)014<3889:IOTNAO>2.0.CO;2).
- [5] Roberto Serrano Notivoli, Martín De Luis, Santiago Beguería, and Miguel Ángel Saz. SPREAD (Spanish PREcipitation At Daily scale), December 2016. URL <https://digital.csic.es/handle/10261/141218>. Type: dataset.
- [6] netCDF4 API documentation, . URL <https://unidata.github.io/netcdf4-python/>.
- [7] Hans Hersbach, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dinand Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Gionata Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna De Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leo Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elías Hólm, Marta Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Philippe Lopez, Cristina Lupu, Gabor Radnoti, Patricia de Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume, and Jean-Noël Thépaut. The era5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730):1999–2049, 2020. doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>. URL <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.3803>.
- [8] Cartopy Documentation-Cartopy 0.15.0 documentation, . URL <https://scitools.org.uk/cartopy/docs/v0.15/index.html>.
- [9] Matplotlib documentation — Matplotlib 3.5.2 documentation, . URL <https://matplotlib.org/stable/index.html>.

- [10] Instituto Central Meteorológico (España). Boletín meteorológico diario (1893-2007). 1893. URL <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/6290>.
- [11] 2.3. Clustering, . URL <https://scikit-learn/stable/modules/clustering.html>.
- [12] Fernando Bullón Miró. Situaciones del sur en La Palma: "El tiempo herreño". 2003. URL <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/6766>.

Anexos

A. Anexo I: Figuras y Tablas

A.1. Figuras y Tablas de la Metodología

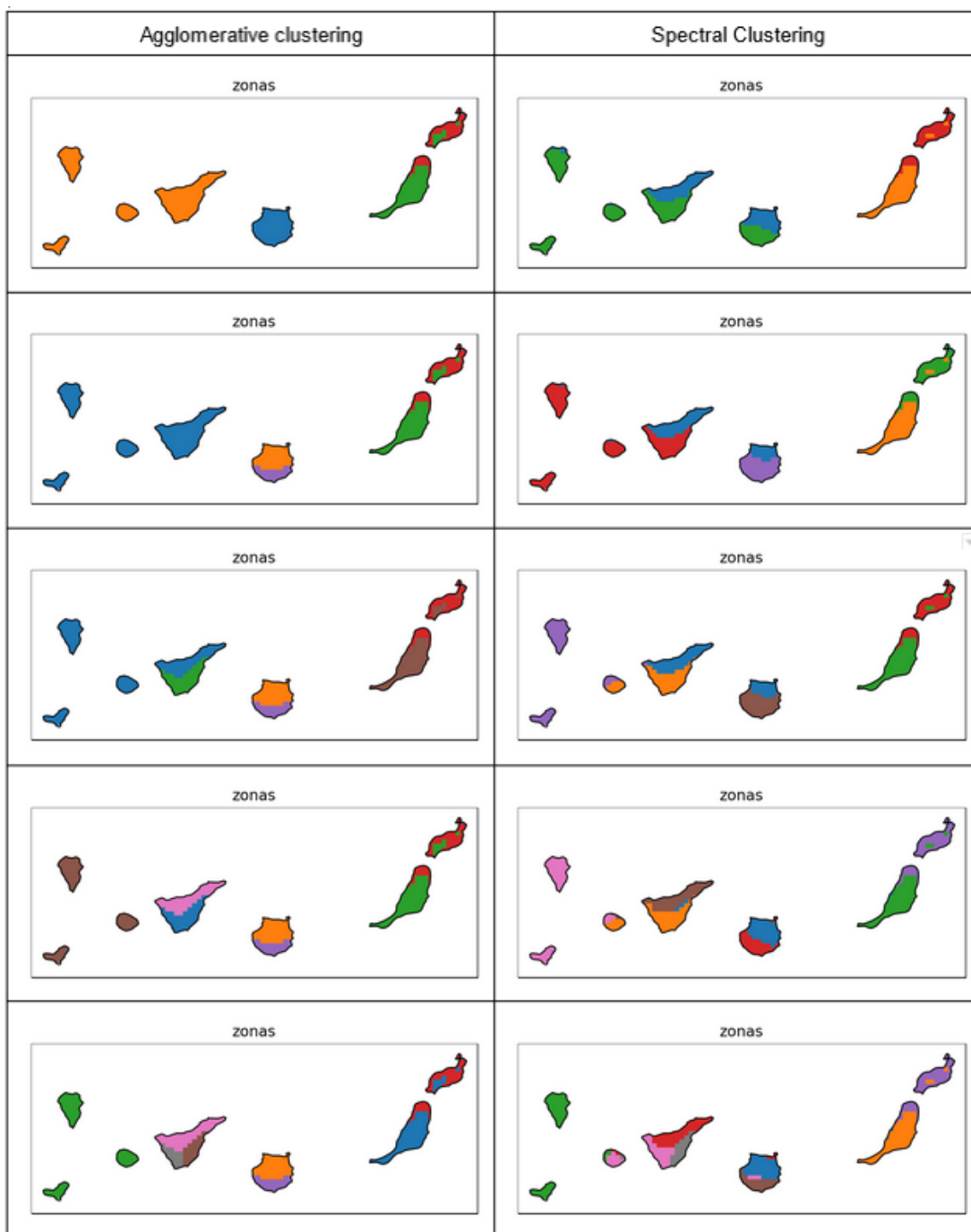


Tabla A.1: Diferencias entre métodos de clusterización para el mismo número de zonas.

Día	Mes	Año	Frente Frío	Frente Cálido	B(Sup)	Lon	Lat	B(500hPa)	Lon	Lat	Dana	Borrasca	Vaguada	Max Precipitación (mm/d)	Max Precipitación (Isla)
1980	1	7	1	0	1	-18	30	0	0	0	0	0	1	100	La Palma
1980	1	25	1	0	1	-20	35	1	-21	35	0	0	1	160	La Palma
1980	1	26	0	0	1	-20	35	0	0	0	0	0	1	120	Tenerife
1980	3	15	0	0	1	-30	27	1	-22	30	0	0	1	160	Tenerife
1980	3	16	1	0	1	-15	35	1	-20	40	0	0	1	300	Tenerife
1980	11	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300	La Palma
1980	12	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	50	Fuerteventura
1981	2	14	0	0	1	-18	35	1	-18	35	0	1	0	160	La Palma
1981	10	22	1	0	1	-20	30	1	-20	30	0	1	0	160	La Gomera
1982	1	12	0	0	1	-10	38	1	-10	38	0	1	0	80	La Palma
1982	2	6	1	0	1	-20	30	1	-20	30	0	1	1	350	Tenerife
1982	3	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120	Gran Canaria
1982	3	28	1	0	1	-20	35	1	-20	35	0	0	1	200	Tenerife
1982	4	21	0	0	1	-25	30	1	-20	30	0	1	0	100	Tenerife
1983	11	4	1	0	1	-15	37	1	-17	35	0	0	1	100	Tenerife
1983	11	8	1	0	1	-17	40	1	-20	40	0	0	1	60	La Palma
1983	11	13	1	0	1	-20	40	1	-25	40	0	1	0	80	La Palma
1983	11	19	1	0	1	-25	36	1	-25	35	0	1	0	175	Tenerife
1984	1	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300	Tenerife
1984	3	18	1	0	1	-22	35	1	-20	35	0	0	1	80	Tenerife
1984	9	20	0	0	0	0	0	1	-15	30	1	0	0	80	Tenerife
1984	12	8	1	0	1	-20	37	1	-20	35	0	1	0	140	Gran Canaria
1984	12	9	1	0	1	-25	33	1	-20	35	0	1	0	100	Gran Canaria
1984	12	14	1	0	1	-20	35	1	-20	35	0	1	0	100	Tenerife
1984	12	15	1	0	1	-15	33	1	-17	30	0	1	0	140	Tenerife
1985	1	22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	80	Tenerife
1985	12	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120	Tenerife
1986	1	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120	Tenerife
1986	1	28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	140	La Palma
1986	2	27	1	0	1	-18	35	0	0	0	0	0	1	400	La Palma
1986	4	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	200	La Palma
1987	3	17	0	0	1	-15	32	0	-15	32	0	0	1	50	Fuerteventura
1987	3	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	70	La Palma
1987	9	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	120	La Palma
1987	10	23	0	0	1	-15	40	1	-17	43	0	0	1	250	La Gomera
1987	11	1	1	0	1	-20	33	1	-20	33	0	1	0	120	Tenerife

Tabla A.2: Tabla de caracterización de situaciones.

A.2. Tablas de Resultados

	Zona	Media (mm/d)	Desviación (mm/d)	Percentil 90 (mm/d)
Sector 1	Zona 0	27.0	32.9	70.1
	Zona 1	26.8	38.1	74.0
	Zona 2	31.8	33.7	81.1
	Zona 3	22.5	41.1	61.2
	Zona 4	27.5	44.2	100.0
	Zona 5	17.5	19.7	46.0
	Zona 6	26.0	32.7	87.2
	Zona 7	18.1	29.0	40.0
	Zona 8	12.7	12.4	31.0
Sector 2	Zona 0	10.7	11.4	28.0
	Zona 1	15.3	18.6	35.0
	Zona 2	12.8	14.4	30.5
	Zona 3	27.6	28.7	69.1
	Zona 4	6.6	10.8	17.7
	Zona 5	10.6	12.4	27.0
	Zona 6	12.3	10.5	26.0
	Zona 7	14.6	12.2	28.7
	Zona 8	16.9	8.0	28.0
Sector 3	Zona 0	17.2	21.3	48.5
	Zona 1	9.5	13.2	23.0
	Zona 2	7.0	9.2	22.0
	Zona 3	33.0	19.9	56.0
	Zona 4	9.2	11.0	23.0
	Zona 5	8.8	7.9	21.5
	Zona 6	1.0	2.0	4.0
	Zona 7	12.5	5.2	17.7
	Zona 8	11.0	5.8	20.0
Sector 4	Zona 0	36.1	36.3	78.9
	Zona 1	23.7	25.7	52.0
	Zona 2	35.8	31.9	71.5
	Zona 3	20.5	33.8	52.1
	Zona 4	24.9	25.2	52.0
	Zona 5	12.9	19.1	35.0
	Zona 6	15.2	18.1	43.0
	Zona 7	11.1	17.7	40.0
	Zona 8	7.1	11.2	19.0
Sector 5	Zona 0	21.2	24.4	45.0
	Zona 1	13.3	16.1	32.0
	Zona 2	10.8	12.3	28.0
	Zona 3	20.3	18.3	42.1
	Zona 4	8.2	9.4	22.9
	Zona 5	8.0	10.9	22.0
	Zona 6	11.9	14.4	29.0
	Zona 7	12.9	11.6	28.9
	Zona 8	15.1	18.0	39.2

Tabla A.3: Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por sectores y zonas para *Borrascas*.

	Zona	Media (mm/d)	Desviación (mm/d)	Percentil 90 (mm/d)
Tipo 1-4	Zona 0	53.7	51.4	125.9
	Zona 1	36.0	38.3	88.0
	Zona 2	42.3	41.1	91.0
	Zona 3	26.5	43.4	73.0
	Zona 4	41.7	33.7	89.7
	Zona 5	18.9	26.9	48.0
	Zona 6	19.0	16.4	43.0
	Zona 7	9.6	9.7	24.0
	Zona 8	10.7	9.5	25.0
Tipo 1-5	Zona 0	51.1	60.3	125.9
	Zona 1	21.1	20.5	52.0
	Zona 2	42.0	48.1	97.5
	Zona 3	28.4	44.0	67.0
	Zona 4	20.1	21.1	52.7
	Zona 5	15.1	20.2	41.0
	Zona 6	18.0	20.9	50.0
	Zona 7	10.1	17.3	48.7
	Zona 8	19.0	15.8	49.0
Tipo 2-4	Zona 0	39.0	39.8	92.0
	Zona 1	29.6	40.0	70.1
	Zona 2	25.0	25.4	54.1
	Zona 3	23.9	33.6	56.1
	Zona 4	18.7	17.8	42.0
	Zona 5	15.9	17.7	43.0
	Zona 6	13.4	18.8	37.0
	Zona 7	4.8	7.1	15.0
	Zona 8	8.2	14.0	24.0
Tipo 2-5	Zona 0	22.0	33.6	49.3
	Zona 1	15.1	25.7	37.0
	Zona 2	12.8	17.8	32.0
	Zona 3	29.0	28.9	61.1
	Zona 4	10.2	14.9	30.0
	Zona 5	12.4	13.3	29.0
	Zona 6	8.1	12.3	27.0
	Zona 7	15.6	27.5	48.0
	Zona 8	21.2	21.0	48.0
Tipo 3-5	Zona 0	27.5	59.4	67.0
	Zona 1	15.7	34.2	39.0
	Zona 2	12.0	16.2	33.7
	Zona 3	23.7	29.6	52.0
	Zona 4	14.4	24.9	41.0
	Zona 5	21.2	22.2	48.7
	Zona 6	9.3	14.9	29.0
	Zona 7	16.2	20.7	35.0
	Zona 8	12.5	12.9	32.0

Tabla A.4: Media, desviación estándar y percentil 90 para la precipitación total por tipos y zonas para *Vaguadas*.