

TRABAJO FIN DE MÁSTER · UNIVERSIDAD DE ALICANTE · JULIO DE 2026

Cambios en los patrones atmosféricos en el contexto de las DANAs y el cambio climático a partir del ERA5

Periodo de estudio · 1940-2025

Gabriel Bernabé García

Tutor: Dr. Juan Javier Miró Pérez

Máster Universitario en Planificación y Gestión de Riesgos Naturales



Índice de la presentación

01

Introducción

02

Objetivos e Hipótesis de Trabajo

03

Metodología

04

Resultados y Discusión

4.1 Patrones atmosféricos de los geopotenciales

4.2 Tendencias en los geopotenciales

4.3 Patrones atmosféricos de TCWV y VIMD

4.4 Tendencias en TCWV y VIMD

4.5 Correspondencia geopotencial frente al TCWV

4.6 Origen de las masas de aire: *HYSPLIT*

4.7 Discusión final de síntesis

05

Conclusiones y Recomendaciones

06

Bibliografía y Fuentes Documentales Consultadas

01

1. Introducción

Contexto, problema de investigación y área de estudio

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

Introducción: planteamiento del problema

Las DANAs son depresiones aisladas en niveles altos ligadas al aislamiento dinámico respecto a la circulación general del oeste (Martín León, 2003; Nieto et al., 2005).

En la Península Ibérica, sus impactos más severos se concentran especialmente en la vertiente mediterránea y Baleares (Llasat et al., 2021; Gil-Guirado et al., 2022).

El calentamiento mediterráneo y el aumento del vapor de agua pueden amplificar episodios extremos, aunque no garantizan por sí solos precipitación torrencial (Pastor et al., 2020; Olcina Cantos, 2021; Campos et al., 2025).

Por ello, este TFM no se limita a contar DANAs, sino que analiza el contexto atmosférico que puede favorecer su desarrollo o intensificación.

Área de estudio y periodo



Dominio: 25°N-50°N / 30°W-15°E.
Periodo de análisis: 1940-2025.
Base de datos: reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2020).

El dominio permite estudiar la conexión entre el Atlántico oriental, la Península Ibérica, el norte de África y el Mediterráneo occidental.

Figura 1: Mapa de localización y contexto geográfico del área de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

02

2. Objetivos e Hipótesis de Trabajo

Objetivo general, objetivos específicos e hipótesis

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

Objetivo general y objetivos específicos

OBJETIVO GENERAL

Analizar la evolución temporal de los patrones atmosféricos dominantes asociados a DANAs en el sector atlántico-mediterráneo occidental durante 1940-2025, cuantificando cambios en circulación y humedad en el contexto del calentamiento global, y valorando sus implicaciones para futuras DANAs que puedan afectar a España.

OE1

Identificar y clasificar patrones dominantes de Z500, Z700, Z1000, TCWV y VIMD mediante agrupamiento no supervisado con datos ERA5.

OE2

Analizar tendencias anuales y estacionales de cada patrón mediante Mann-Kendall y pendiente de Sen.

OE3

Examinar correspondencias entre geopotenciales y TCWV para detectar configuraciones con mayor disponibilidad de humedad.

OE4

Determinar con *HYSPLIT* la procedencia de masas de aire asociadas a TCWV de alta correspondencia o tendencia positiva.

OE5

Evaluar tasas de cambio anual y estacional como indicador de evolución de condiciones favorables a DANAs intensas.

OE6

Proponer líneas futuras sobre cambio climático, frecuencia, intensidad y comportamiento de DANAs mediterráneas.

Hipótesis de trabajo

H1

Los patrones asociados a vaguadas y DANAs han experimentado cambios significativos de frecuencia durante 1940-2025, en coherencia con el calentamiento global y la ralentización del chorro polar.

H2

Los patrones con mayor contenido de vapor de agua presentan tendencia positiva significativa, reflejando el calentamiento mediterráneo y una atmósfera con mayor capacidad de retención de humedad.

H3

Las fuentes de humedad de los patrones más activos son predominantemente mediterráneas y subtropicales, aunque su contribución relativa puede variar durante el periodo analizado.

03

3. Metodología

Datos ERA5, variables, clasificación, tendencias y HYSPLIT

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

Metodología I: datos y variables ERA5

- La base del análisis es ERA5, con datos diarios entre 1940 y 2025 y un dominio común para todas las variables.
- Las variables se organizan en dos grandes dimensiones: dinámica atmosférica mediante geopotenciales y componente termodinámica mediante TCWV y VIMD.
- La tabla del TFM resume las variables descargadas, su dataset ERA5, formato, periodo y dominio espacial, garantizando comparabilidad entre resultados.

Variable	Dataset ERA5	Formato	Periodo	Dominio
Geopotencial 500 hPa (Z500)	Pressure-levels	NetCDF (.nc)	1940-2025	25°N–50°N, 30°W–15°E
Geopotencial 700 hPa (Z700)	Pressure-levels	NetCDF (.nc)		
Geopotencial 1000 hPa (Z1000)	Pressure-levels	NetCDF (.nc)		
Vapor de agua total en columna (TCWV)	Single-levels	GRIB		
Divergencia de humedad vert. integrada (VIMD)	Single-levels	NetCDF (.nc)		
*Viento 300 hPa (componentes U y V)	Pressure-levels	NetCDF (.nc)		
*Temperatura 500 hPa	Pressure-levels	NetCDF (.nc)		

Tabla 1. Variables atmosféricas del estudio y otras características asociadas a ellas. Fuente: Elaboración propia.
El asterisco (*) indica las variables secundarias.

Metodología II: flujo de trabajo analítico

- El flujo metodológico se aplica de forma homogénea a todas las variables para asegurar reproducibilidad.
- Cada campo diario se transforma en una matriz espacial, se reduce dimensionalidad con *IncrementalPCA* y se clasifica en 25 *clusters* mediante K-Means.
- A partir de los *clusters* se calculan centroides, pesos diarios, tendencias, correspondencias geopotencial-TCWV y retrotrayectorias *HYSPLIT*.

Etapa			Denominación			Descripción		
1			Descarga ERA5			Petición anual a la API del CDS mediante cdsapi. Resultado: 86 archivos por variable (uno por año, 1940-2025).		
2			Preprocesado			Conversión de unidades. Pesado por latitud para corregir la sobrerrepresentación de latitudes altas.		
3			HyperPCA + K-Means			Construcción del <i>hypercube</i> (días x puntos de rejilla), reducción de dimensionalidad con <i>IncrementalPCA</i> (25 componentes) y agrupamiento en 25 <i>clusters</i> con K-Means. Aplicado a todas las variables con los mismos parámetros.		
4			Centroides y pesos diarios			Cálculo del campo medio de cada <i>cluster</i> (centroide) y del peso de similitud diario normalizado (0-1) entre cada día y cada centroide.		
5			Análisis de tendencias			Test de Mann-Kendall y pendiente de Sen sobre las series temporales anuales y estacionales de pesos, con mapas de tendencia punto a punto sobre la rejilla.		
6			Correspondencia y HYSPLIT			Análisis de la relación entre <i>clusters</i> de geopotencial y de TCWV, identificando los días más representativos y analizando las retrotrayectorias con <i>HYSPLIT</i> .		

Tabla 3. Flujo de trabajo estructurado en seis etapas. Fuente: Elaboración propia.

Esquema resumen del proceso metodológico

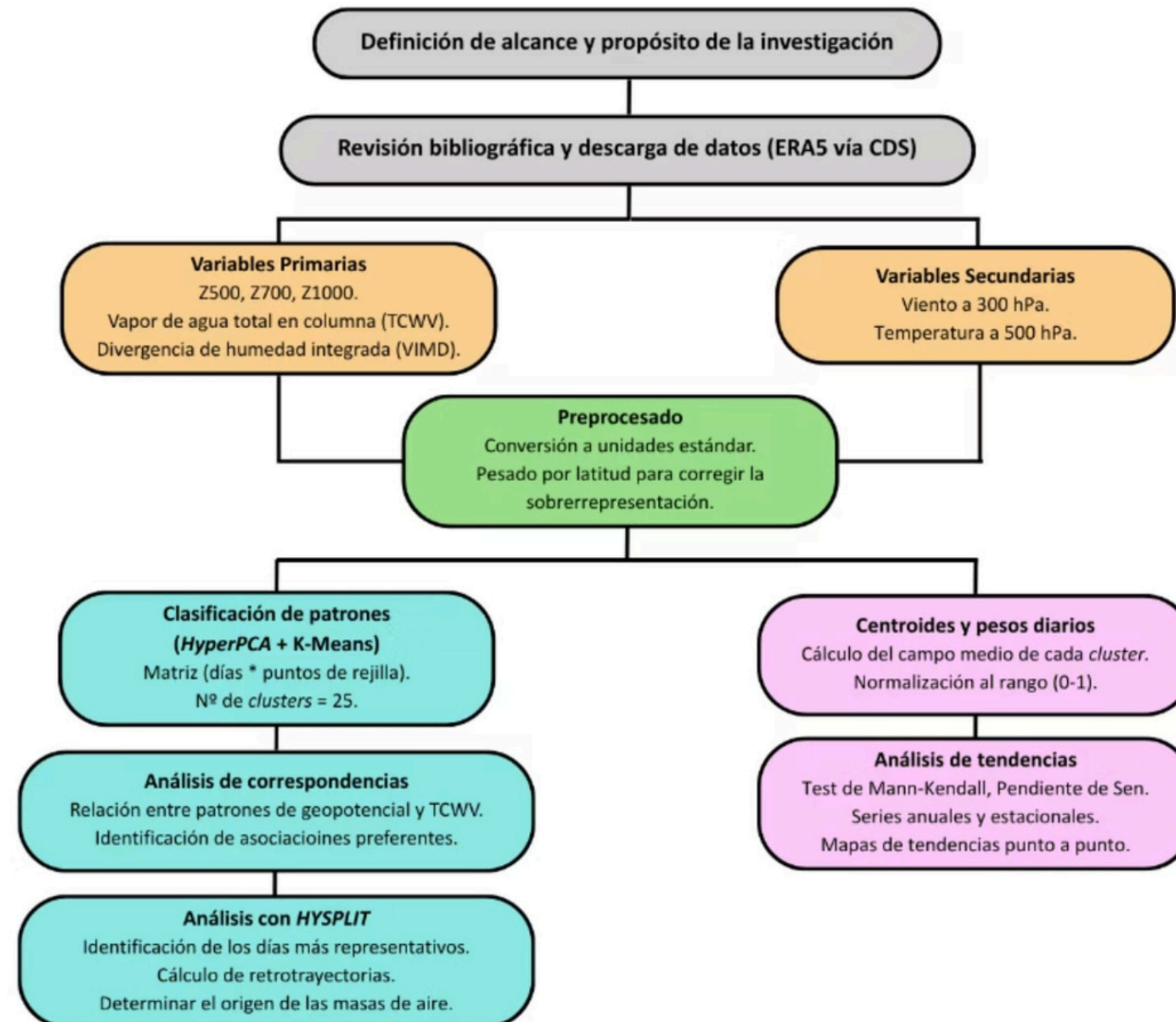


Figura 5. Esquema resumen del proceso metodológico. Fuente: Elaboración propia usando Canvas.

04

4. Resultados y Discusión

Geopotenciales, TCWV, VIMD, Correspondencias y HYSPLIT

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

4.1 Patrones atmosféricos de los geopotenciales (Z500, Z700, Z1000)

Clasificación sinóptica del geopotencial

Se clasifican los campos diarios de Z500, Z700 y Z1000 en 25 patrones por variable, lo que permite resumir la variabilidad sinóptica del dominio.

Frecuencia e interés dinámico

La comparación entre patrones más y menos frecuentes diferencia los estados habituales de las configuraciones con mayor interés dinámico.

Lectura vertical de la atmósfera

Z500 y Z700 describen continuidad en niveles medios, mientras que Z1000 ayuda a interpretar el papel superficial en flujos húmedos y bajas térmicas.

Z500: 25 patrones atmosféricos dominantes

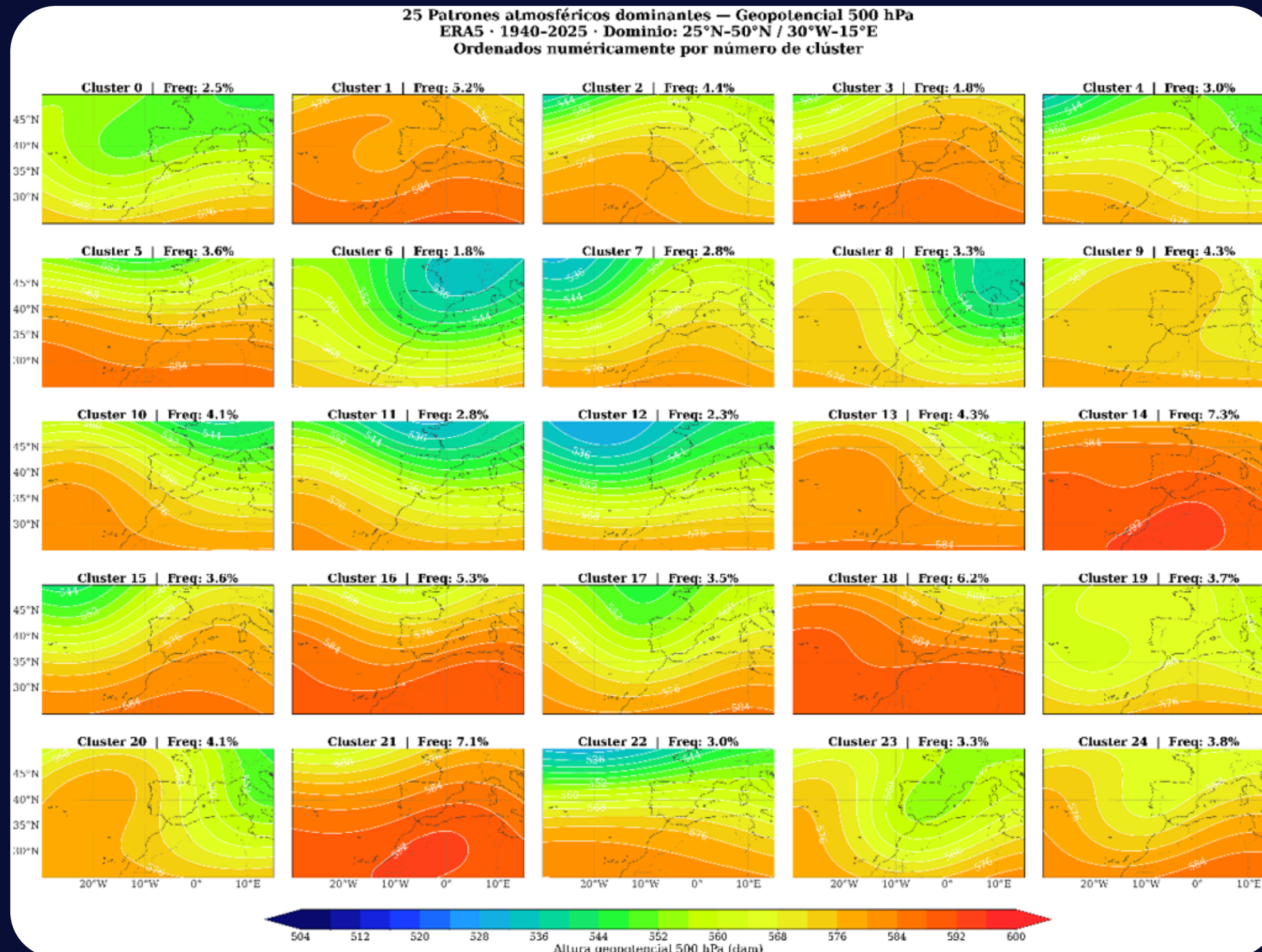
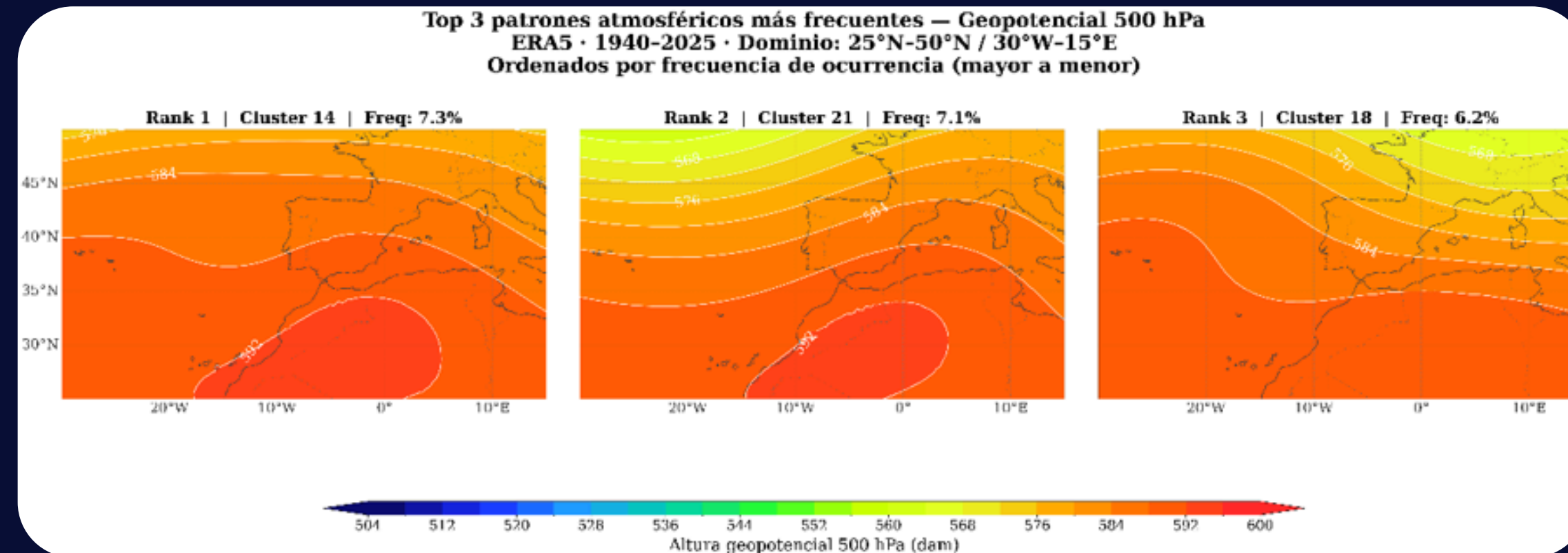


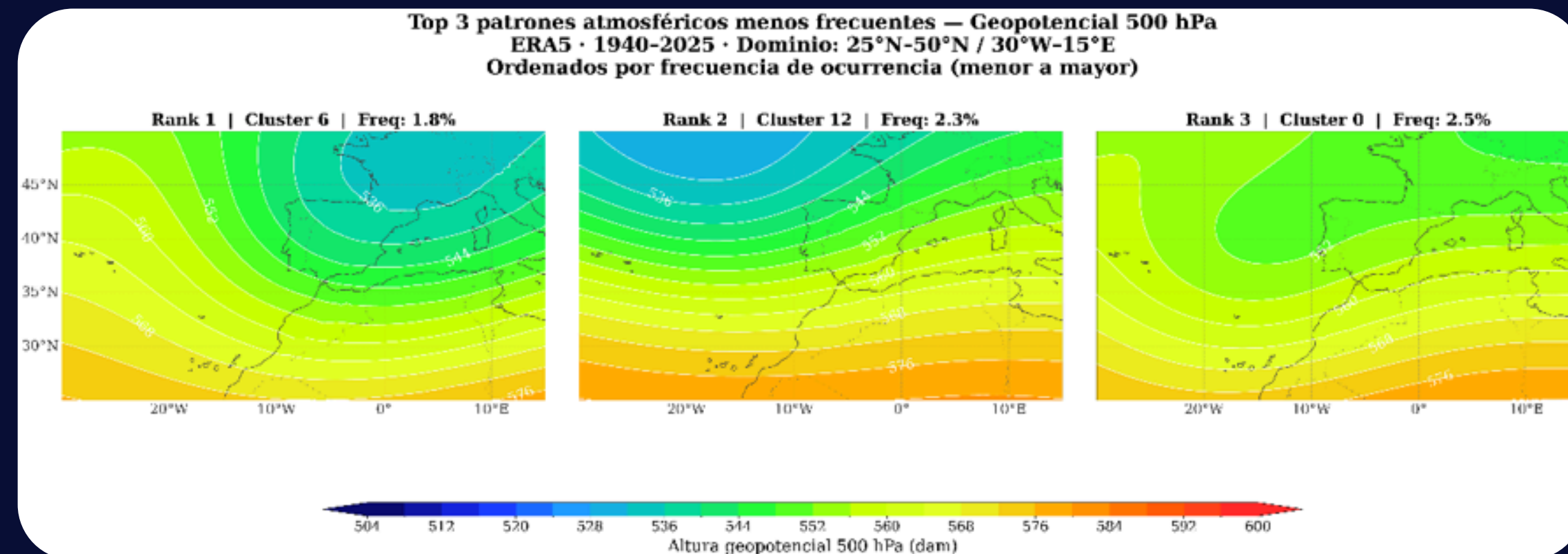
Figura 9: 25 patrones atmosféricos dominantes del geopotencial 500 hPa. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z500: TOP 3 Patrones más y menos frecuentes

Más frecuentes



Menos frecuentes



Figuras 10 y 11. Z500: patrones más y menos frecuentes. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700: 25 patrones atmosféricos dominantes

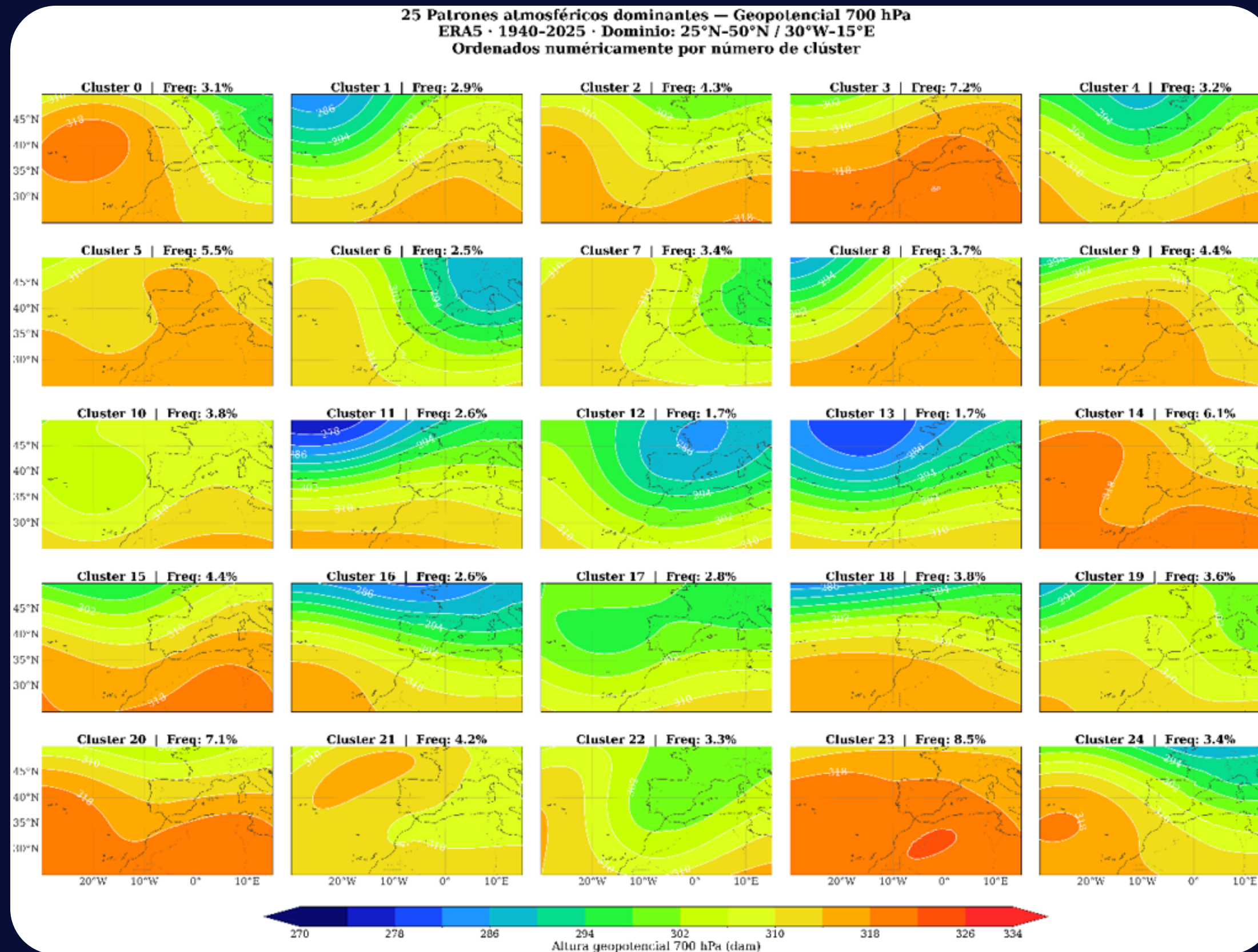
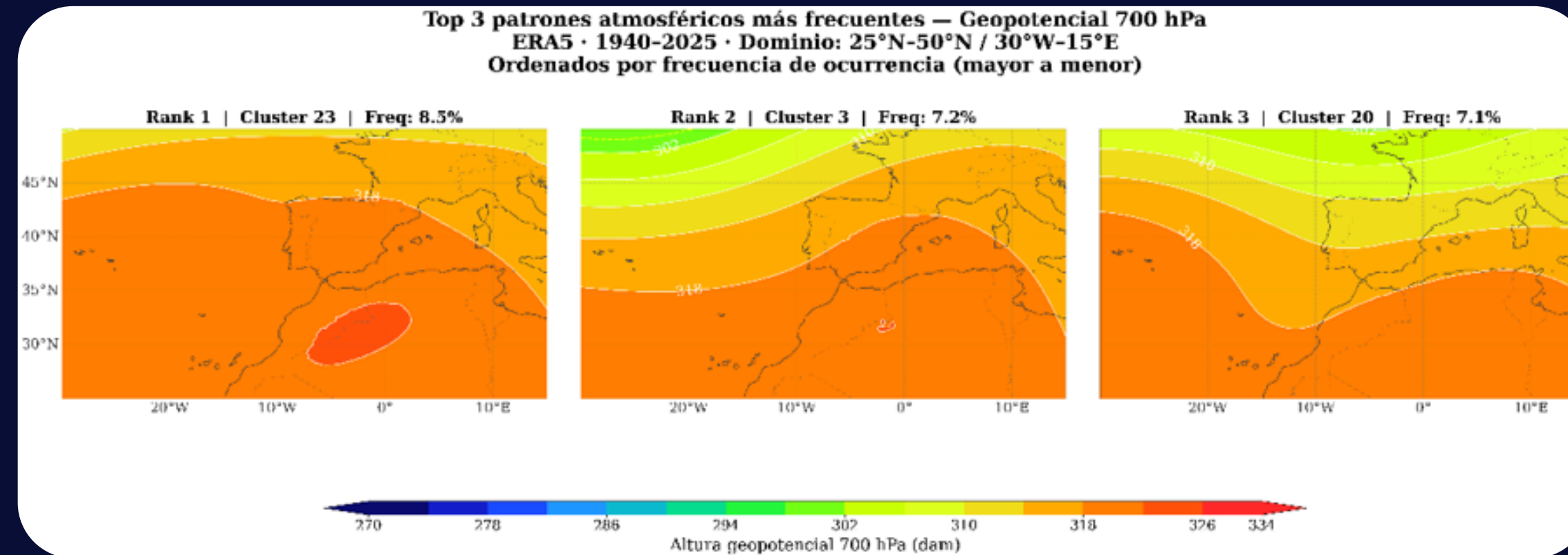


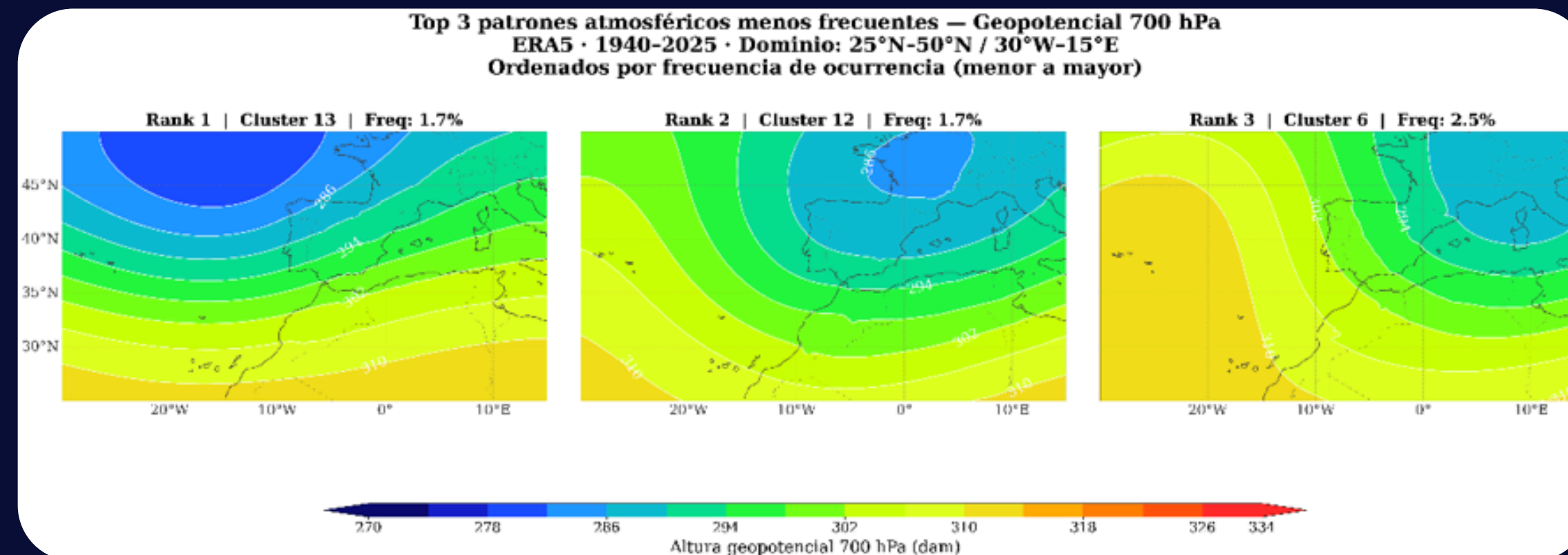
Figura 12: 25 patrones atmosféricos dominantes del geopotencial 700 hPa. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700: TOP 3 Patrones más y menos frecuentes

Más frecuentes



Menos frecuentes



Figuras 13 y 14. Z700: patrones más y menos frecuentes. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000: 25 patrones atmosféricos dominantes

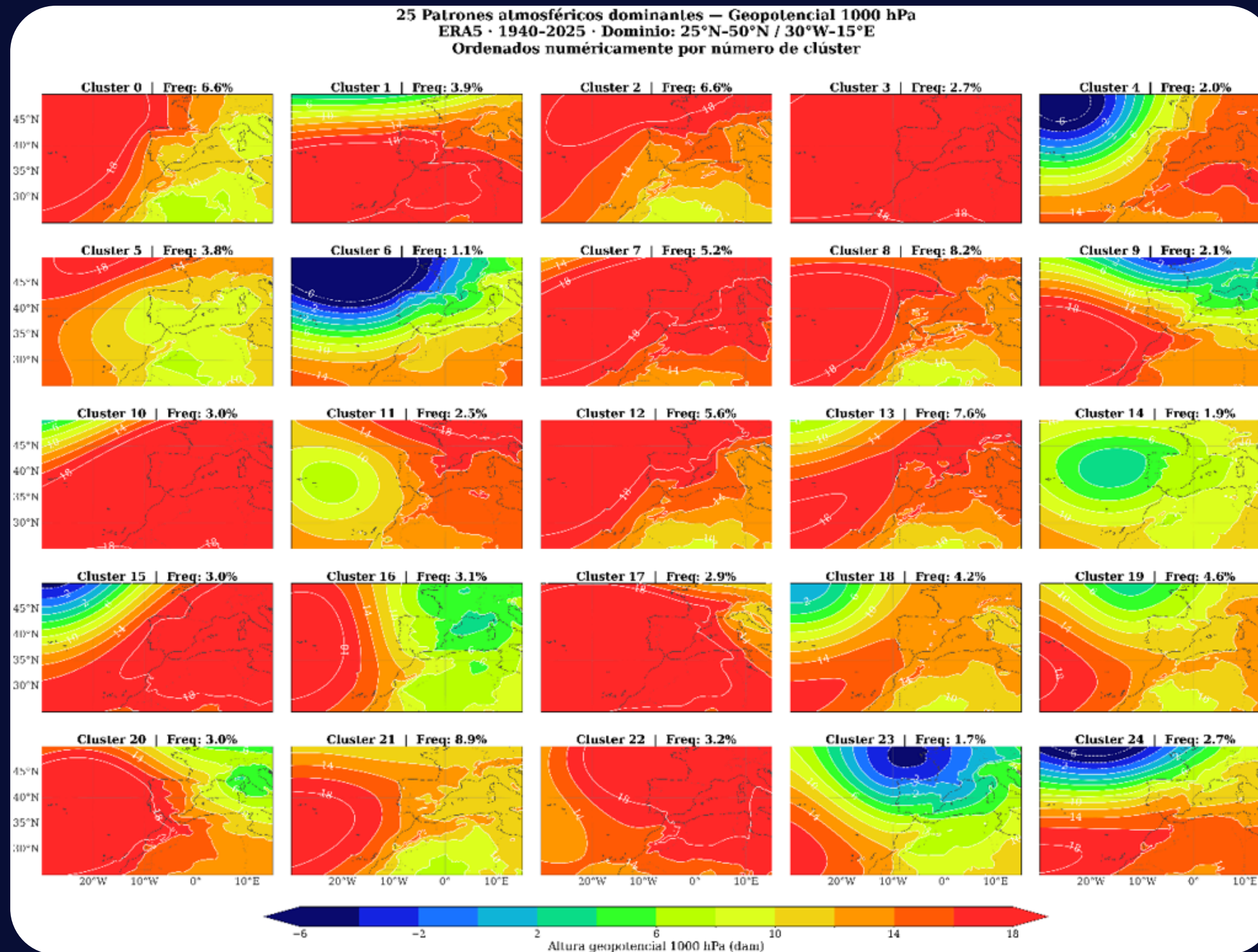
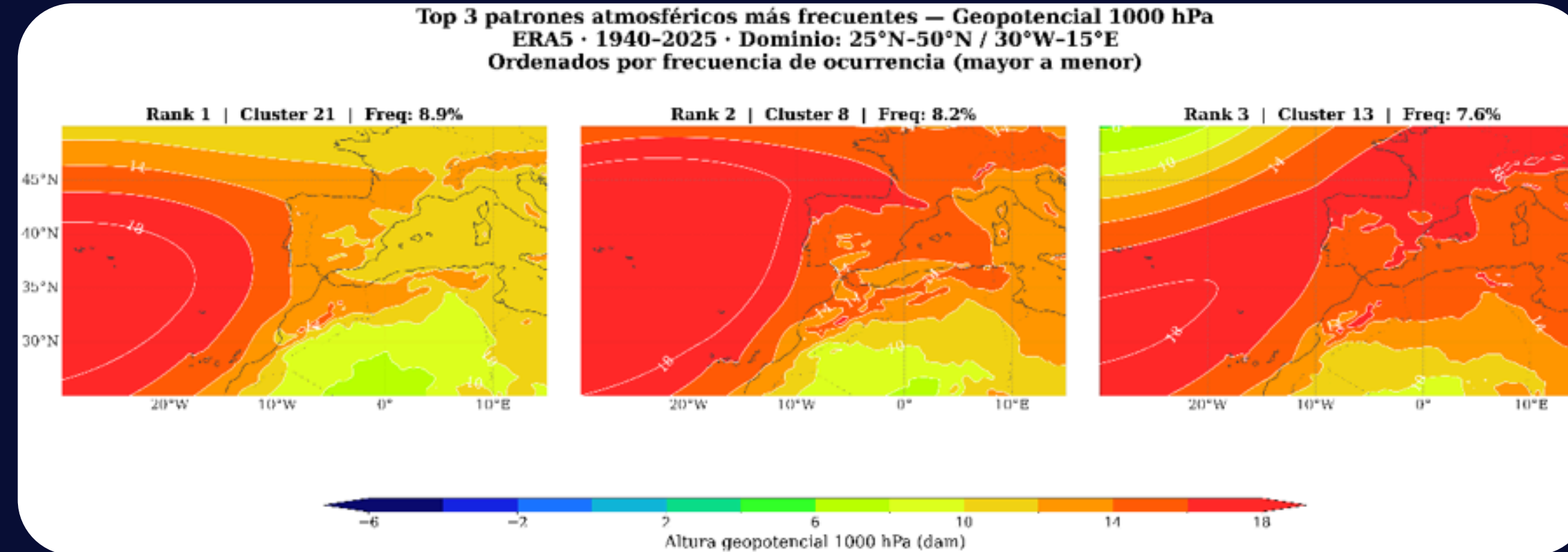


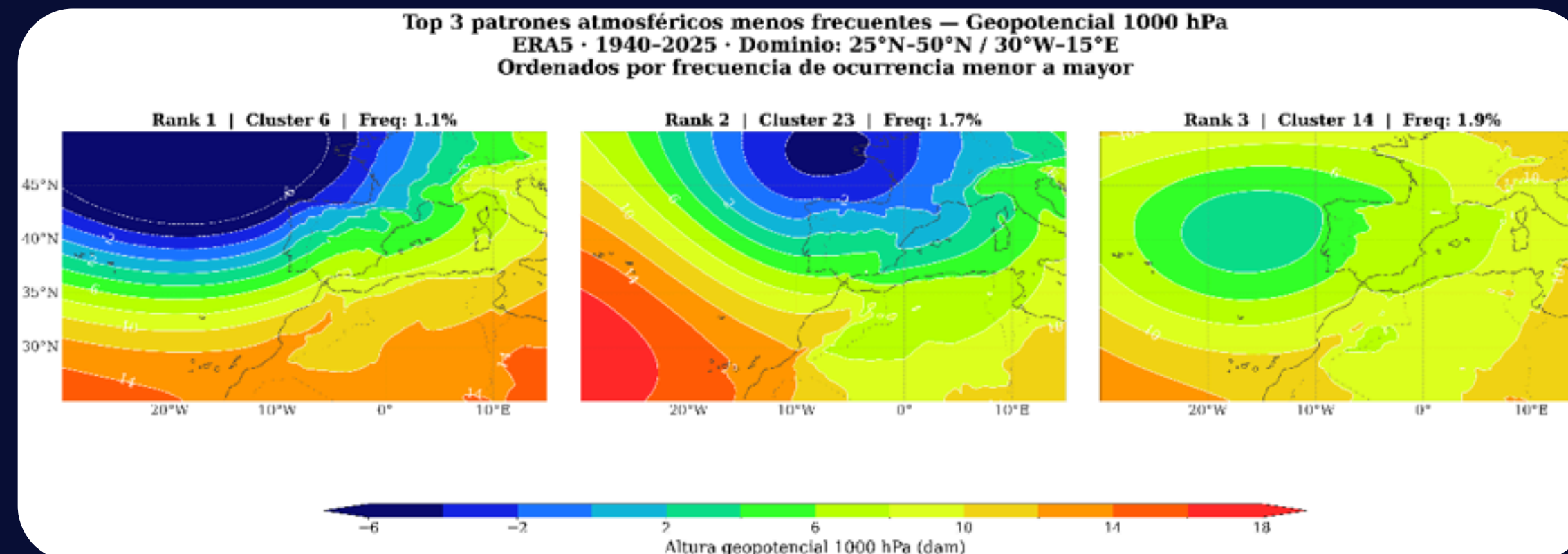
Figura 15: 25 patrones atmosféricos dominantes del geopotencial 1000 hPa. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000: TOP 3 Patrones más y menos frecuentes

Más frecuentes



Menos frecuentes



Figuras 16 y 17. Z1000: patrones más y menos frecuentes. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Síntesis del apartado 4.1

Predominio de escenarios estables

Los tres niveles geopotenciales muestran que las configuraciones más frecuentes durante 1940-2025 están dominadas por geopotenciales elevados.

Menor afinidad con DANAs clásicas

Los patrones más frecuentes no coinciden con los escenarios más afines al aislamiento ciclónico en altura.

Lectura vertical coherente

La estabilidad domina tanto en niveles medios como en superficie, aunque Z1000 incorpora además la influencia de las bajas térmicas y el flujo de capas bajas.

4.2 Tendencias en los geopotenciales (Z500, Z700, Z1000)

Evolución temporal de los *clusters*

Tras la clasificación de los patrones, se analiza cómo cambia el peso anual de cada *cluster* durante 1940-2025.

Significancia y magnitud del cambio

El test de Mann-Kendall permite detectar la significancia de las tendencias y la pendiente de Sen cuantifica su magnitud.

Frecuencia y cambio espacial

Los gráficos y mapas de tendencia permiten detectar cambios en la frecuencia y distribución espacial del geopotencial.

Z500: tendencias por *clusters*

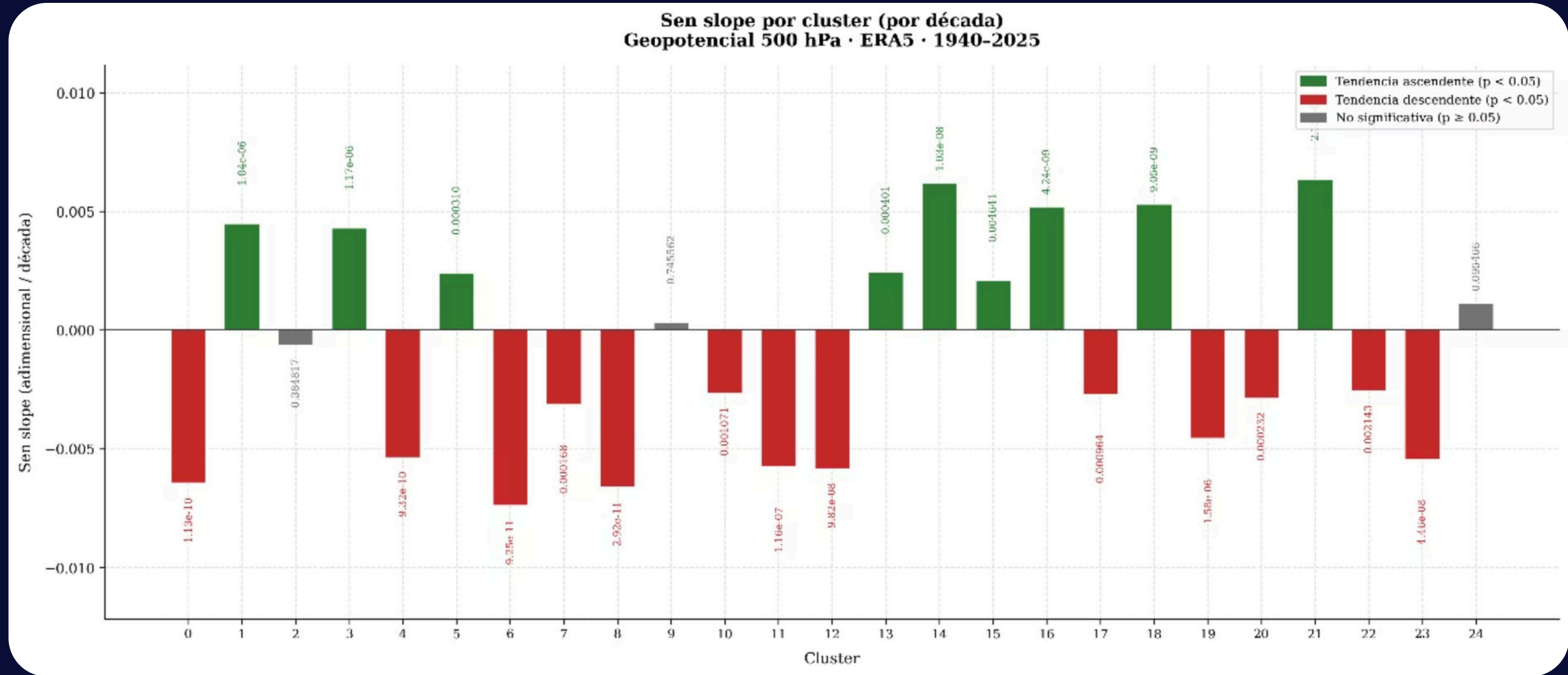
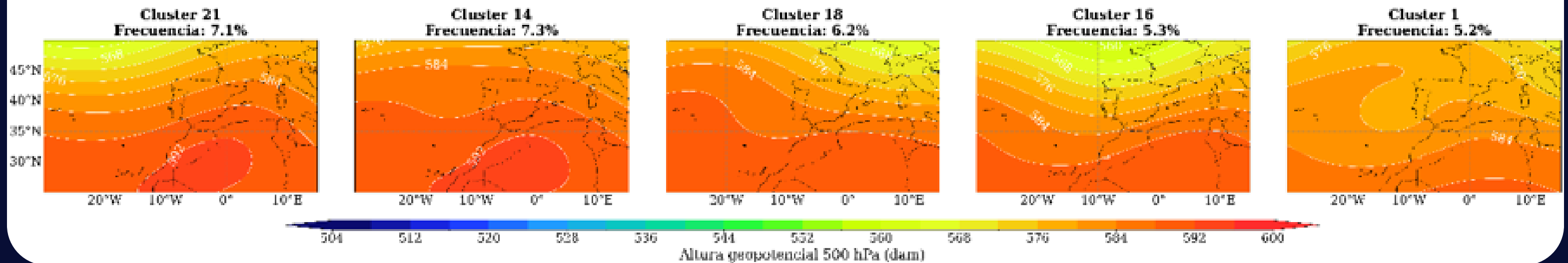


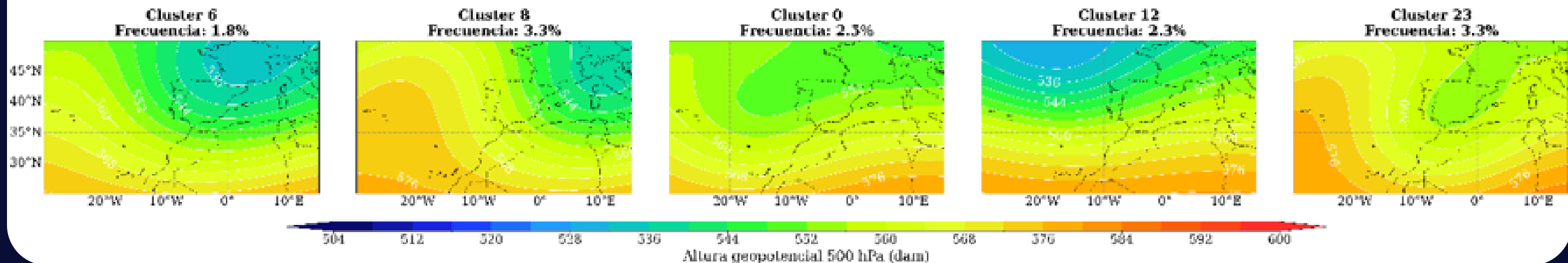
Figura 18. Pendiente de Sen por década de los 25 clusters del geopotencial 500 hPa durante el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z500: TOP 5 *clusters* con tendencia positiva/negativa

TOP5 patrones atmosféricos dominantes — Geopotencial 500 hPa
Tendencia ascendente · ERA5 · 1940-2025 · Dominio: 25°N-50°N / 30°W-15°E
Ordenados de mayor a menor tendencia ascendente



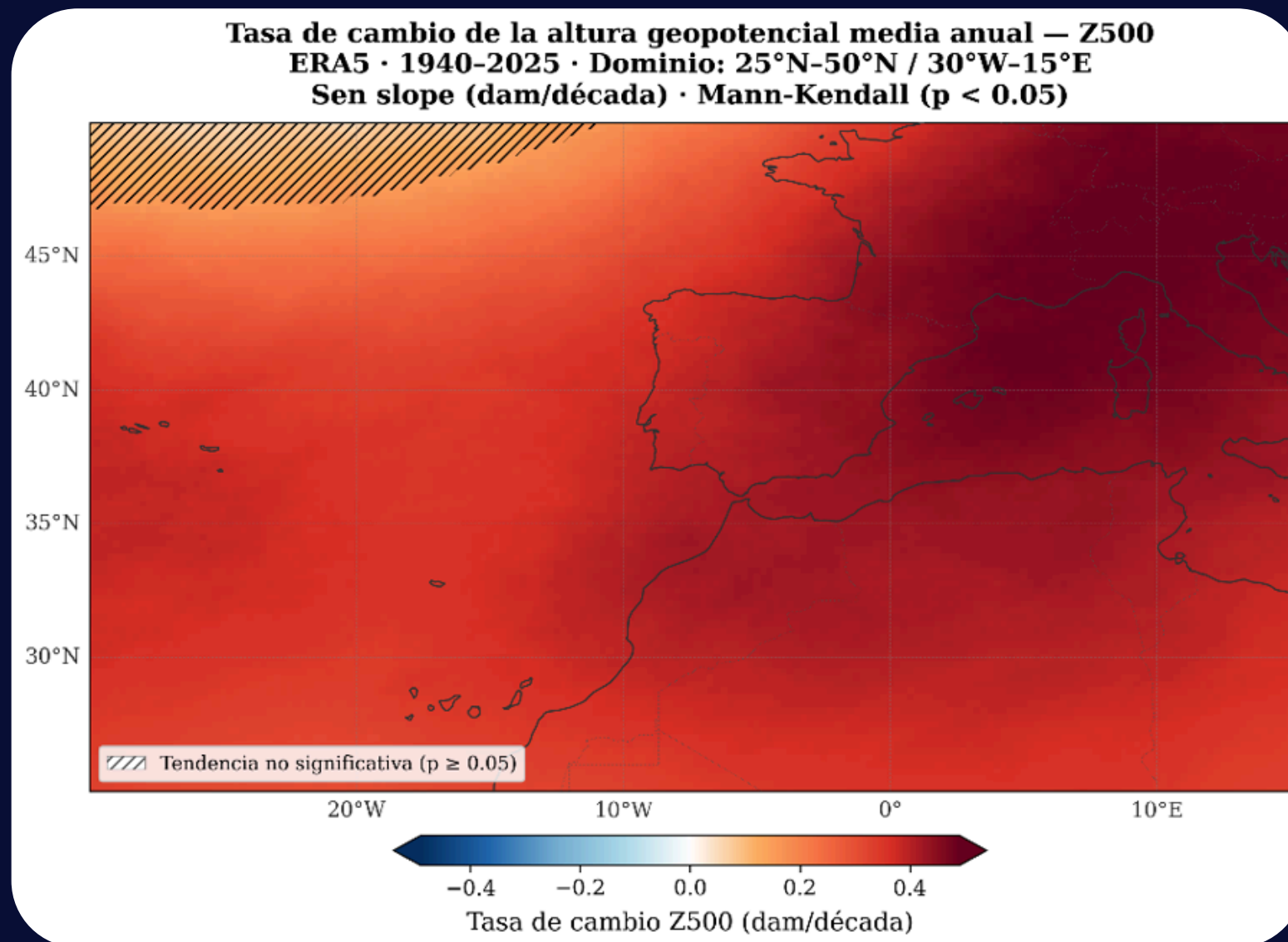
TOP5 patrones atmosféricos dominantes — Geopotencial 500 hPa
Tendencia descendente · ERA5 · 1940-2025 · Dominio: 25°N-50°N / 30°W-15°E
Ordenados de mayor a menor tendencia descendente



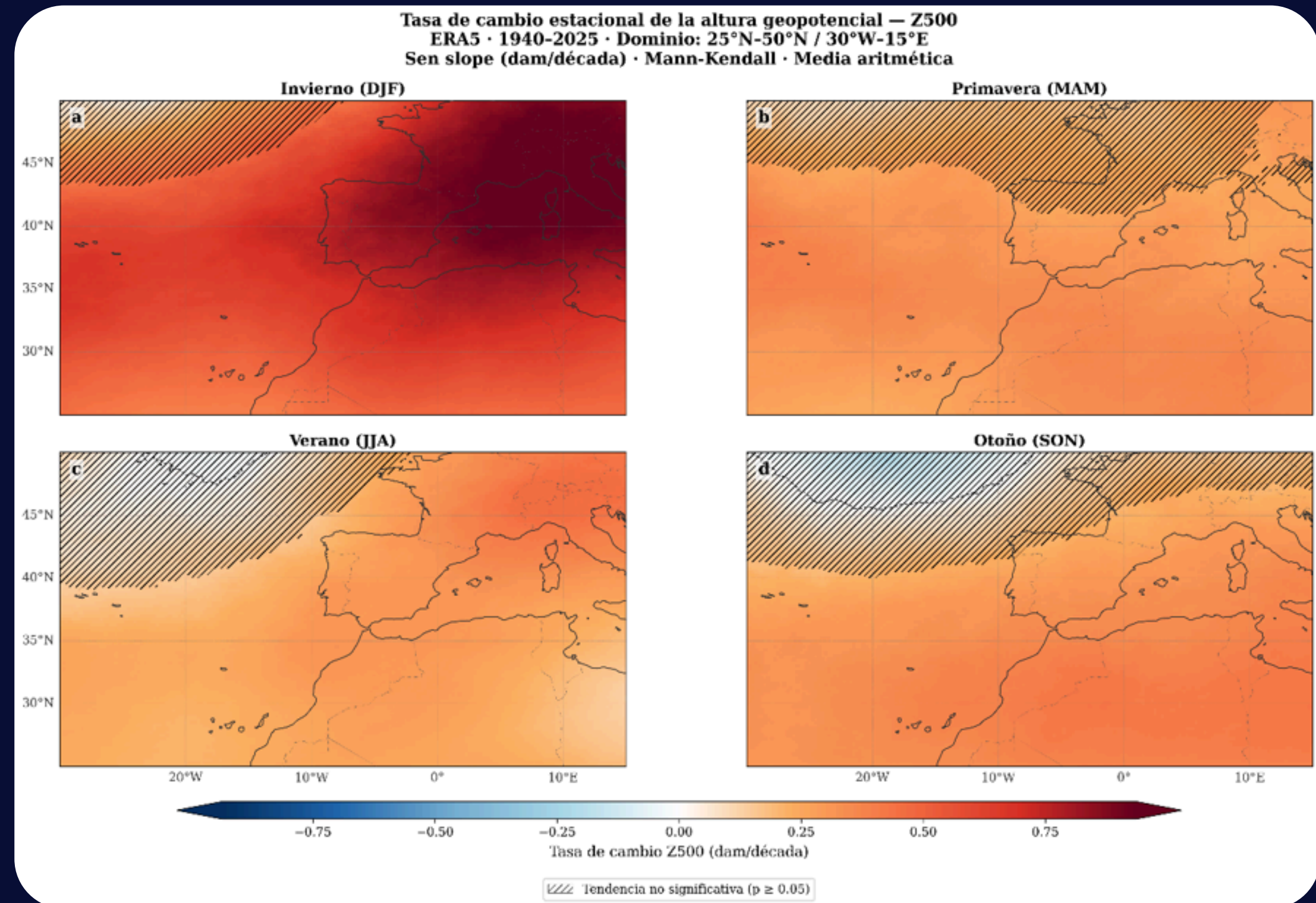
Figuras 19 y 20. Z500: mayor y menor tendencia. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z500: tasa de cambio anual y estacional

Anual



Estacional



Figuras 21 y 22. Z500: tasa de cambio anual y estacional. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700: tendencias por *clusters*

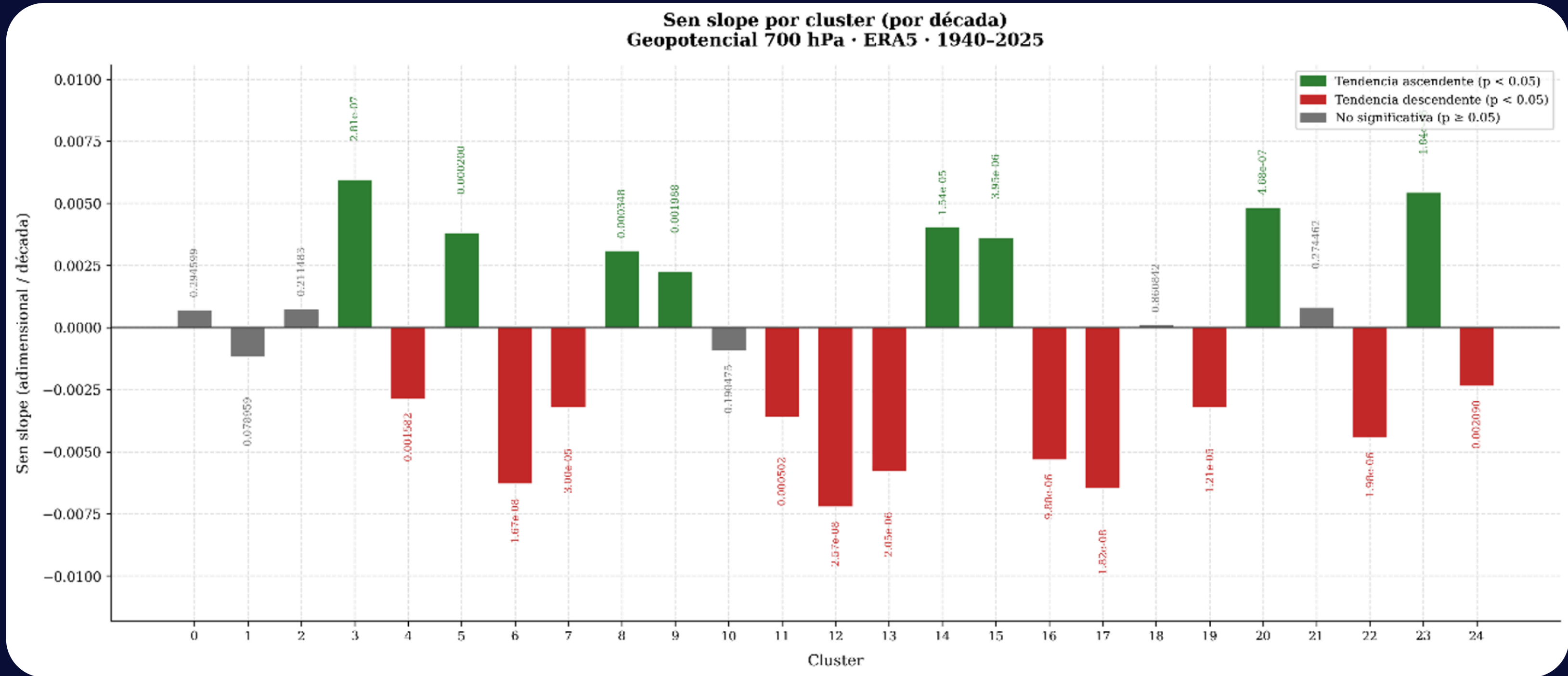
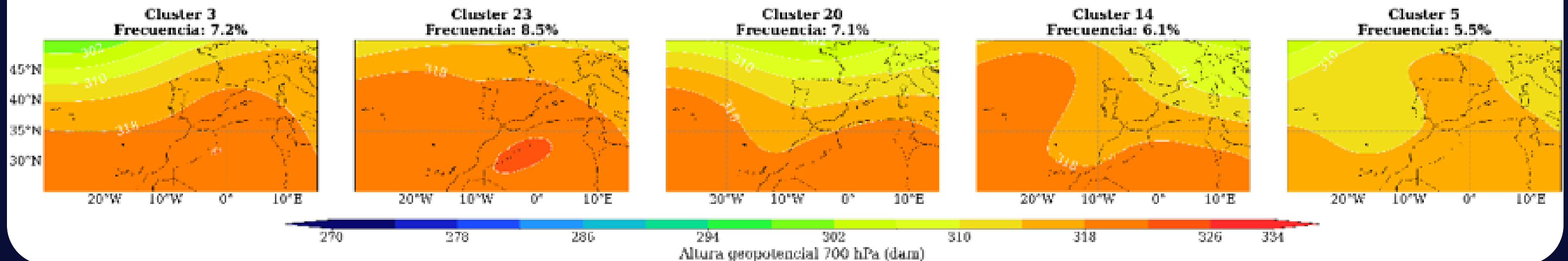


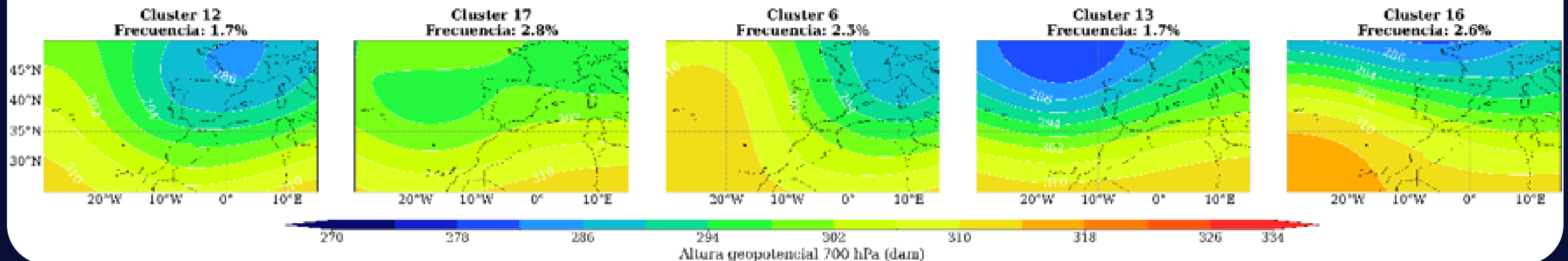
Figura 23. Pendiente de Sen por década de los 25 clusters del geopotencial 700 hPa durante el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700: TOP 5 *clusters* con tendencia positiva/negativa

TOP5 patrones atmosféricos dominantes — Geopotencial 700 hPa
Tendencia ascendente · ERA5 · 1940-2025 · Dominio: 25°N-50°N / 30°W-15°E
Ordenados de mayor a menor tendencia ascendente



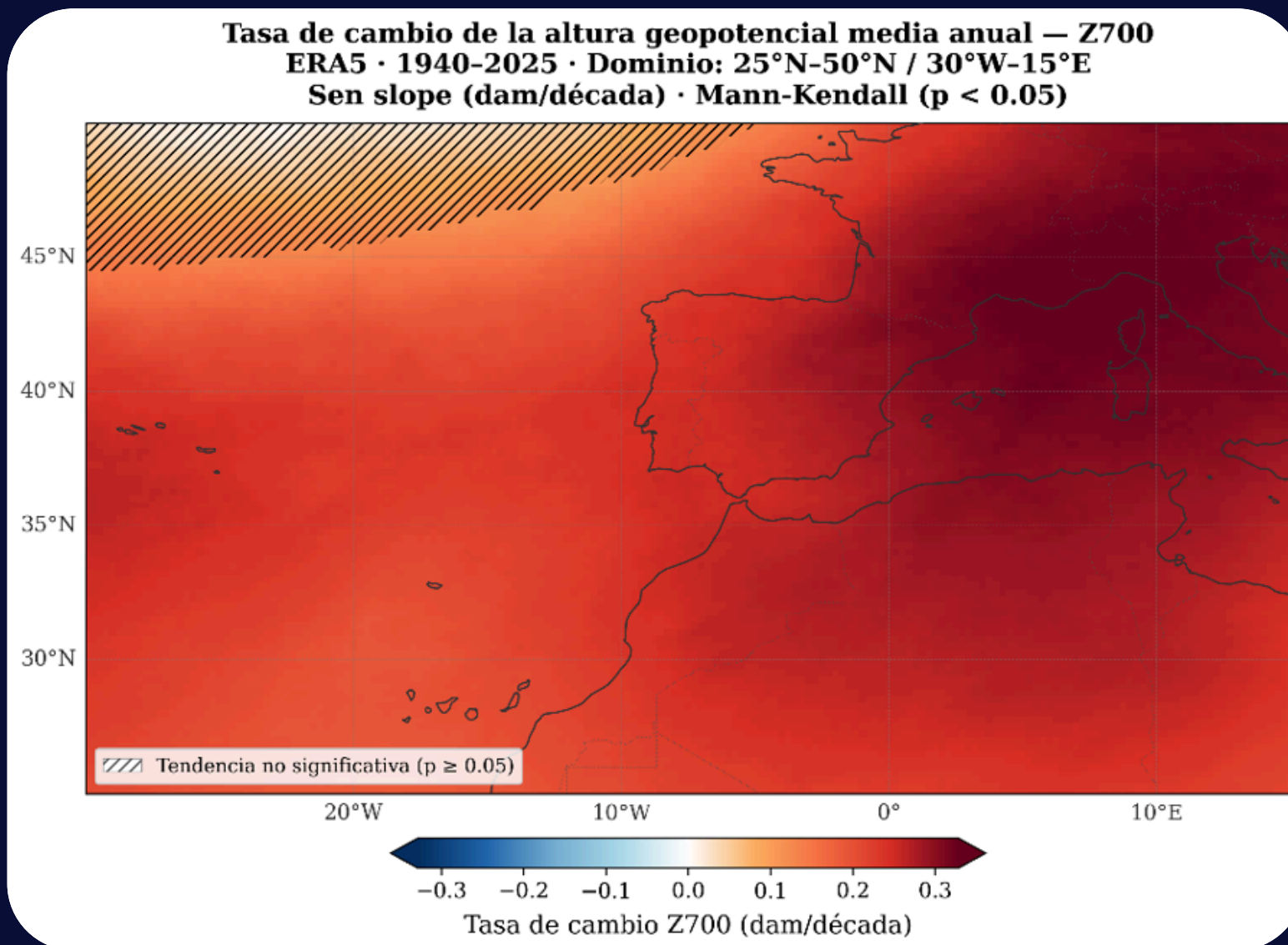
TOP5 patrones atmosféricos dominantes — Geopotencial 700 hPa
Tendencia descendente · ERA5 · 1940-2025 · Dominio: 25°N-50°N / 30°W-15°E
Ordenados de mayor a menor tendencia descendente



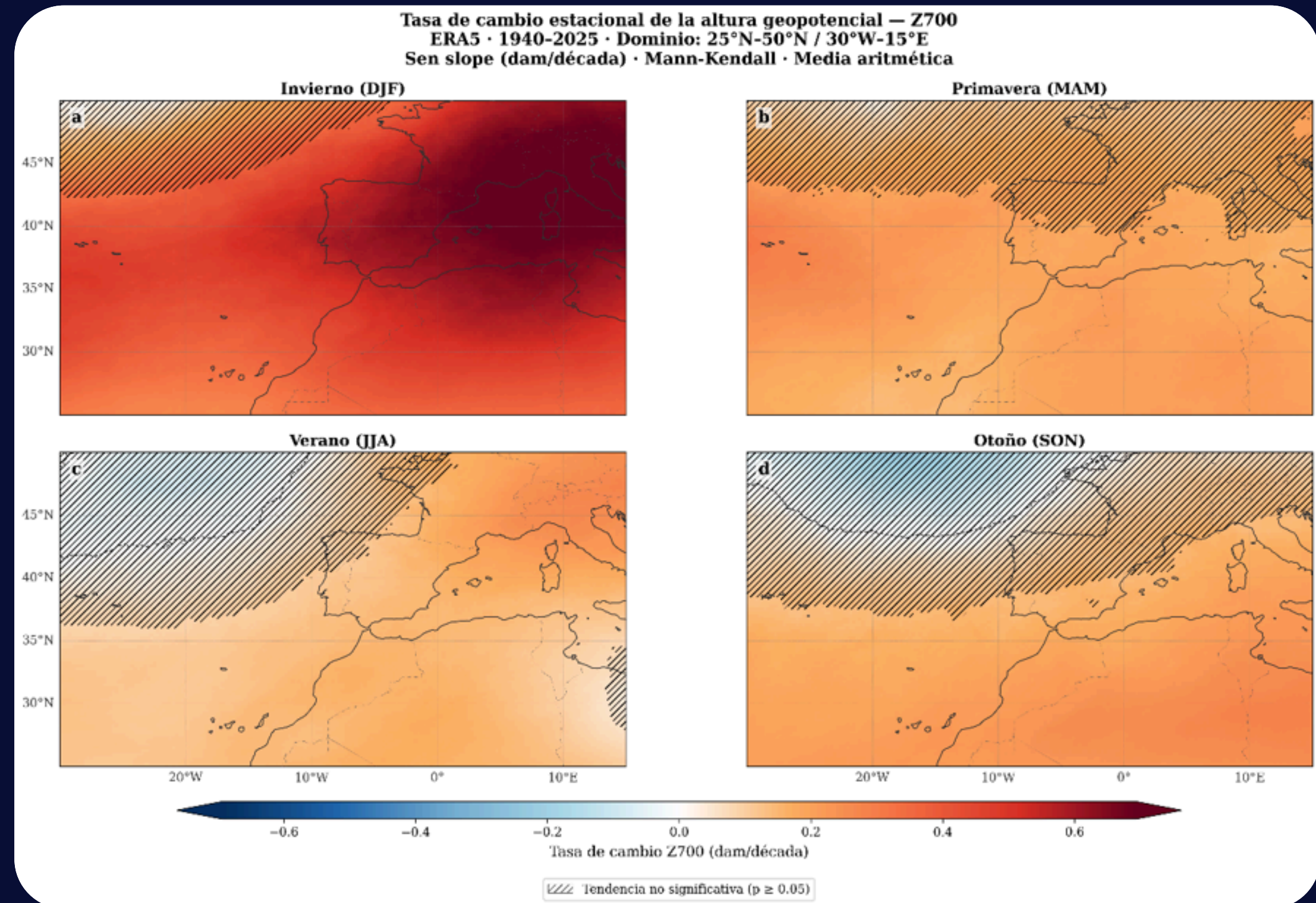
Figuras 24 y 25. Z700: mayor y menor tendencia. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700: tasa de cambio anual y estacional

Anual



Estacional



Figuras 26 y 27. Z700: tasa de cambio anual y estacional. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000: tendencias por *clusters*

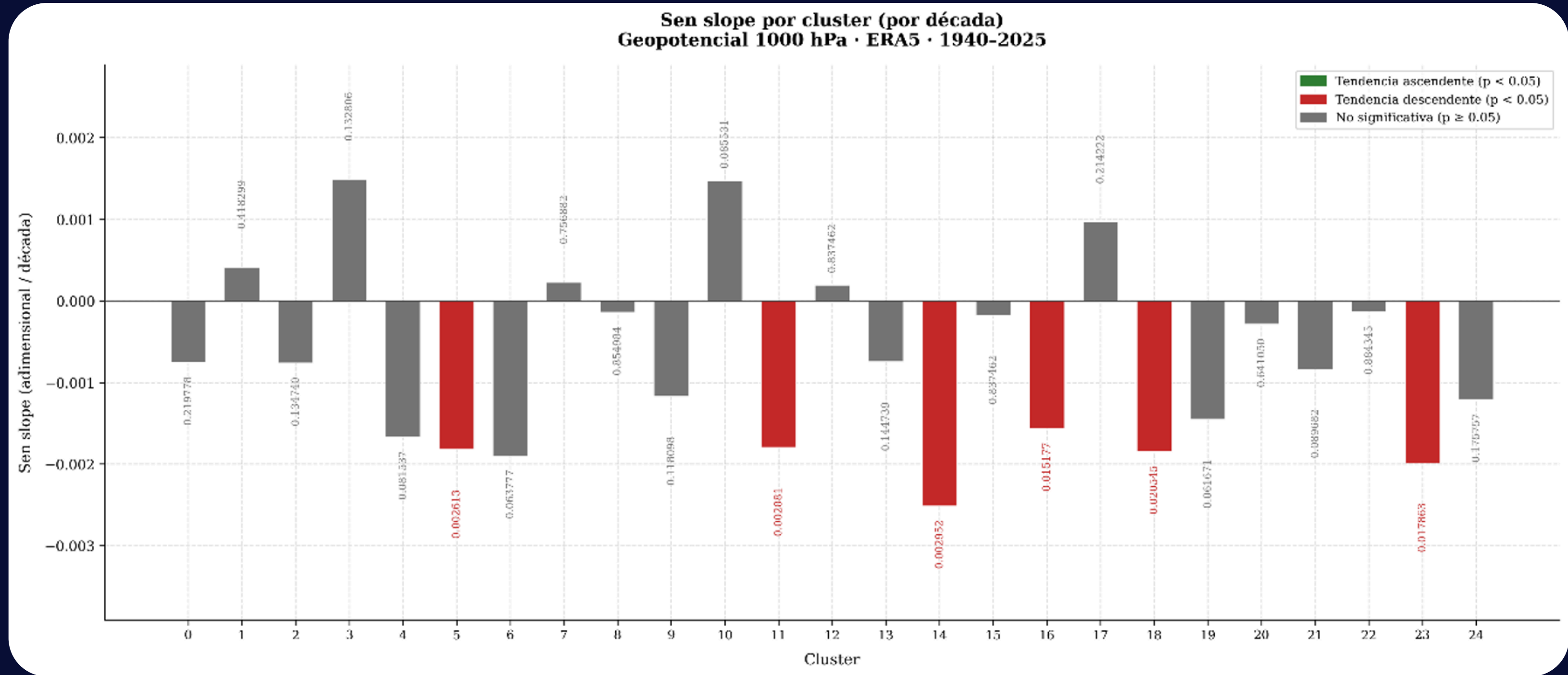
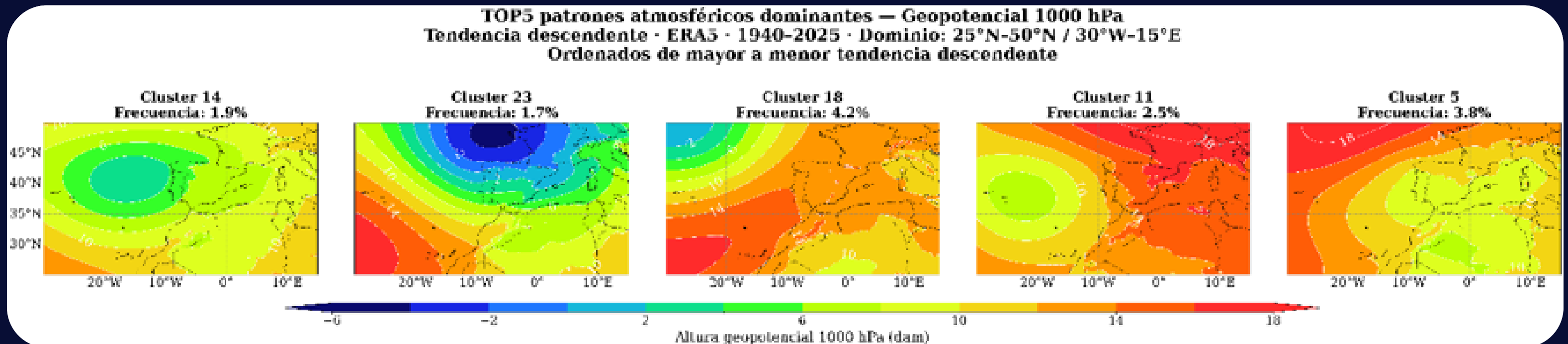
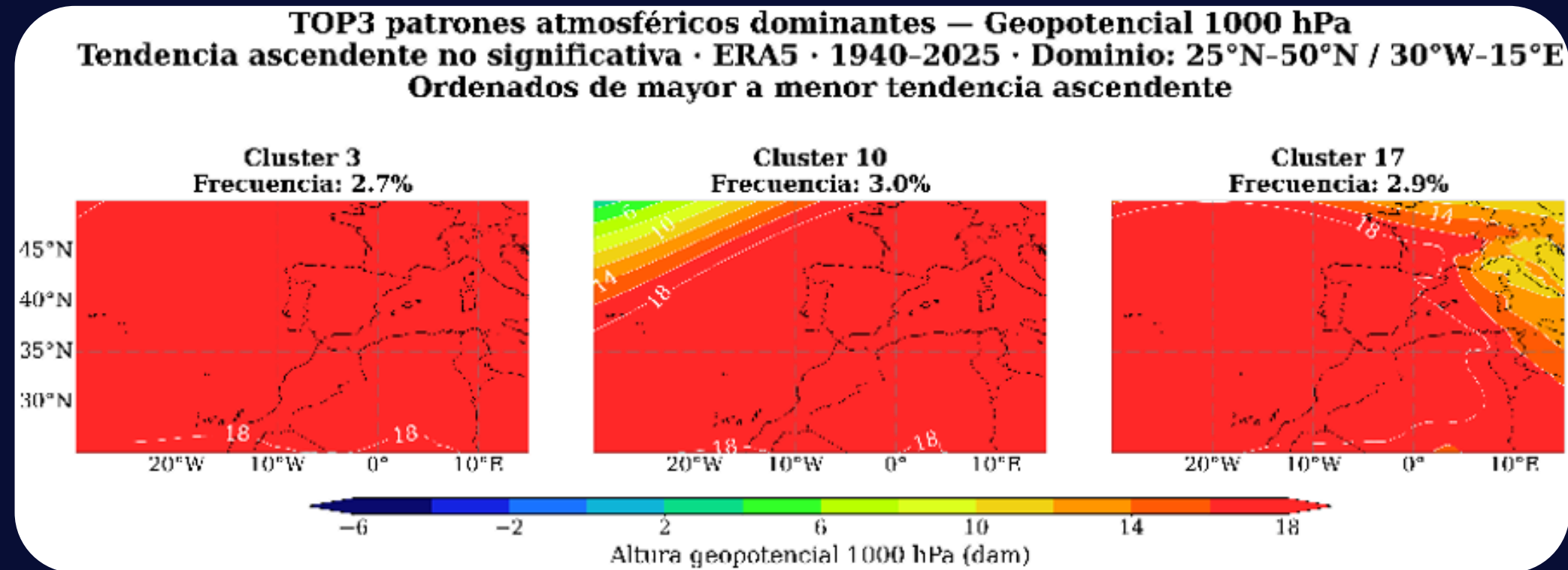


Figura 28. Pendiente de Sen por década de los 25 clusters del geopotencial 1000 hPa durante el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000: TOP *clusters* con tendencia positiva/negativa

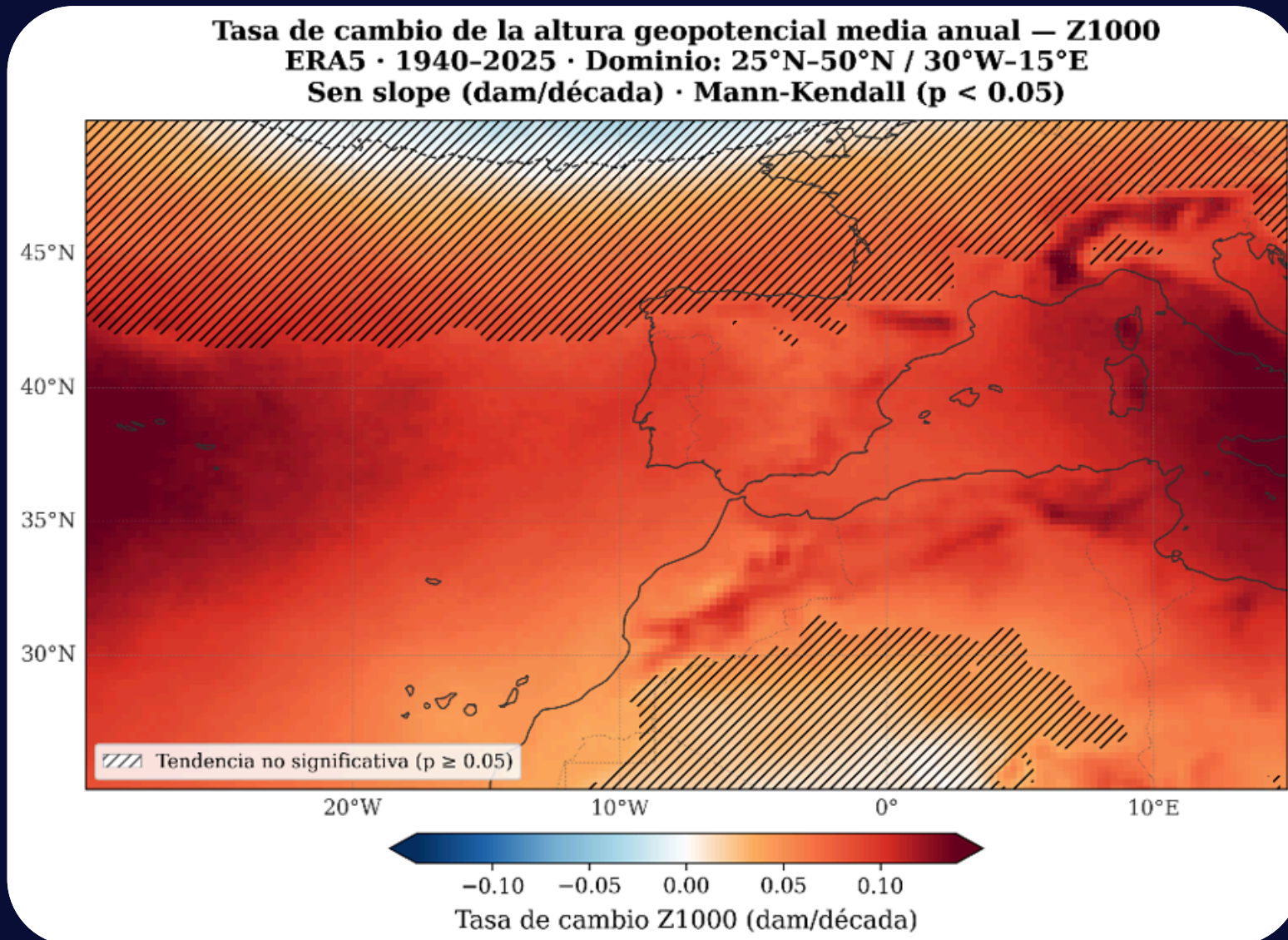

(No Significativa)



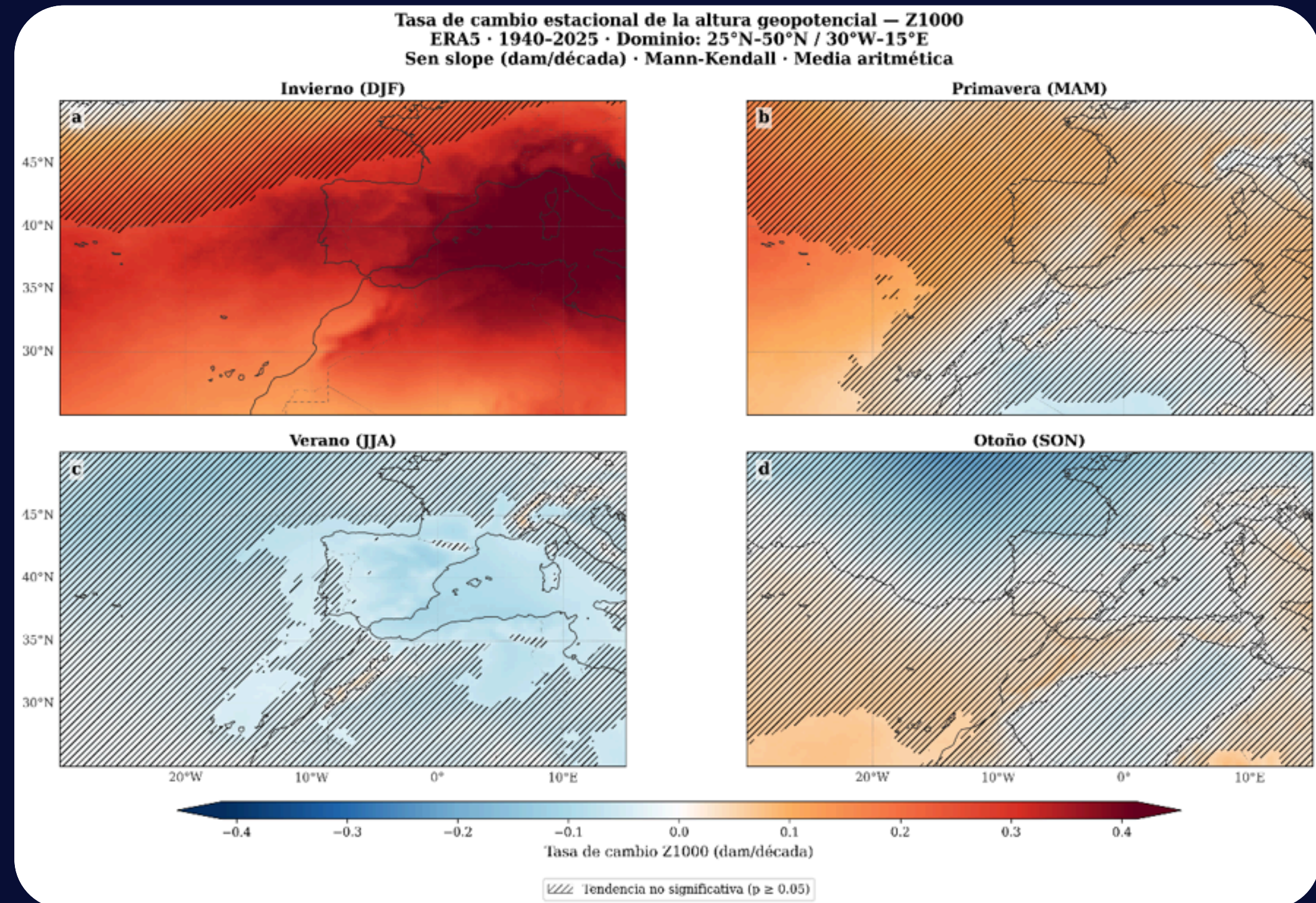
Figuras 29 y 30. Z1000: mayor y menor tendencia. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000: tasa de cambio anual y estacional

Anual



Estacional



Figuras 31 y 32. Z1000: tasa de cambio anual y estacional. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Síntesis del apartado 4.2

Señal clara en niveles medios

Los niveles 500 y 700 hPa muestran el indicio más claro de aumento de la altitud geopotencial, junto con una mayor presencia de crestas, dorsales anticiclónicas y escenarios de estabilidad.

Respuesta más fragmentada en superficie

En 1000 hPa, la respuesta es menos homogénea y no se traduce en un aumento significativo de *clusters* concretos, al estar más condicionada por bajas térmicas, calentamiento continental y procesos de capas bajas.

No linealidad entre altura y superficie

La comparación vertical indica que los cambios en niveles medios no se proyectan de forma directa sobre la superficie, aunque el ascenso geopotencial refuerza la señal de calentamiento troposférico.

4.3 Patrones atmosféricos de TCWV y VIMD

TCWV

El TCWV mide la cantidad de vapor de agua disponible en toda la columna atmosférica y representa el combustible termodinámico potencial.

Su análisis es clave porque permite valorar si las DANAs pueden desarrollarse en entornos cada vez más húmedos, aumentando el potencial de precipitación intensa cuando existe forzamiento dinámico favorable.

VIMD

La VIMD indica si el flujo integrado de humedad tiende a converger o divergir, es decir, si la humedad se organiza o se dispersa.

Su estudio permite comprobar si el vapor de agua disponible se concentra sobre áreas concretas, algo esencial para interpretar la activación de convección y precipitación intensa.

TCWV: 25 patrones atmosféricos dominantes

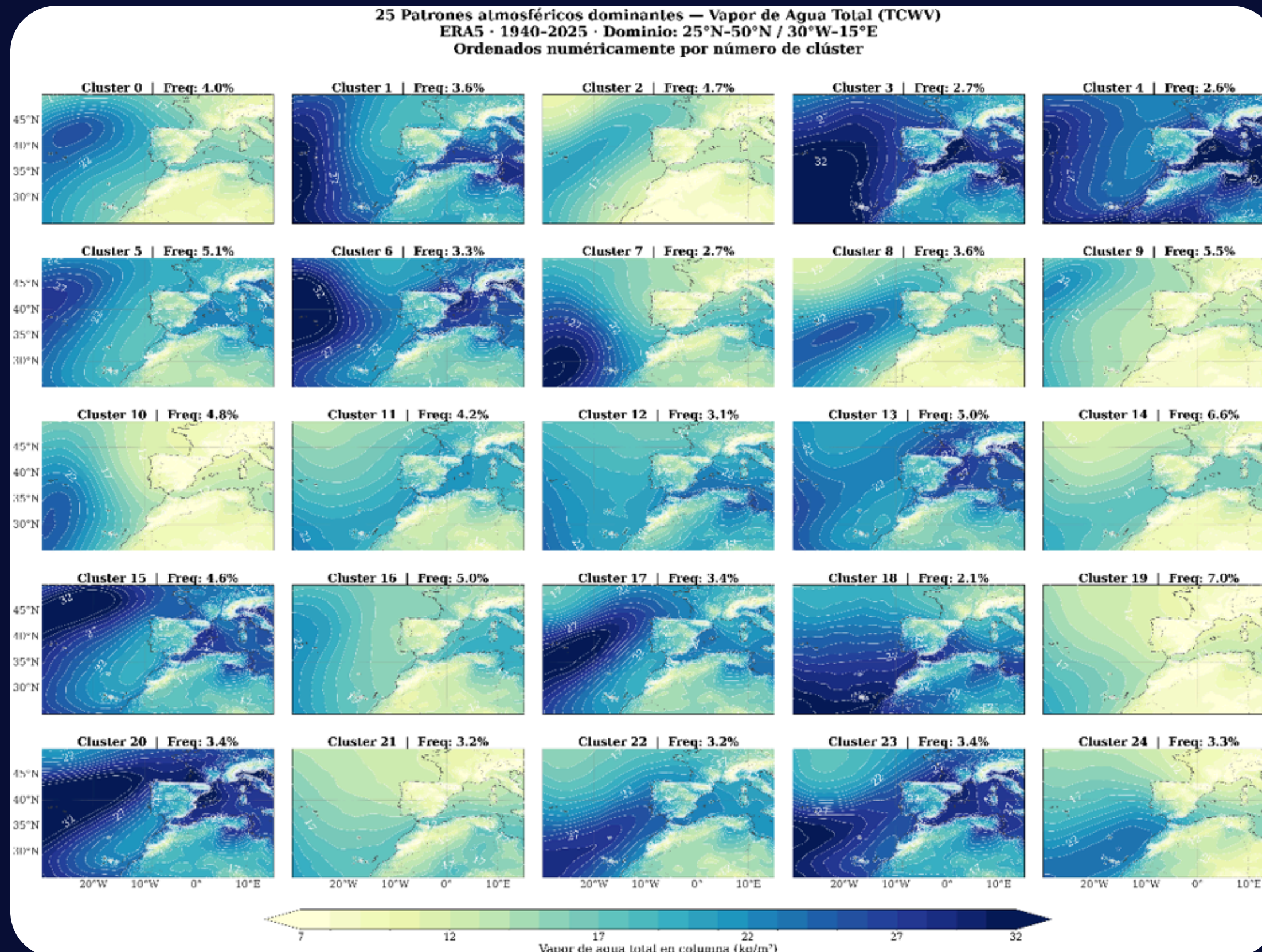
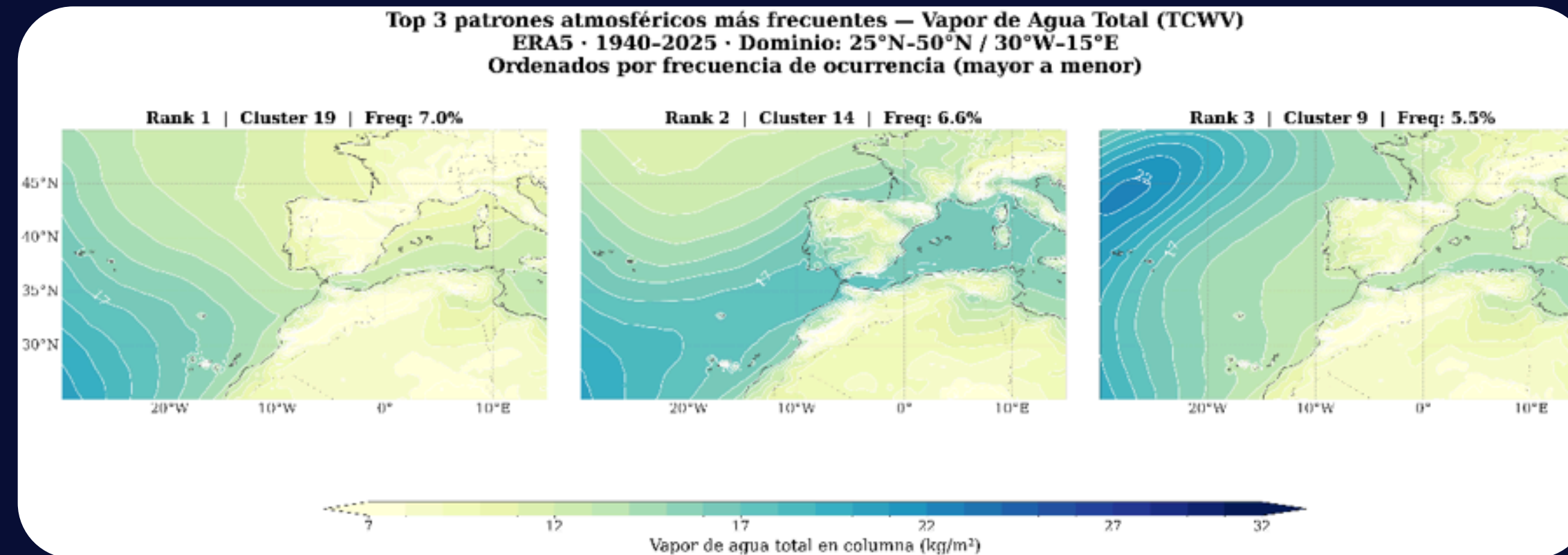


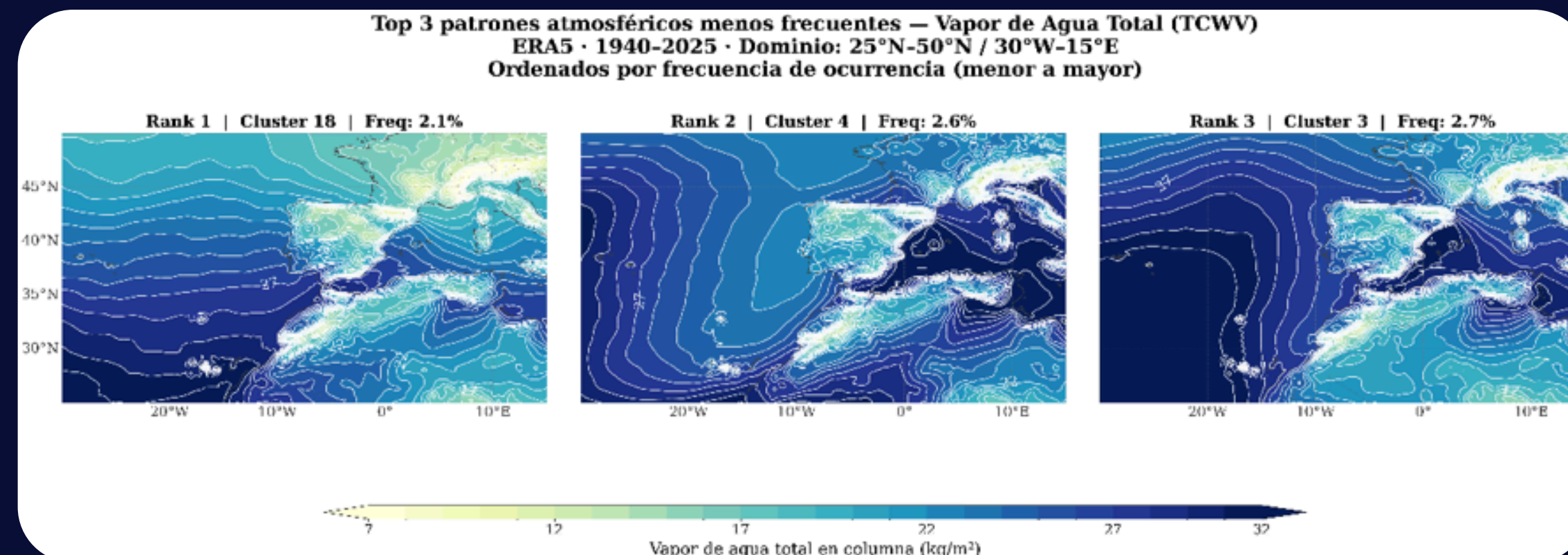
Figura 33: 25 escenarios dominantes del TCWV. Fuente: Elaboración propia usando Python.

TCWV: TOP 3 Patrones más y menos frecuentes

Más frecuentes



Menos frecuentes



Figuras 34 y 35. TCWV: patrones más y menos frecuentes. Fuente: Elaboración propia usando Python.

VIMD: 25 patrones atmosféricos dominantes

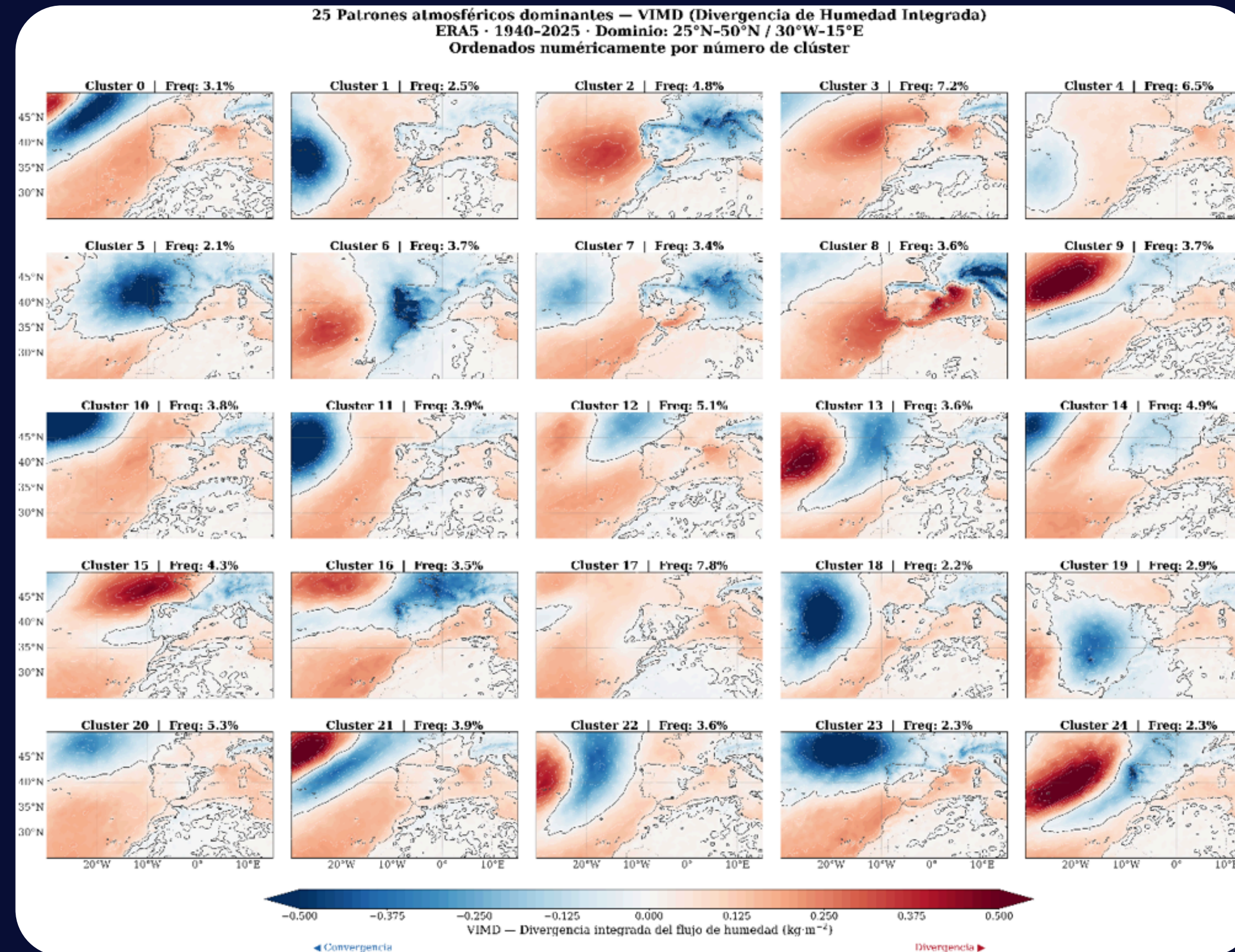
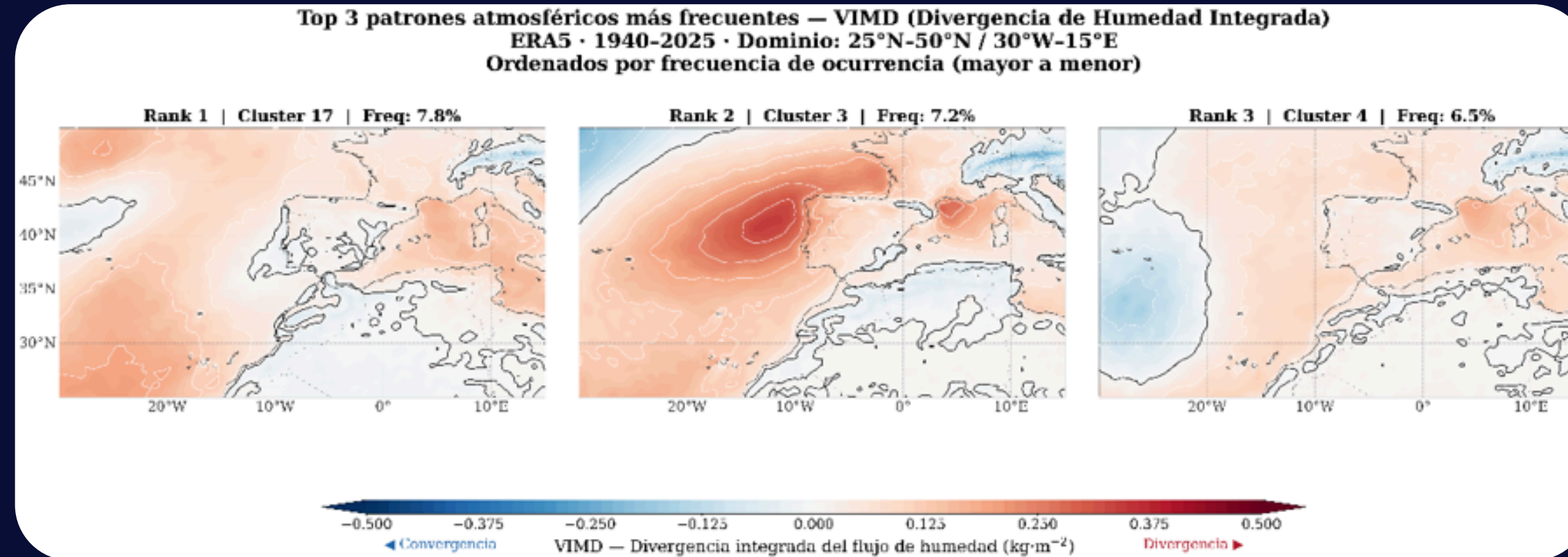


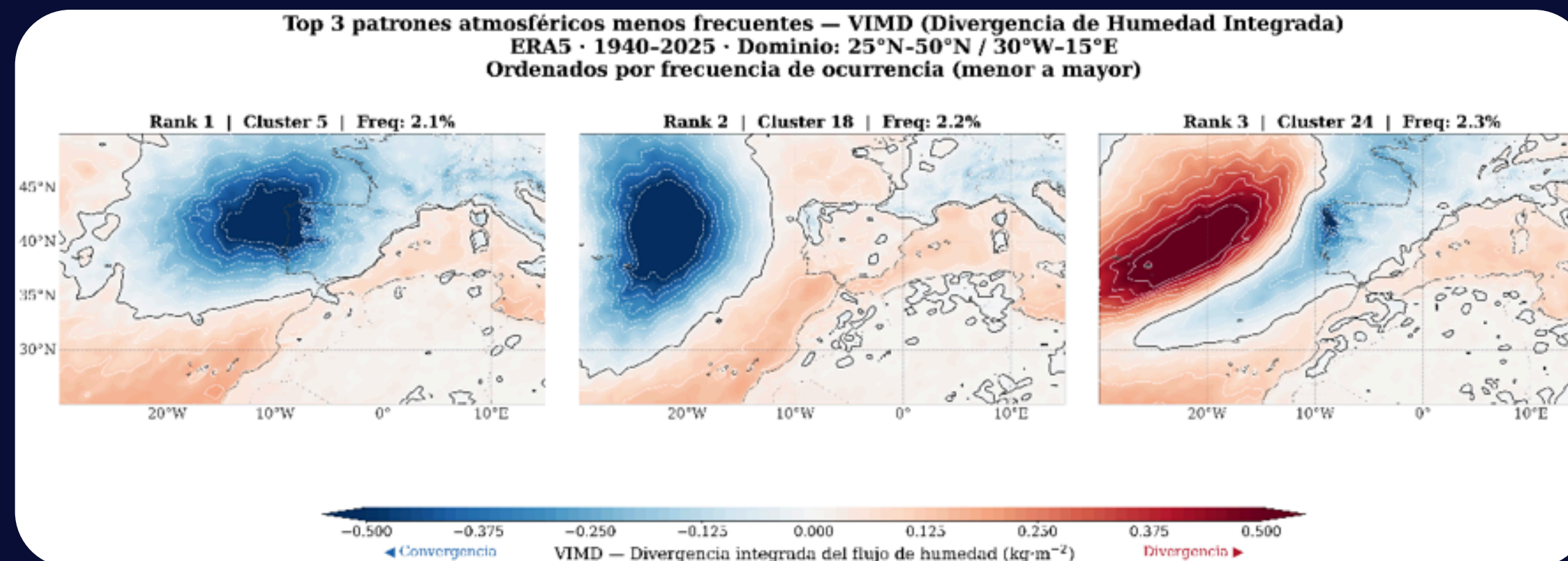
Figura 36: 25 escenarios dominantes del VIMD. Fuente: Elaboración propia usando Python.

VIMD: TOP 3 Patrones más y menos frecuentes

Más frecuentes



Menos frecuentes



Figuras 37 y 38. VIMD: patrones más y menos frecuentes. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Síntesis del apartado 4.3

Disponibilidad

TCWV aporta la dimensión de disponibilidad de humedad, mientras que VIMD aporta la dimensión de organización espacial de esa humedad.

Humedad moderada-seca

Los patrones más frecuentes durante el periodo de estudio se asocian con ambientes que no se caracterizan por presentar una notable cantidad de vapor de agua troposférica.

Peligrosidad combinada

La peligrosidad puede aumentar cuando coinciden una elevada disponibilidad de humedad, convergencia local y un forzamiento dinámico favorable.

4.4 Tendencias en TCWV y VIMD

Evolución diferenciada de la humedad

Se separa la evolución de la humedad disponible, representada por el TCWV, y la evolución de su convergencia o divergencia, representada por la VIMD. Así se distingue entre cantidad de vapor de agua y capacidad de concentración.

TCWV como combustible termodinámico

El TCWV permite comprobar si la atmósfera ha ganado combustible termodinámico durante 1940-2025. Su tendencia ayuda a valorar si existe más vapor de agua potencialmente disponible para episodios de precipitación intensa.

VIMD y organización de la humedad

La VIMD permite evaluar si el aumento de humedad se traduce en convergencia organizada o en señales más locales y fragmentadas. Esto es clave para interpretar la activación convectiva asociada a DANAs.

TCWV: tendencias por *clusters*

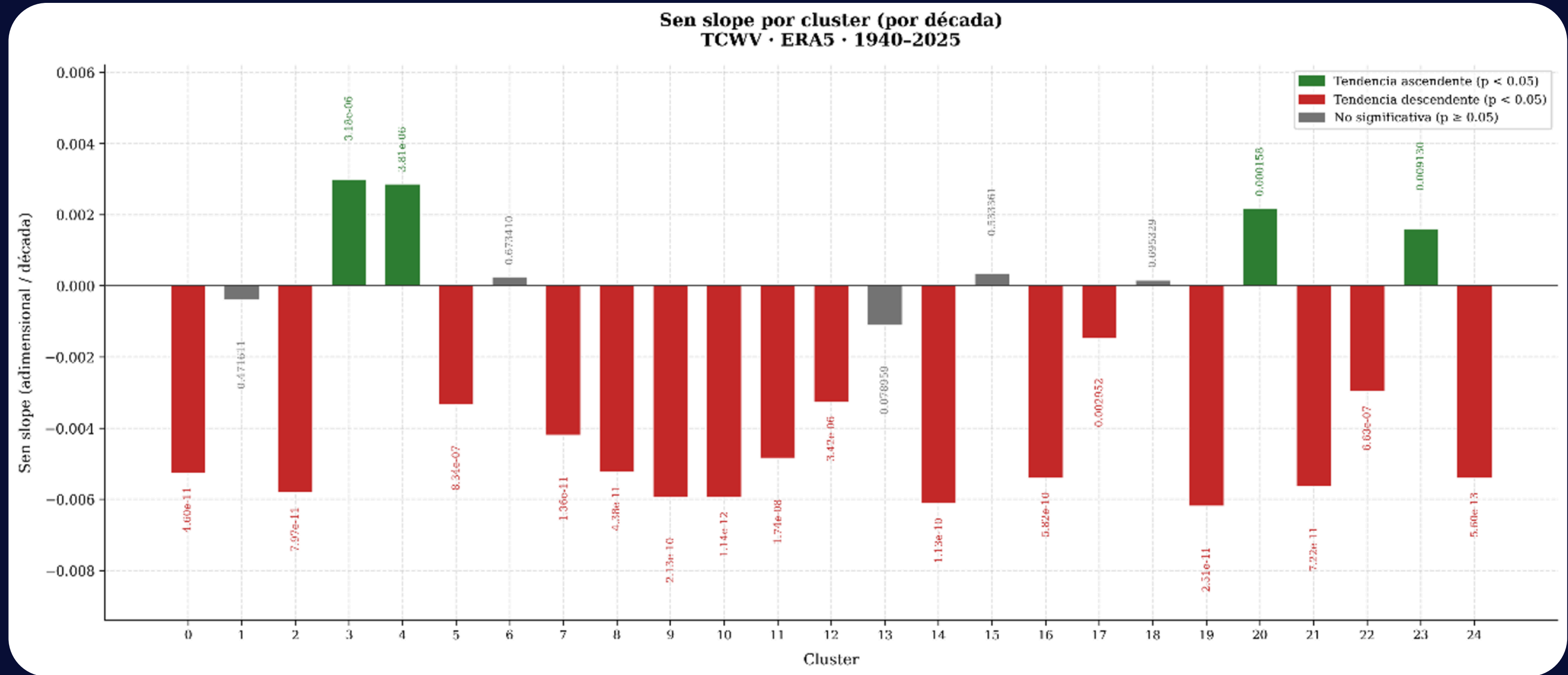
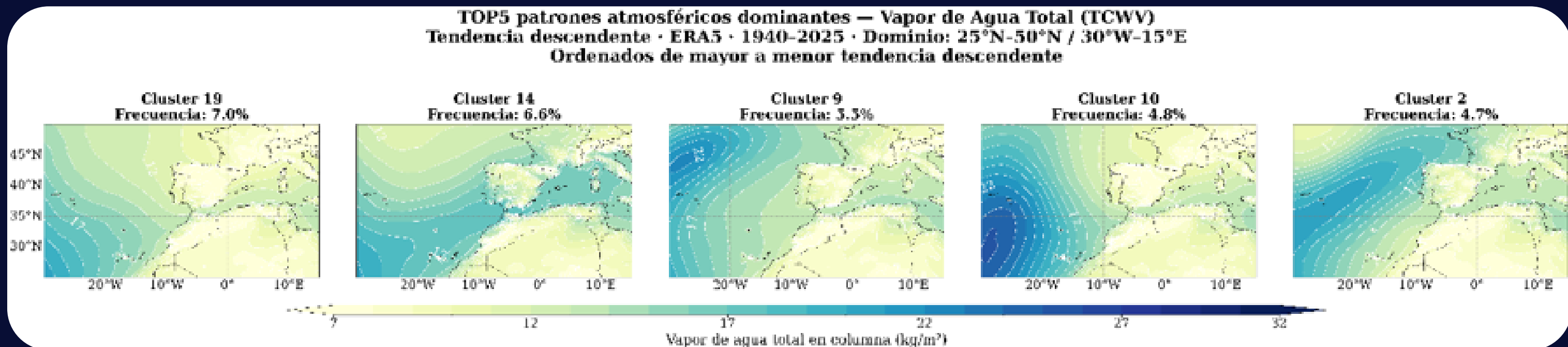
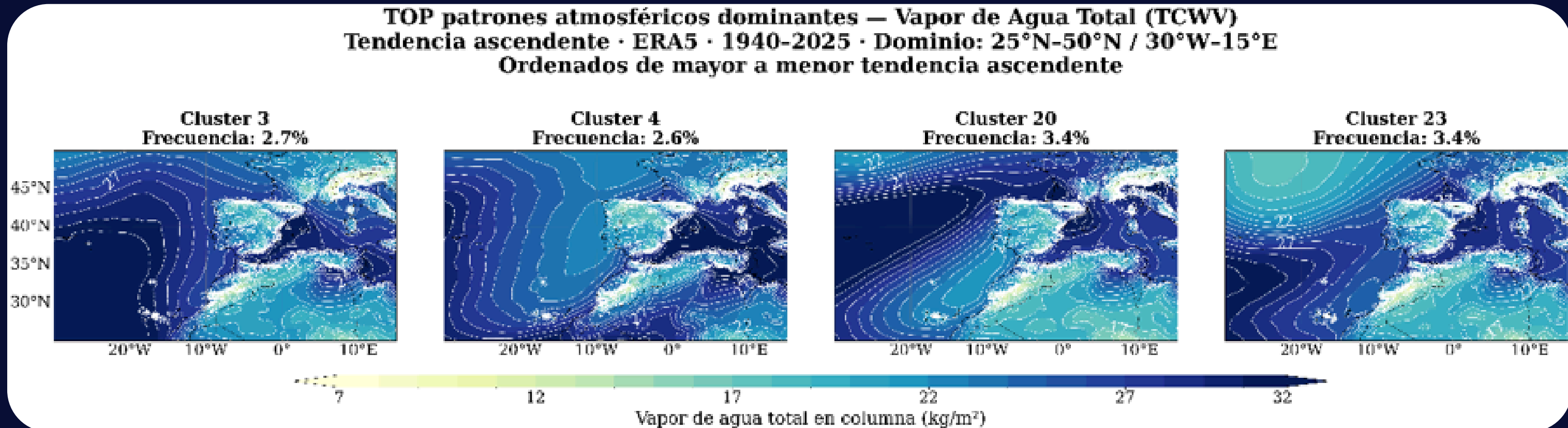


Figura 39. Pendiente de Sen por década de los 25 clusters del TCWV durante el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

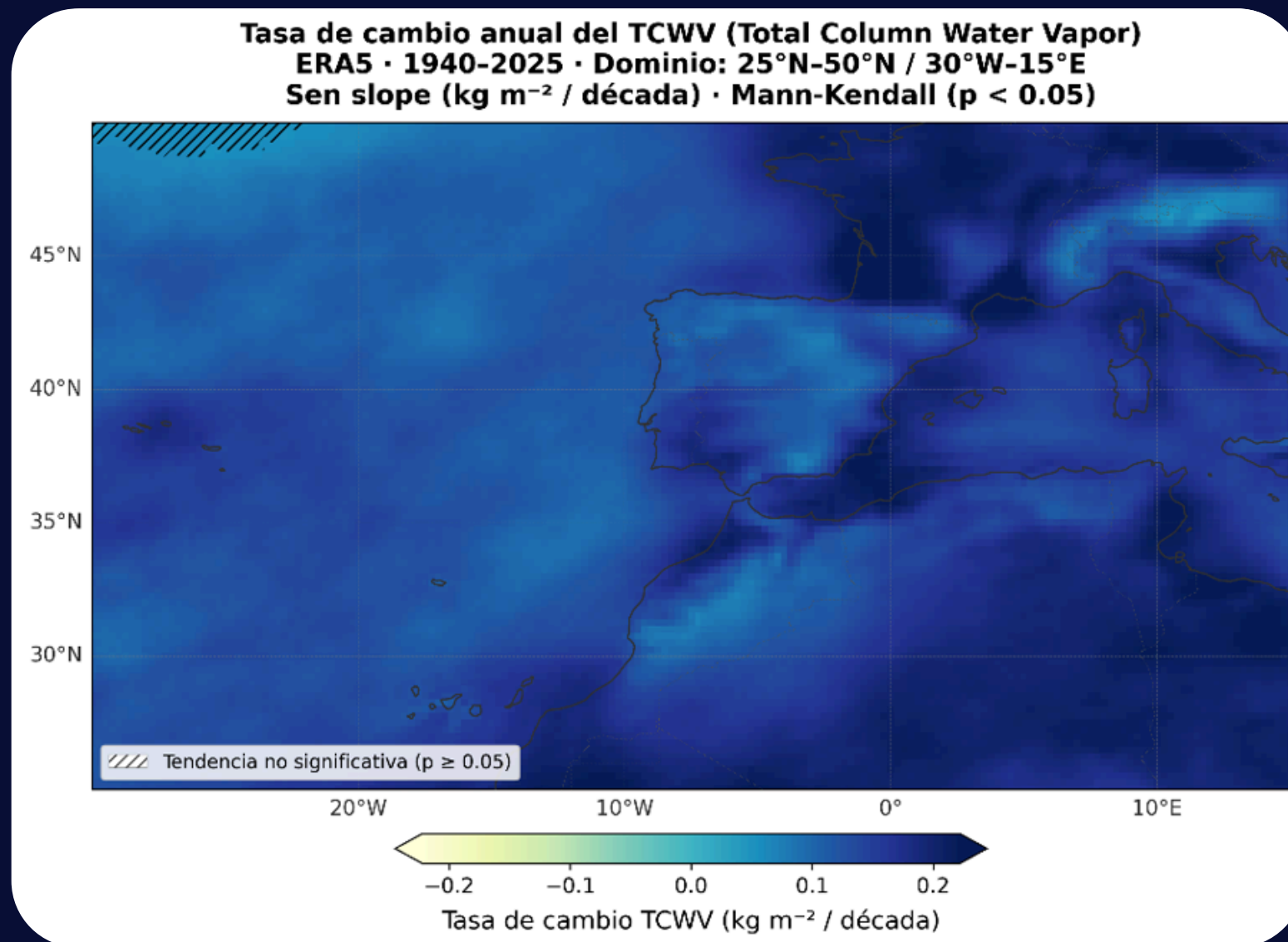
TCWV: TOP *clusters* con tendencia positiva/negativa



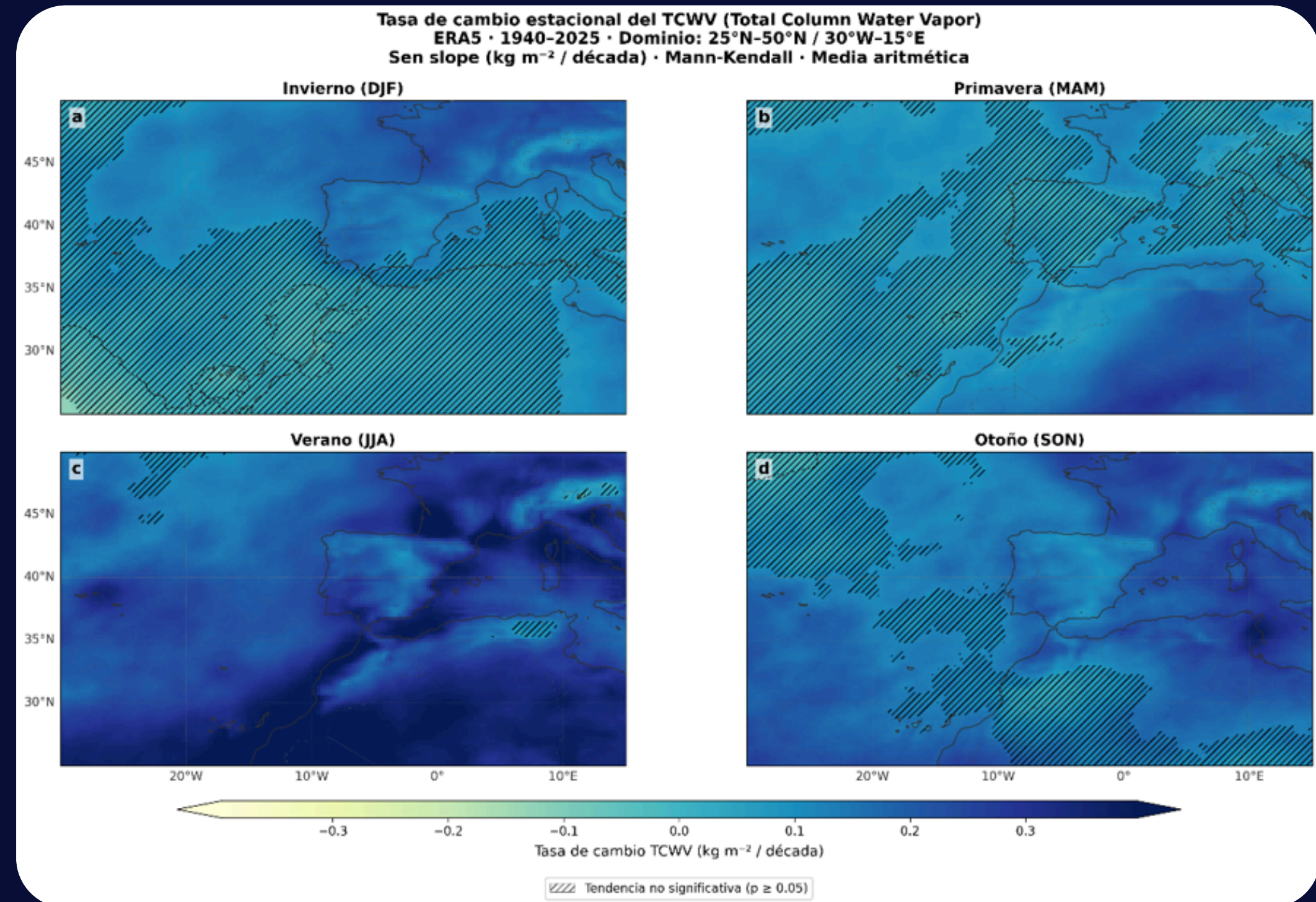
Figuras 40 y 41. TCWV: mayor y menor tendencia. Fuente: Elaboración propia usando Python.

TCWV: tasa de cambio anual y estacional

Anual



Estacional



Figuras 42 y 43. TCWV: tasa de cambio anual y estacional. Fuente: Elaboración propia usando Python.

VIMD: tendencias por *clusters*

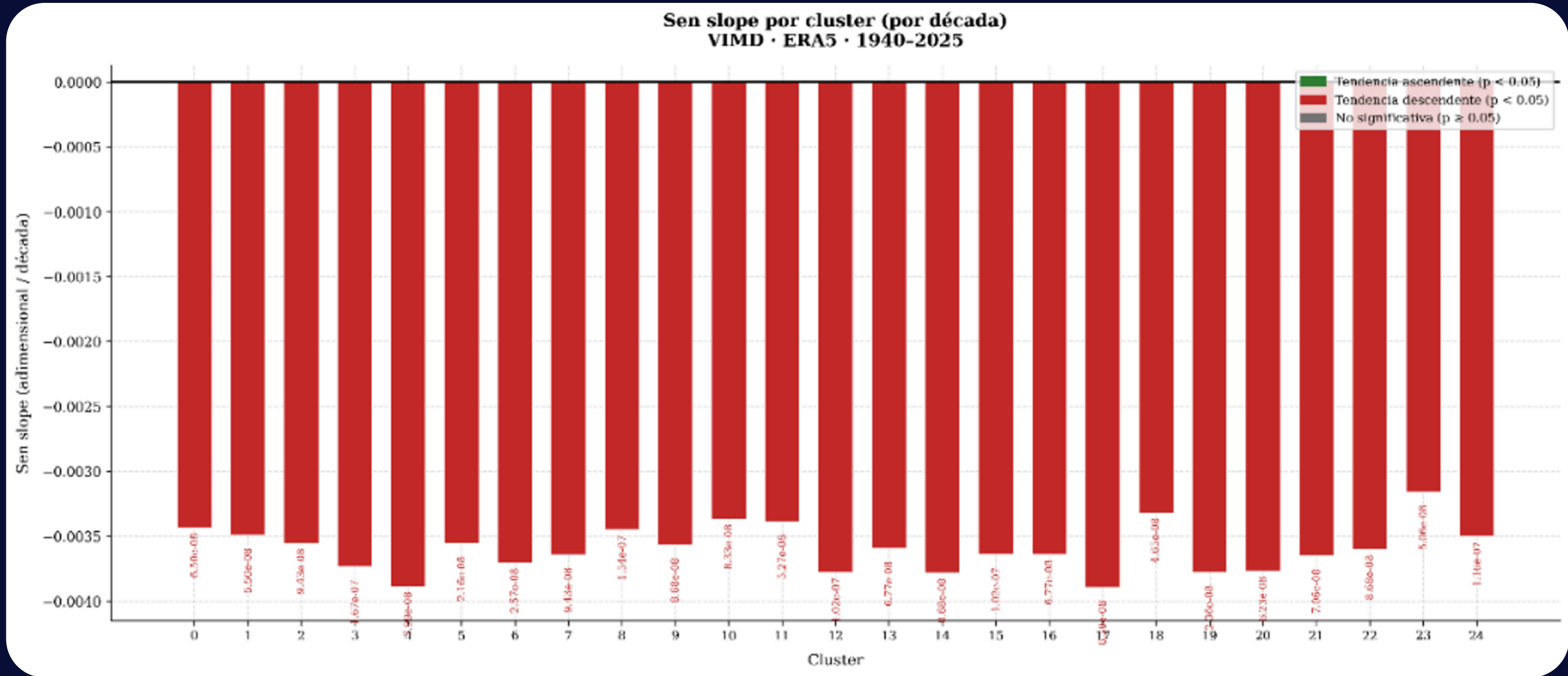
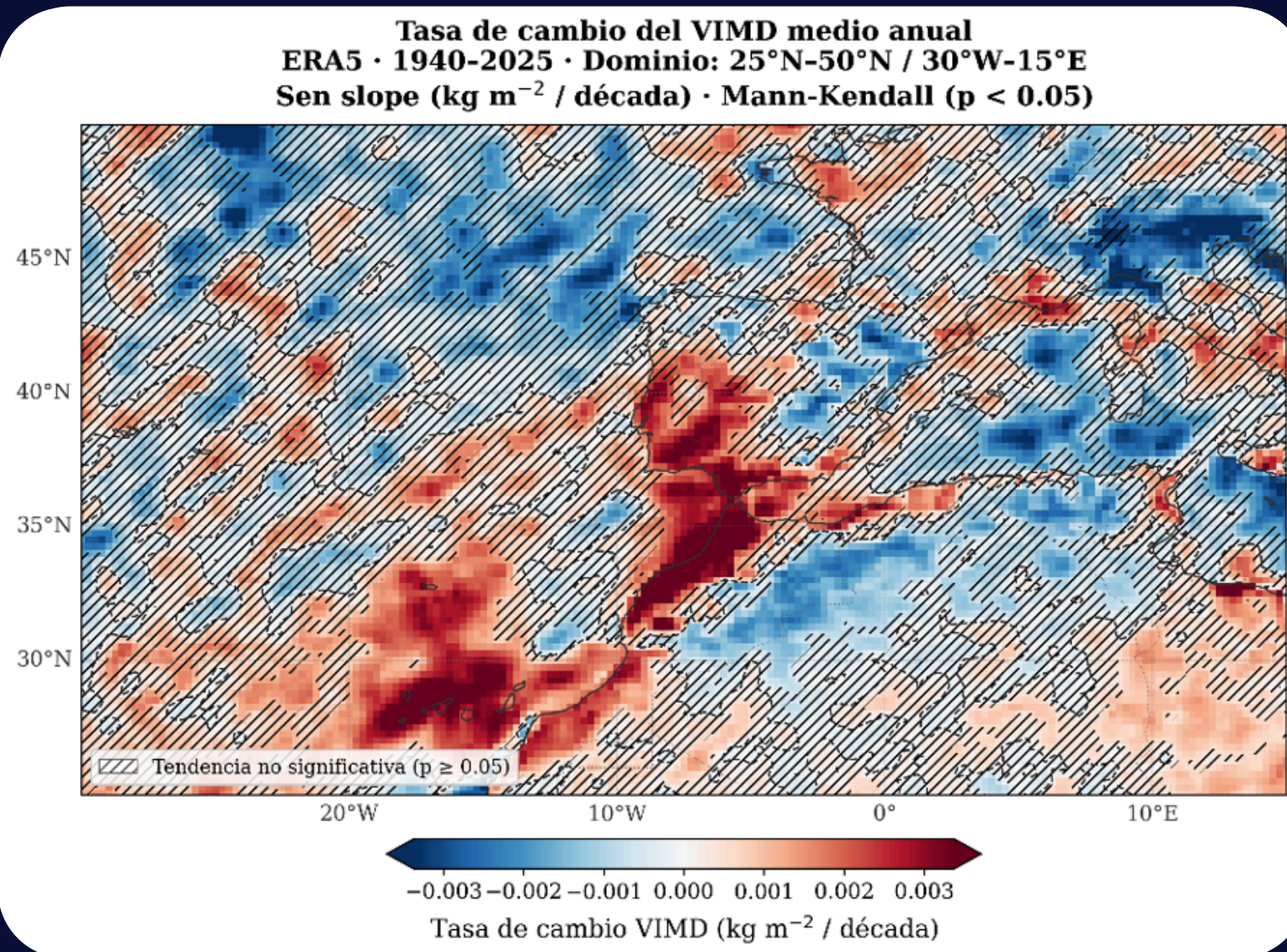


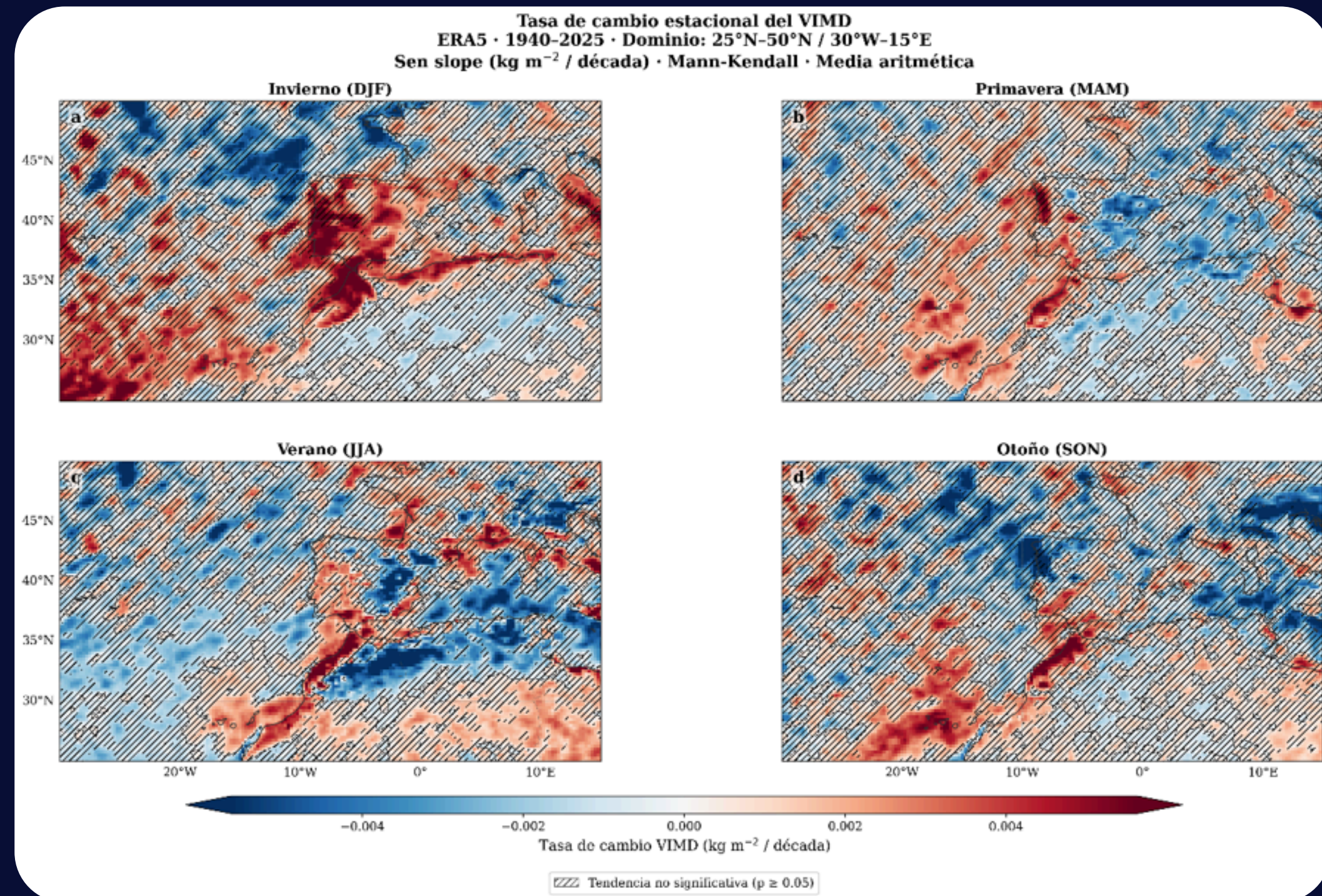
Figura 44. Pendiente de Sen por década de los 25 clusters del VIMD durante el periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia usando Python.

VIMD: tasa de cambio anual y estacional

Anual



Estacional



Figuras 45 y 46. VIMD: tasa de cambio anual y estacional. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Síntesis del apartado 4.4

Vapor de agua en aumento

El TCWV aumenta de forma clara: la atmósfera regional dispone de más combustible termodinámico.

Convergencia más local

La VIMD apunta a una organización más local y fragmentada, no a una convergencia sinóptica homogénea.

Peligrosidad futura

La peligrosidad futura depende de la coincidencia entre humedad disponible, convergencia local y dinámica favorable.

4.5 Correspondencia geopotencial frente al TCWV

Cruce entre dinámica y humedad

Se cruzan por fecha los *clusters* de geopotencial y TCWV para analizar qué escenarios dinámicos coinciden con qué escenarios de humedad.

Matrices de correspondencia

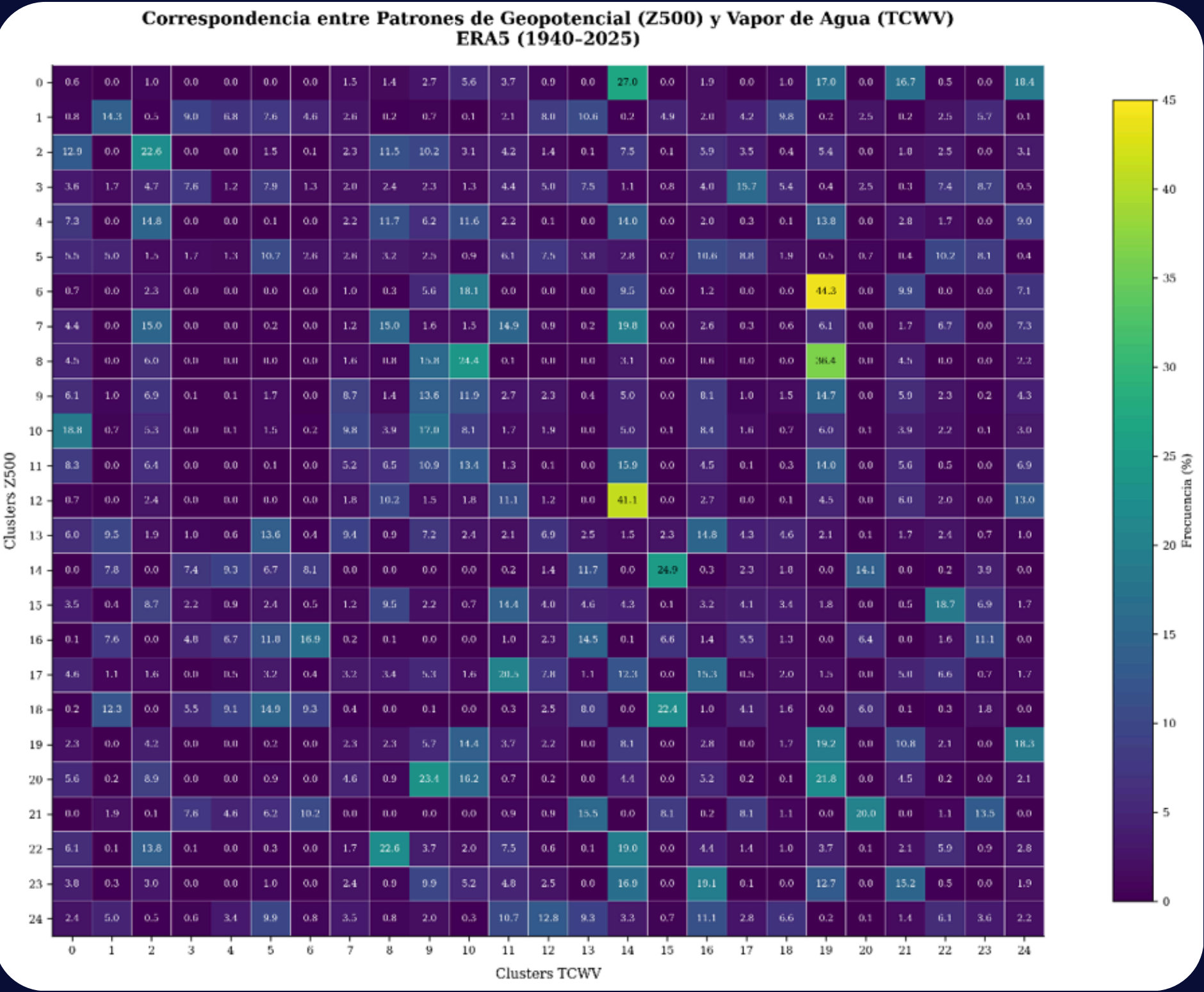
Las matrices 25 x 25 permiten valorar la relación entre circulación y vapor de agua. El TOP10 resume las asociaciones principales.

Evolución de las combinaciones

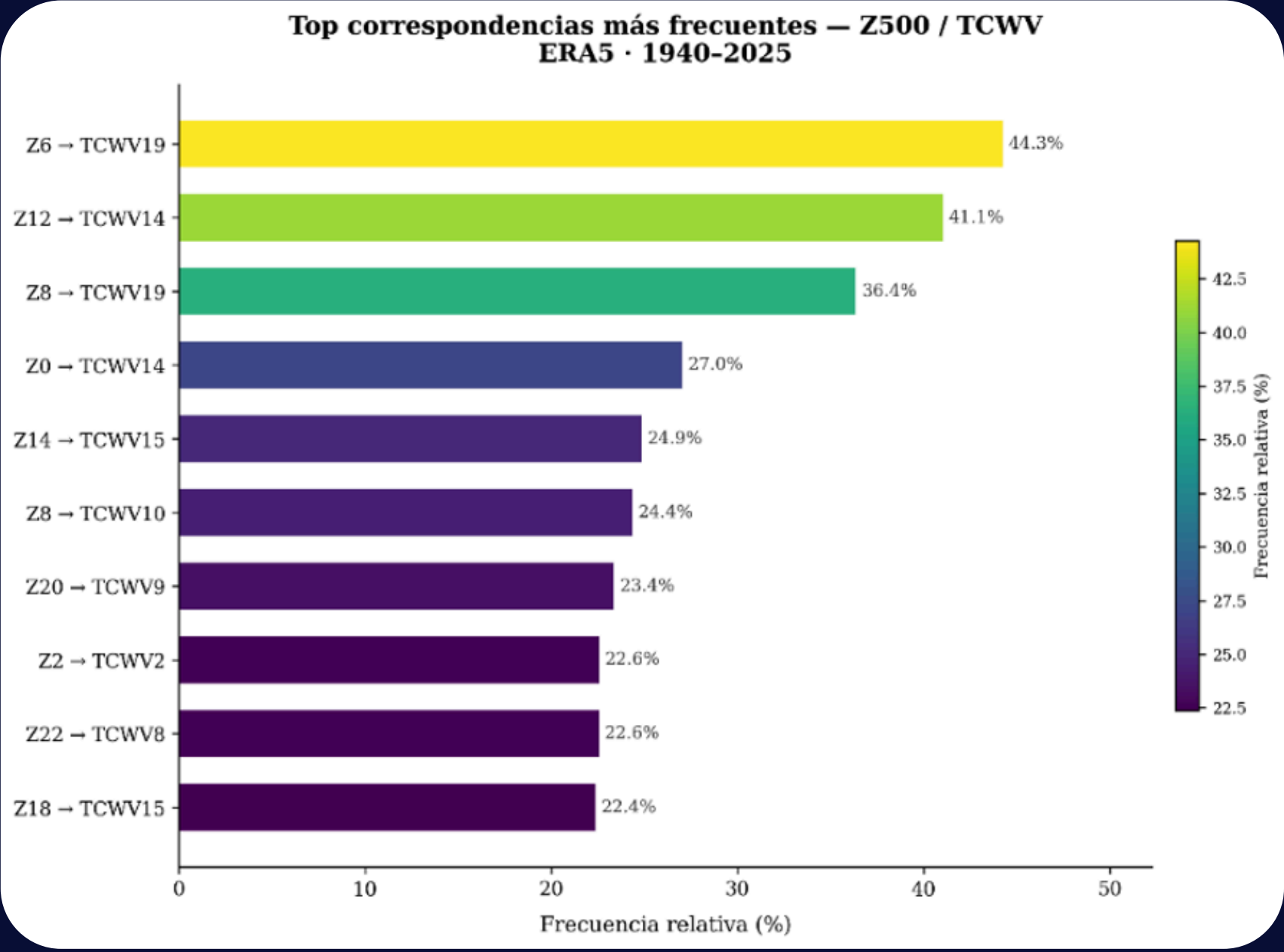
La evolución temporal permite comprobar si esas combinaciones tradicionales ganan o pierden representatividad.

Z500 vs TCWV: matriz y TOP10

MATRIZ



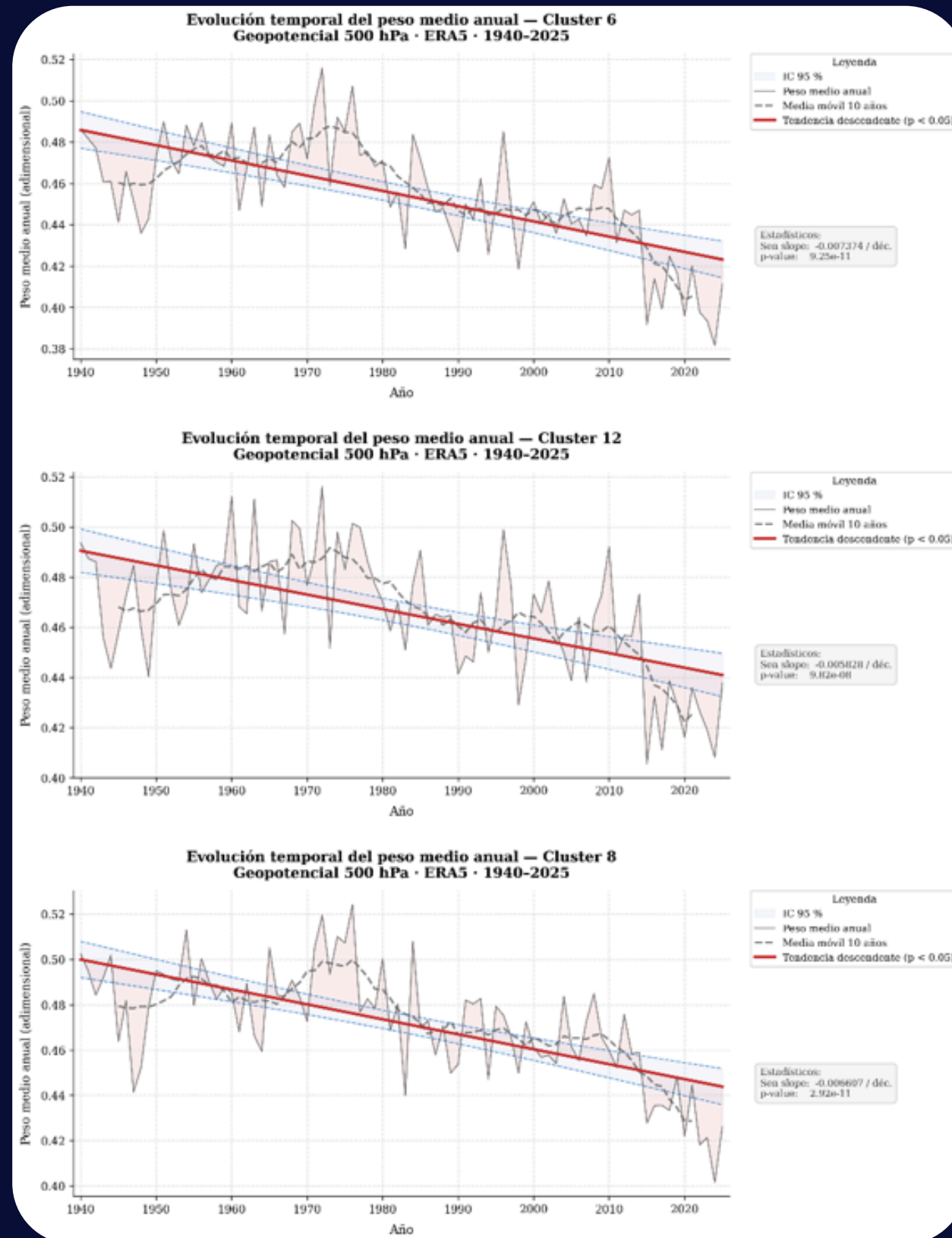
TOP 10



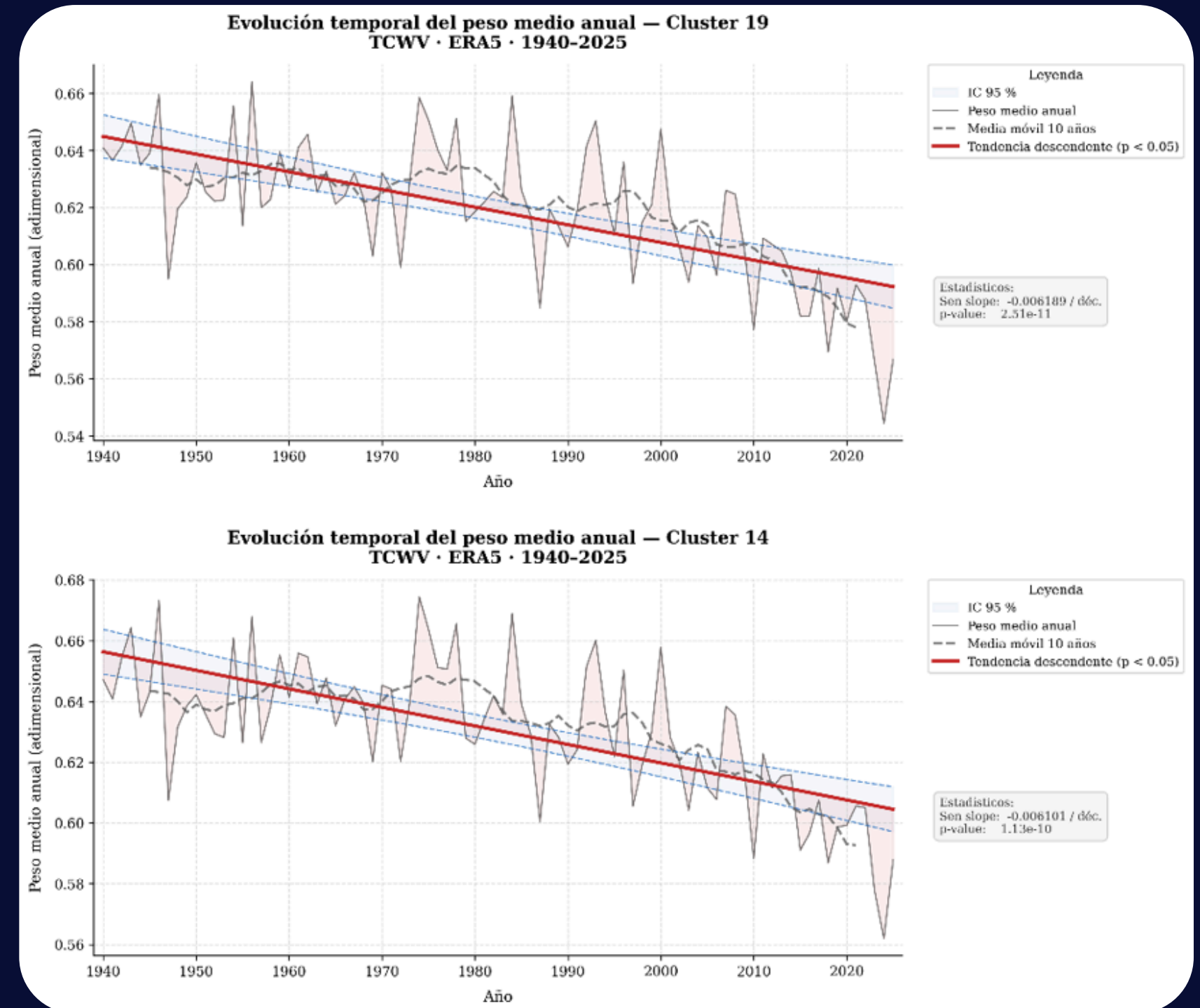
Figuras 47 y 48. Z500 vs TCWV: matriz y TOP10. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z500 vs TCWV: evolución temporal

Clusters Z500



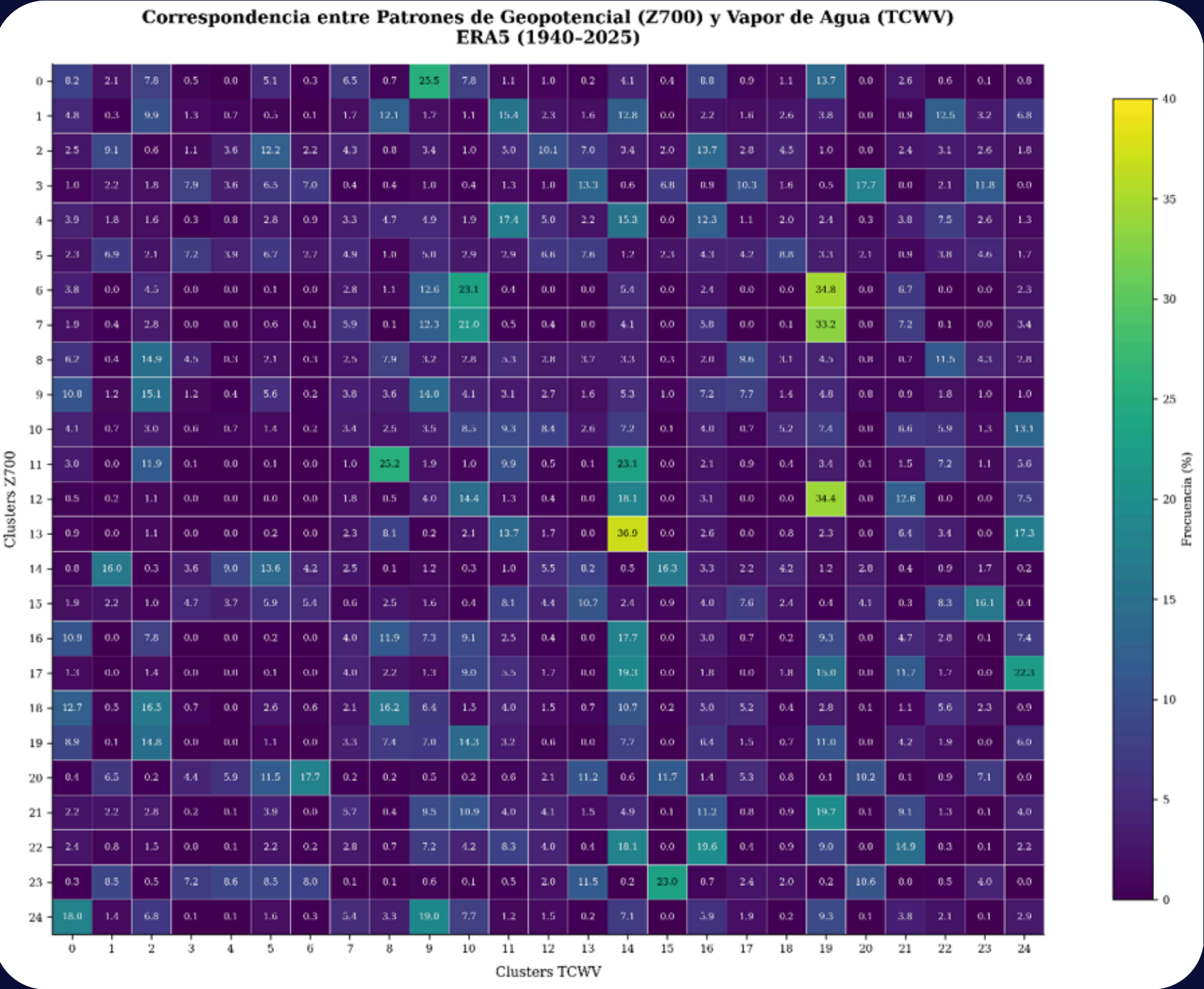
Clusters TCWV



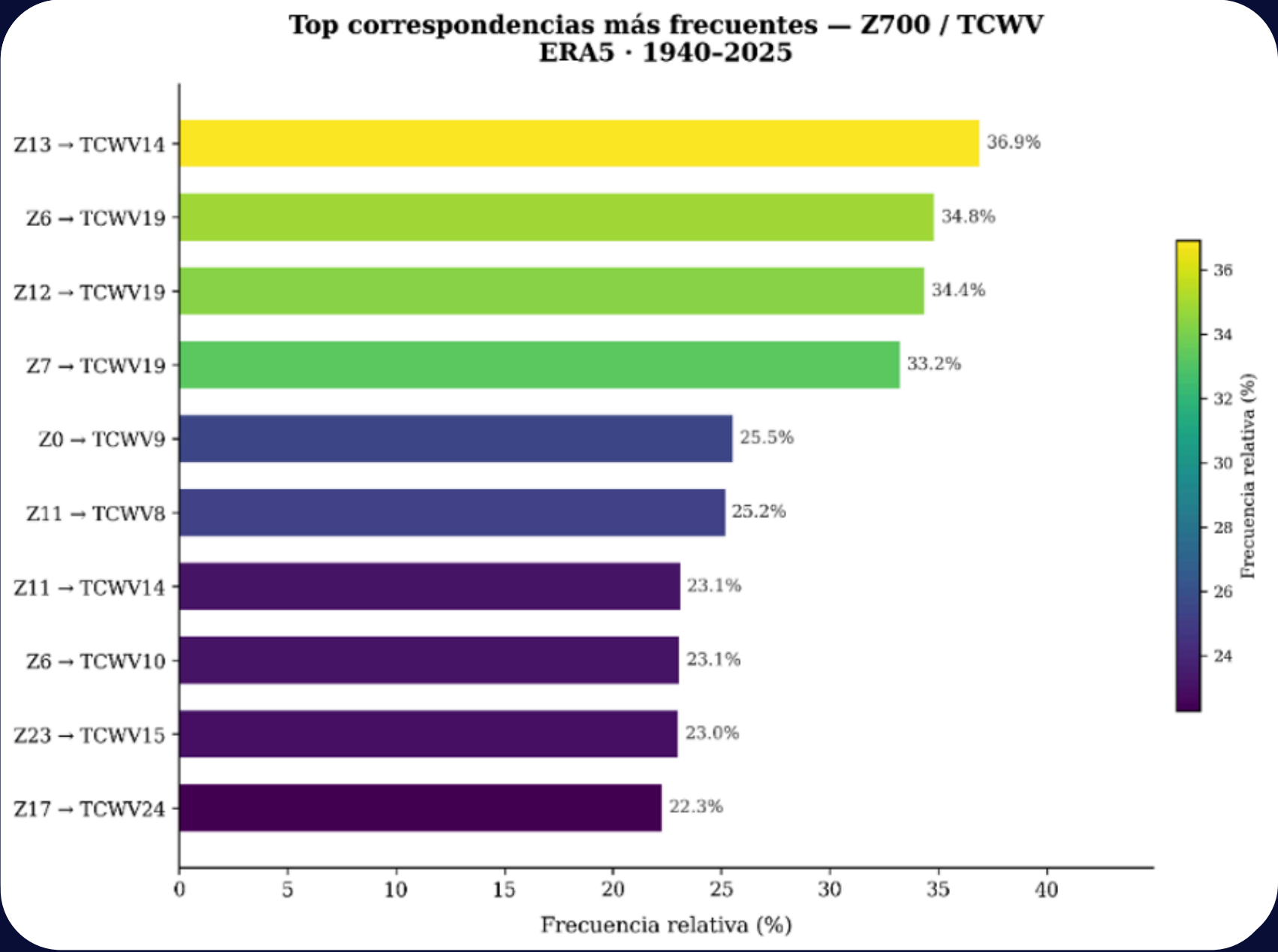
Figuras 49 y 50. Z500 vs TCWV: evolución temporal. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700 vs TCWV: matriz y TOP10

MATRIZ



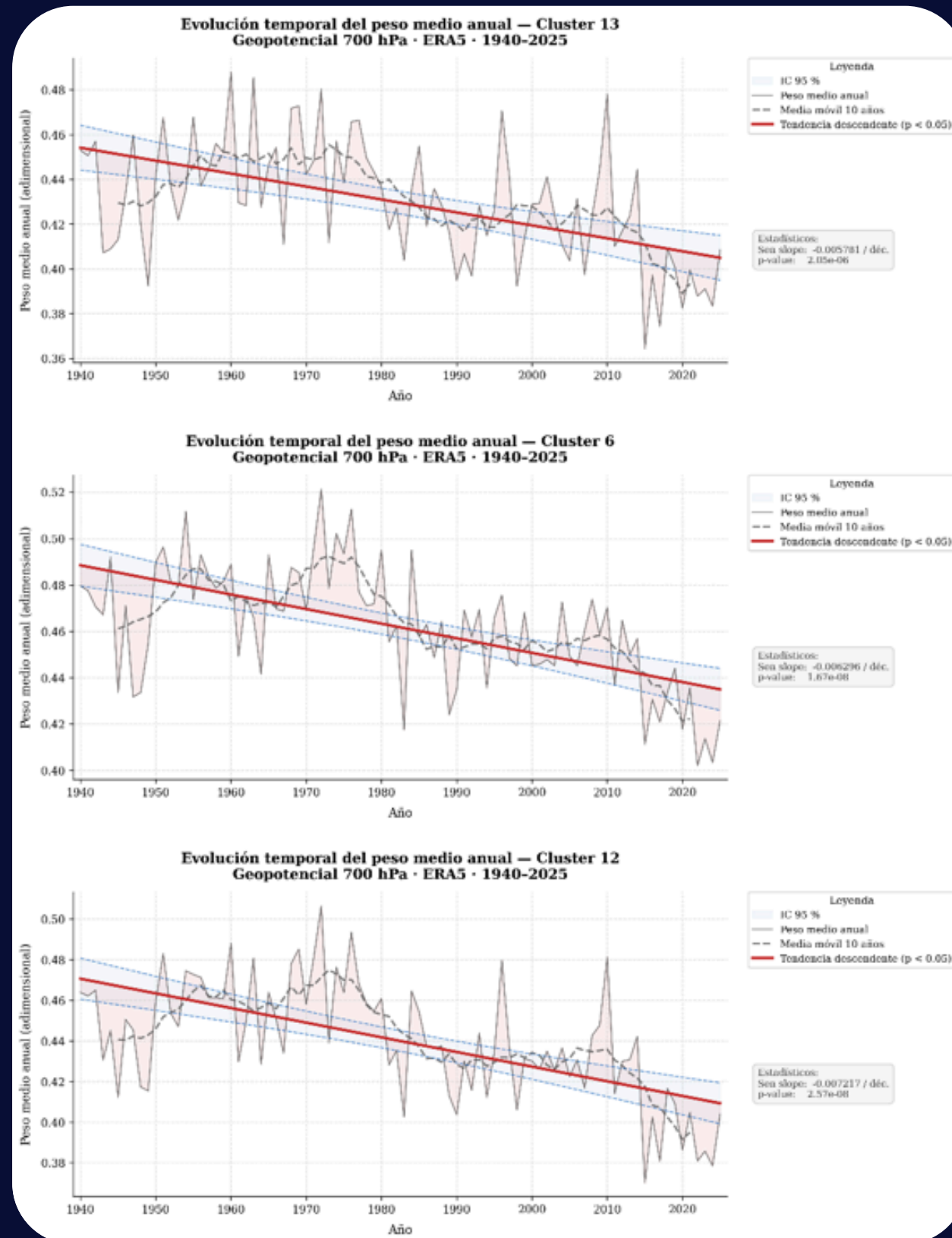
TOP 10



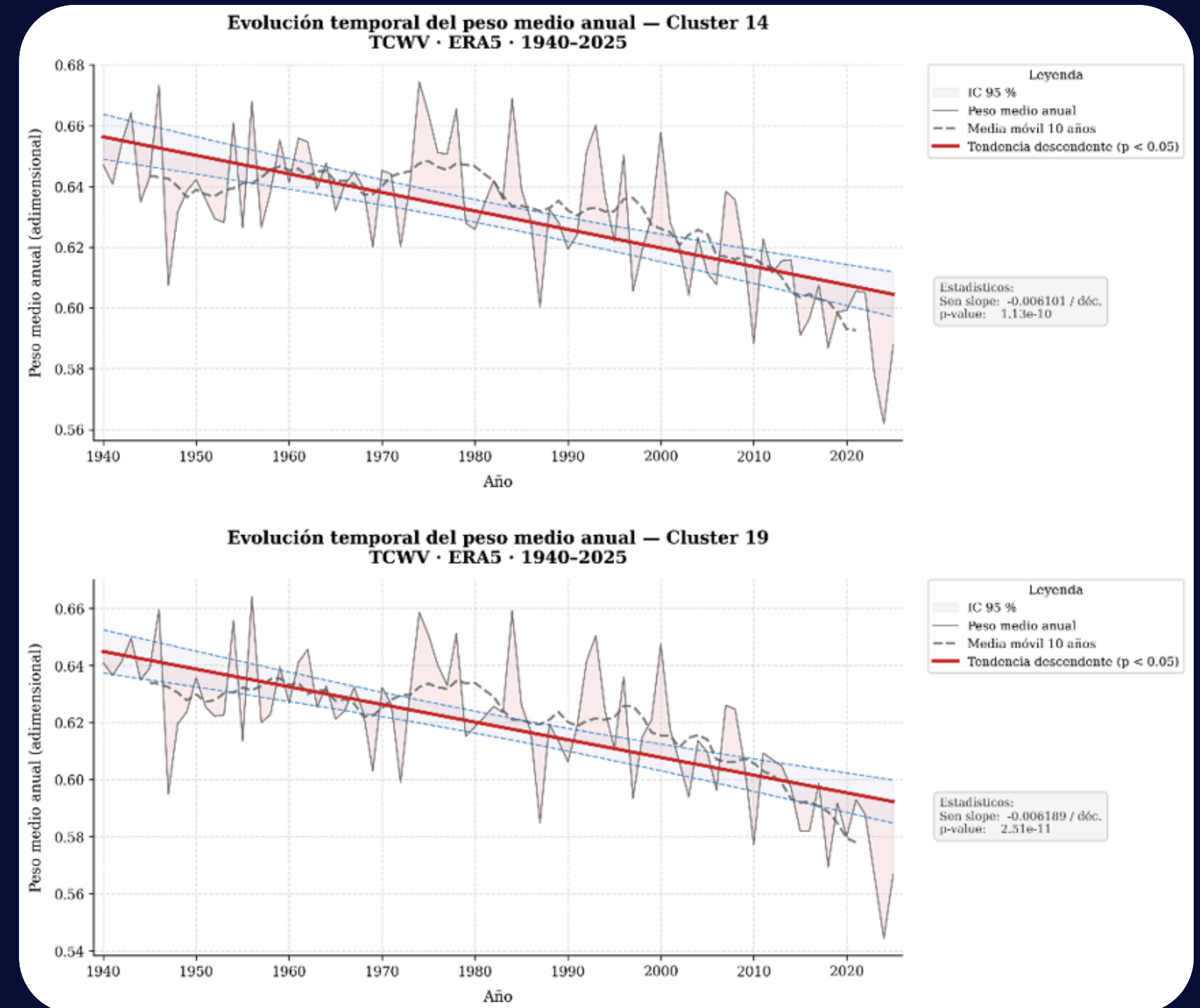
Figuras 51 y 52. Z700 vs TCWV: matriz y TOP10. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z700 vs TCWV: evolución temporal

Clusters Z700



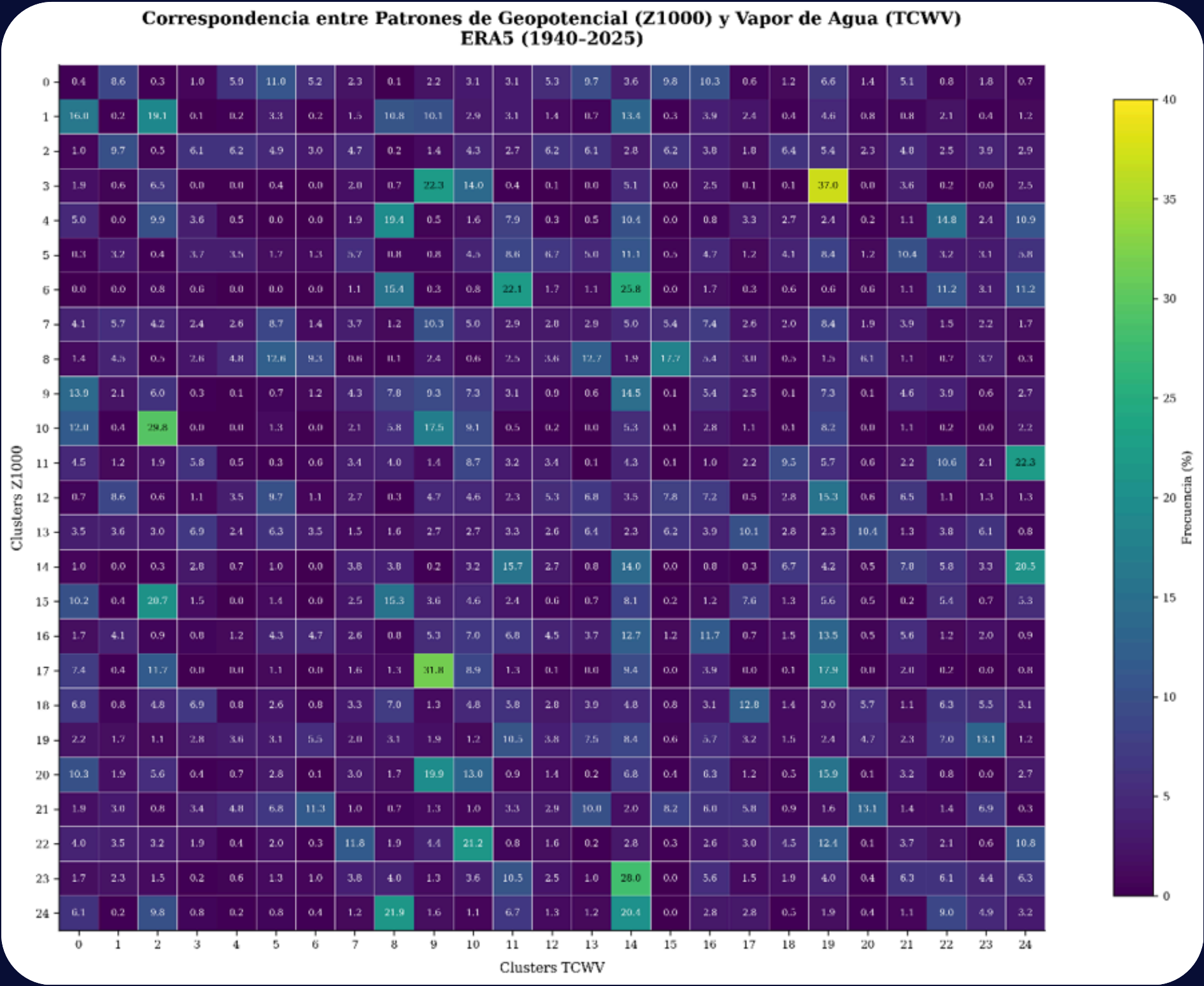
Clusters TCWV



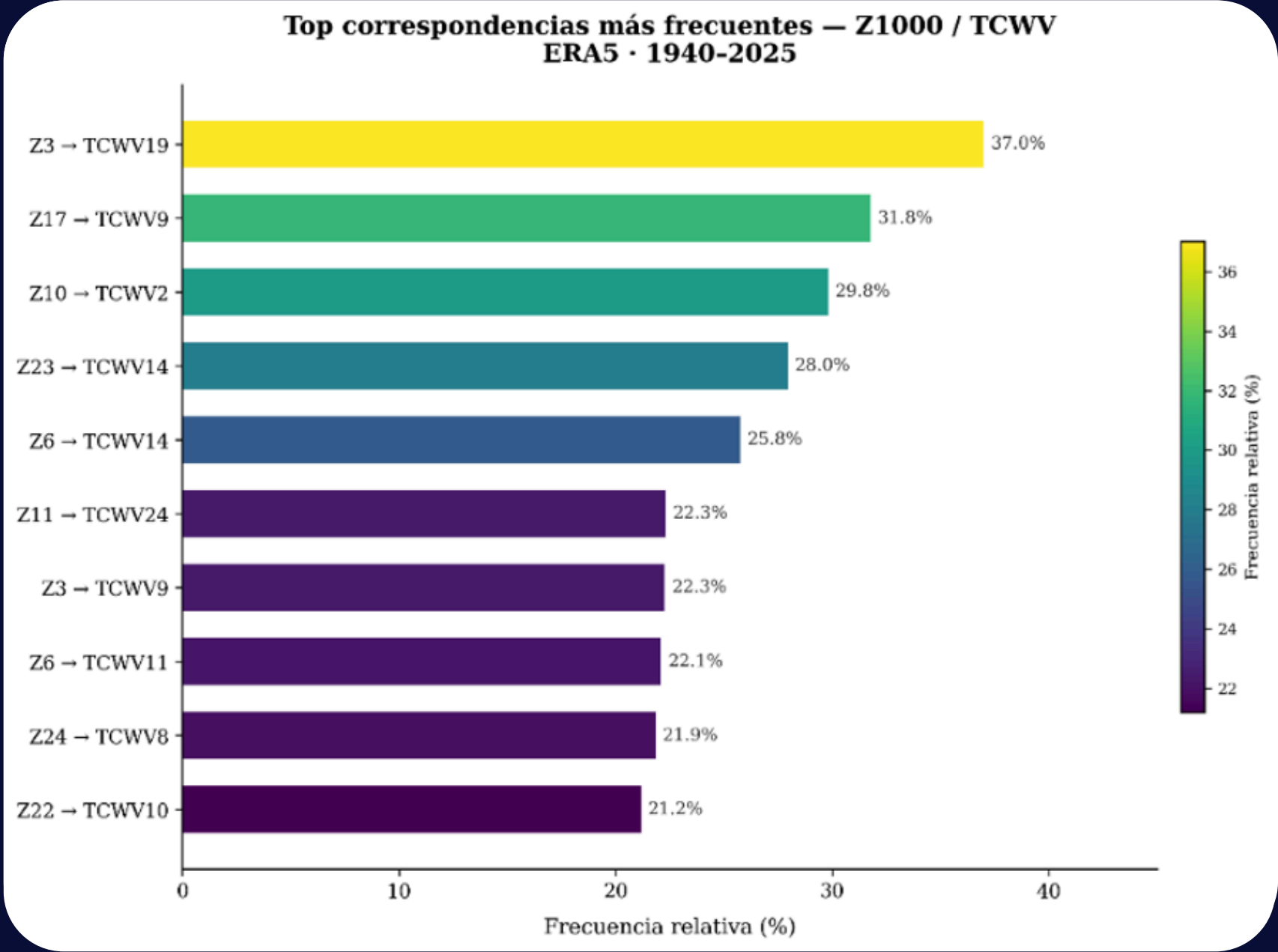
Figuras 53 y 54. Z700 vs TCWV: evolución temporal. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000 vs TCWV: matriz y TOP10

MATRIZ



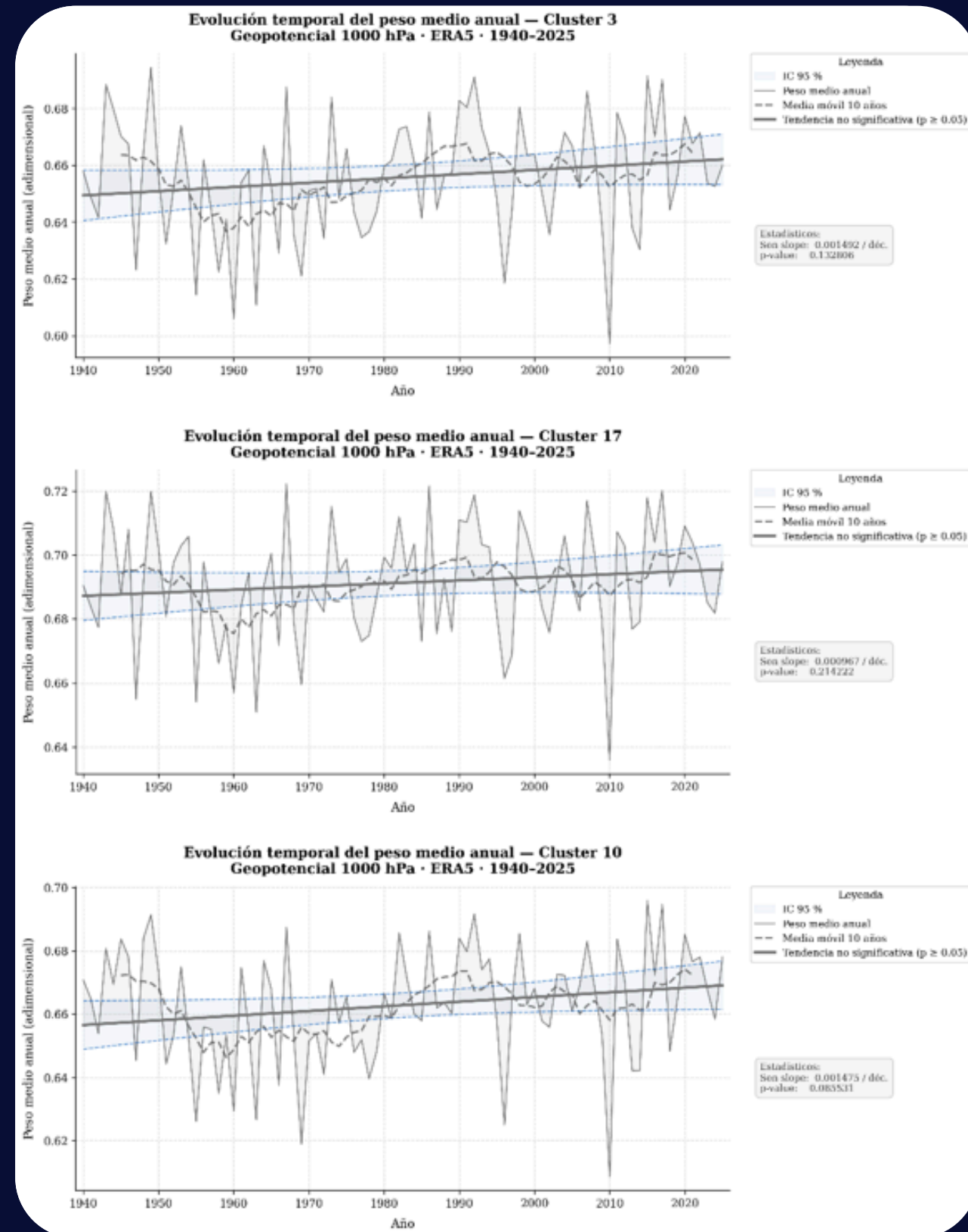
TOP 10



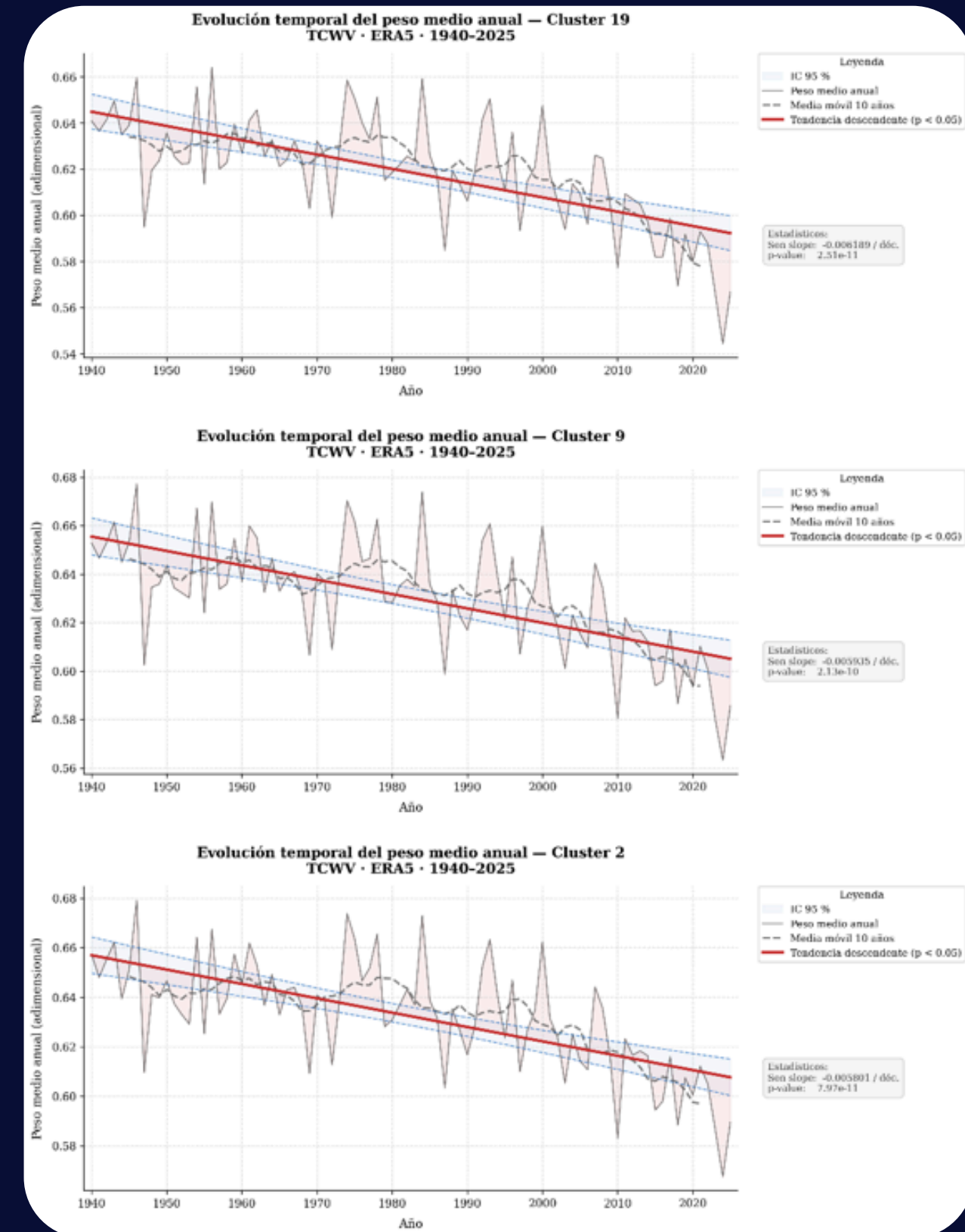
Figuras 55 y 56. Z1000 vs TCWV: matriz y TOP10. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Z1000 vs TCWV: evolución temporal

Clusters Z1000



Clusters TCWV



Figuras 57 y 58. Z1000 vs TCWV: evolución temporal. Fuente: Elaboración propia usando Python.

Síntesis del apartado 4.5

TCWV19 como patrón transversal

TCWV19 aparece en 5 de las 9 combinaciones TOP3 entre Z500/Z700/Z1000 y TCWV, por lo que actúa como patrón transversal de correspondencia frecuente.

Escenario moderado-seco dominante

Aun así, TCWV19 representa un escenario moderado-seco. Los patrones más húmedos ganan presencia (apartado 4.4), pero no dominan las correspondencias clásicas con geopotenciales.

Desacoplamiento dinámico-termodinámico

El resultado es compatible con una lectura de desacoplamiento dinámico-termodinámico entre circulación sinóptica tradicional y disponibilidad de humedad.

4.6 Origen de las masas de aire: *HYSPLIT*

Cálculo de retrotrayectorias

HYSPLIT se utiliza para calcular retrotrayectorias de 72 horas de los *clusters* de TCWV con mayor interés, a partir de los tres días con mayor peso diario asociado al patrón.

Punto de llegada y alturas

El punto de llegada se fija en Madrid, con alturas de 0, 1500 y 3300 m, para distinguir aportes en distintos niveles de la columna.

Clusters de interés

TCWV19: conexión más frecuente (5/9) con los geopotenciales.
TCWV3, TCWV4, TCWV20, TCWV23: patrones de vapor de agua con tendencia ascendente significativa.

TCWV19: TOP 3 días con mayor peso diario



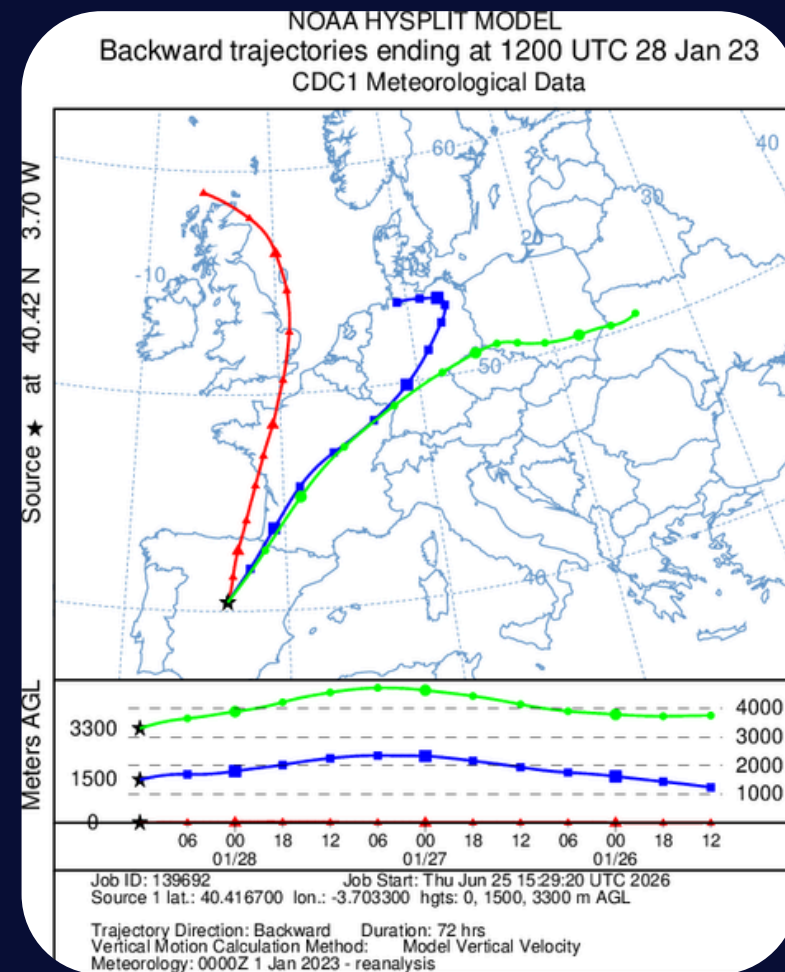
Componente	Día	UTC	Peso
TCWV19	28/01/2023	12:00	0,917
	18/03/1998		0,911
	04/02/1986		0,908

Selección de los días más representativos para el cálculo de retrotrayectorias *HYSPLIT*.

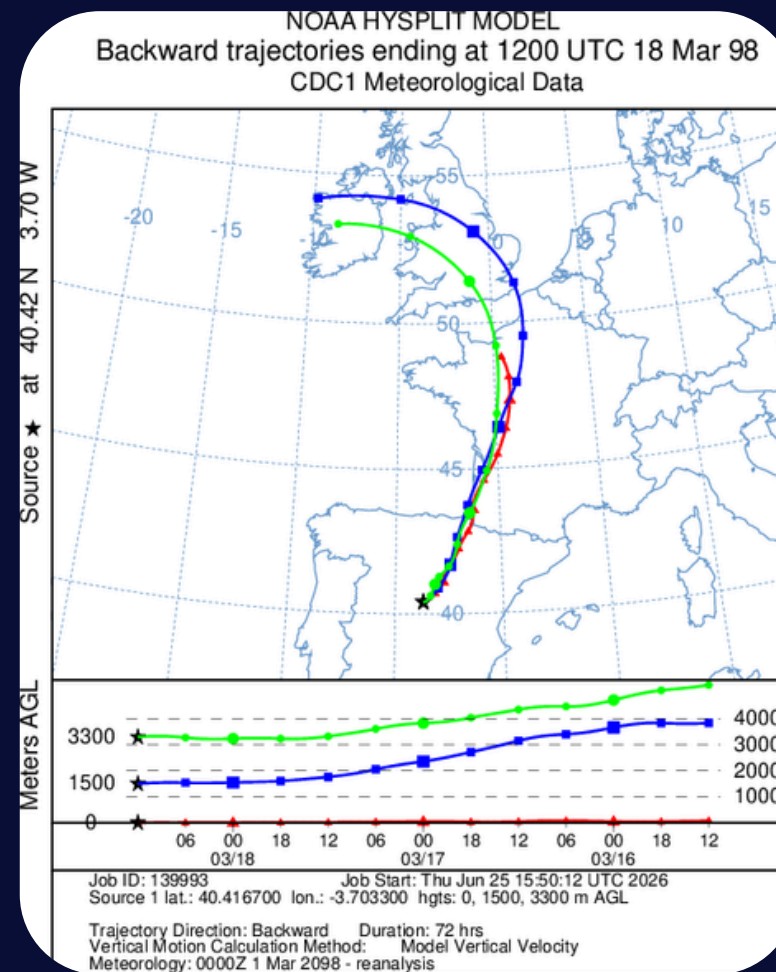
Tabla 6. Tres días con mayor peso diario para el cluster 19 del TCWV, usados para HYSPLIT. Fuente: Elaboración propia.

TCWV19: retrotrayectorias y mapas sinópticos

28/01/2023 - 0,917



18/03/1998 - 0,911



04/02/1986 - 0,908

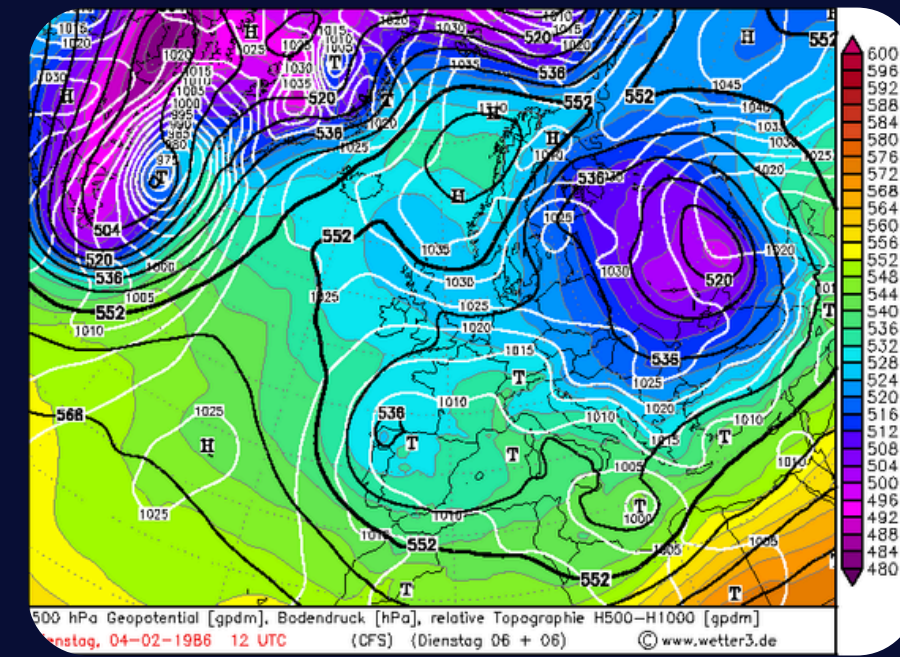
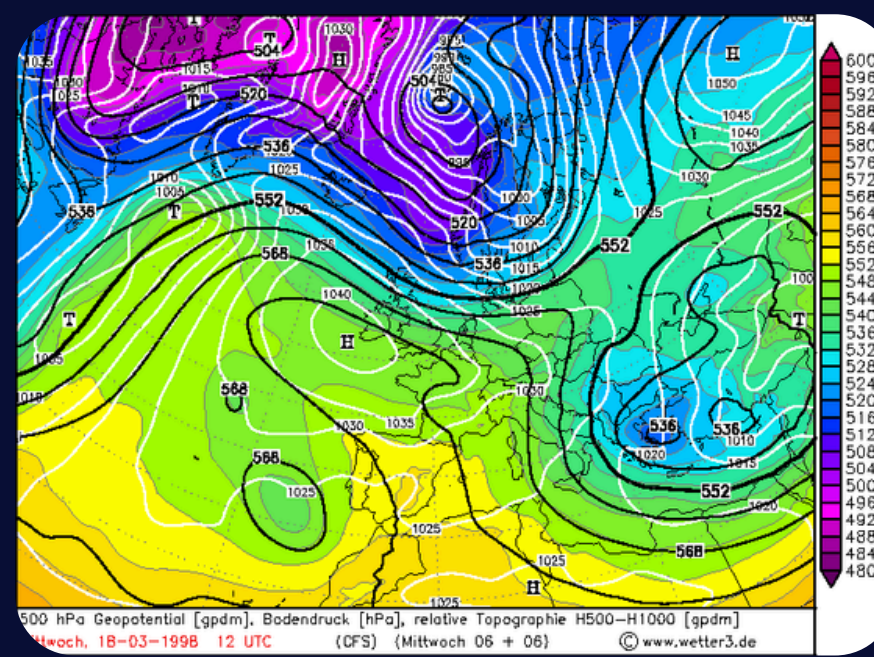
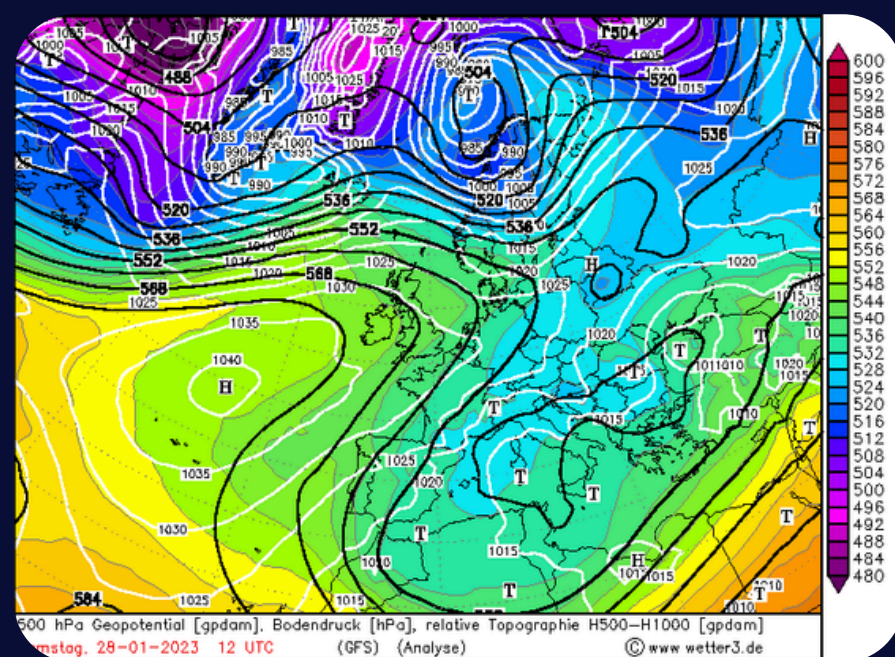
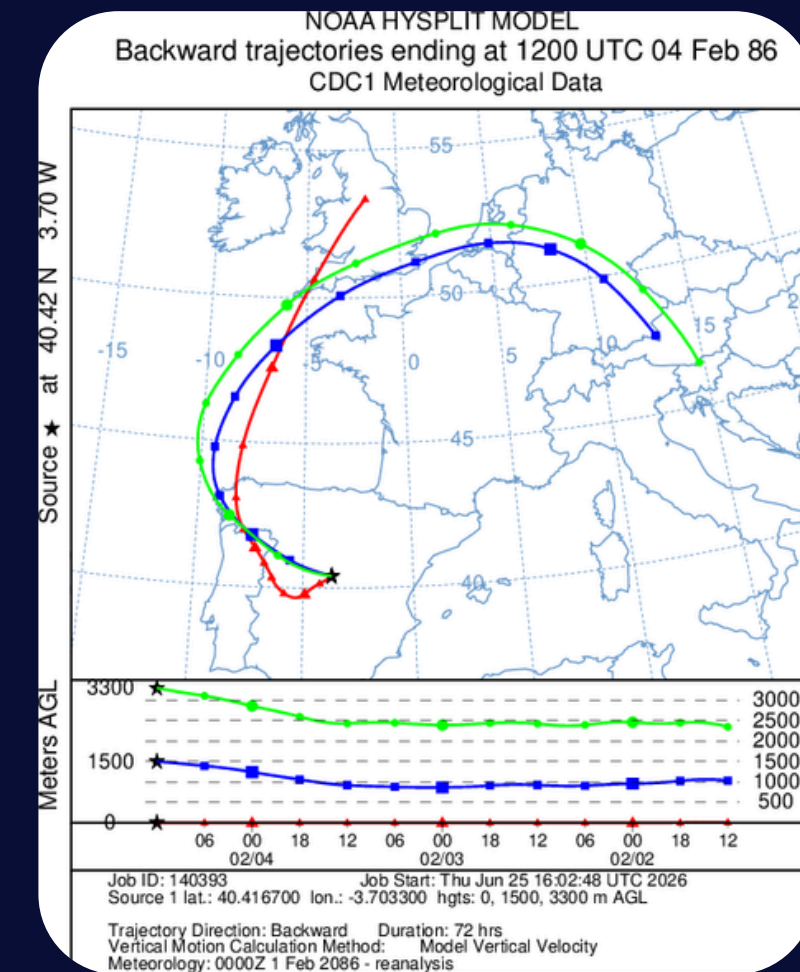


Figura 59: Retrotrayectorias HYSPLIT y mapas sinópticos para los tres días con mayor peso de similitud diario durante el periodo de estudio para el TCWV19. Fuente: NOAA ARL READY/HYSPLIT y www.wetter3.de.

TCWV3: TOP 3 días con mayor peso diario



Componente	Día	UTC	Peso
TCWV3	22/08/1949	12:00	0,767
	16/09/1981		0,766
	03/09/1991		0,762

Selección de los días más representativos para el cálculo de retrotrayectorias *HYSPLIT*.

Tabla 7. Tres días con mayor peso diario para el cluster 3 del TCWV, usados para HYSPLIT. Fuente: Elaboración propia.

TCWV3: retrotrayectorias y mapas sinópticos



22/08/1949 - 0,767



16/09/1981 - 0,766

03/09/1991 - 0,762

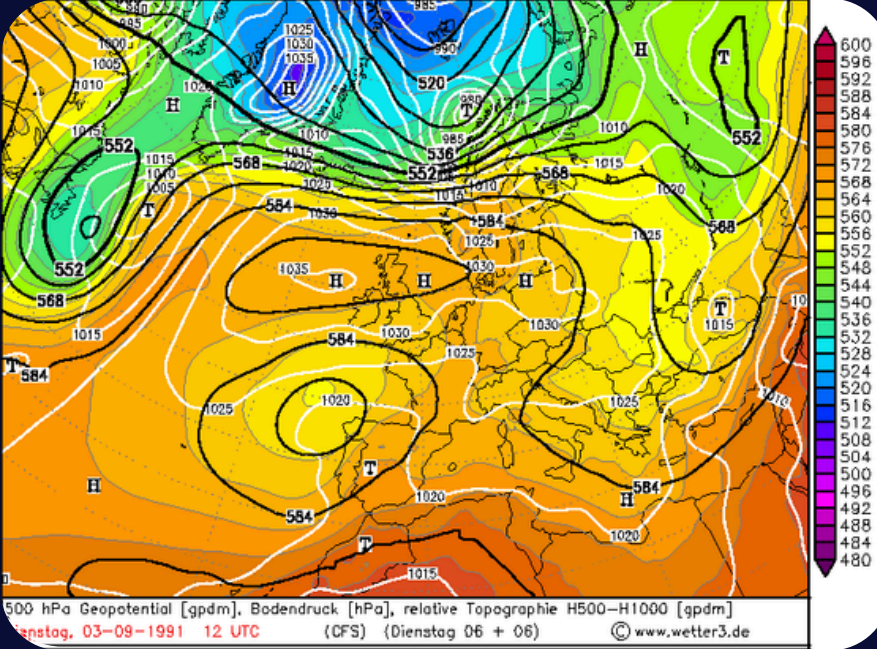
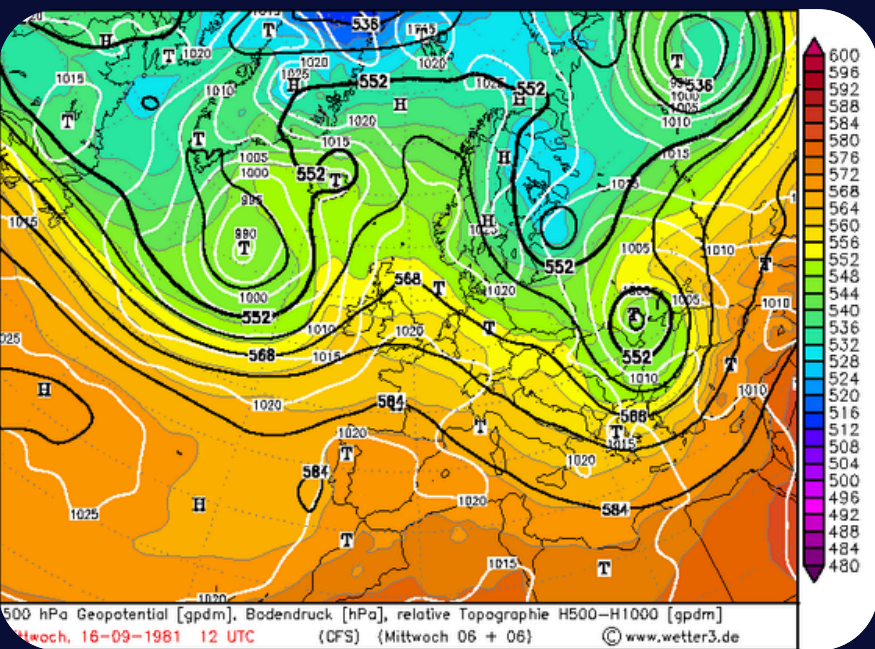
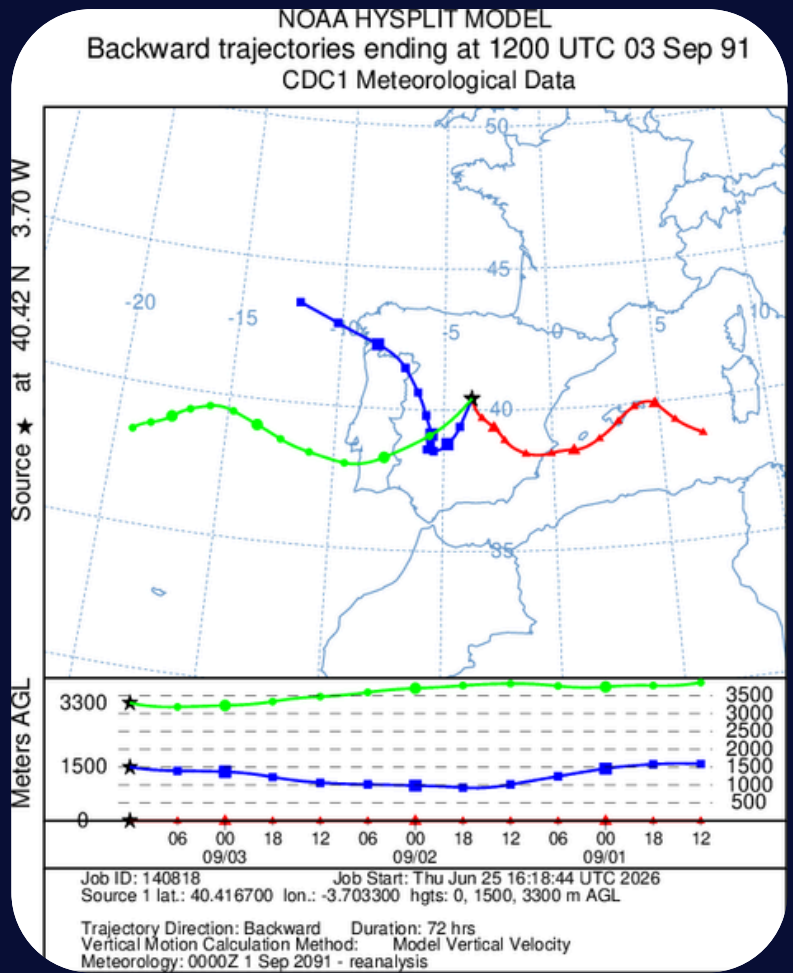
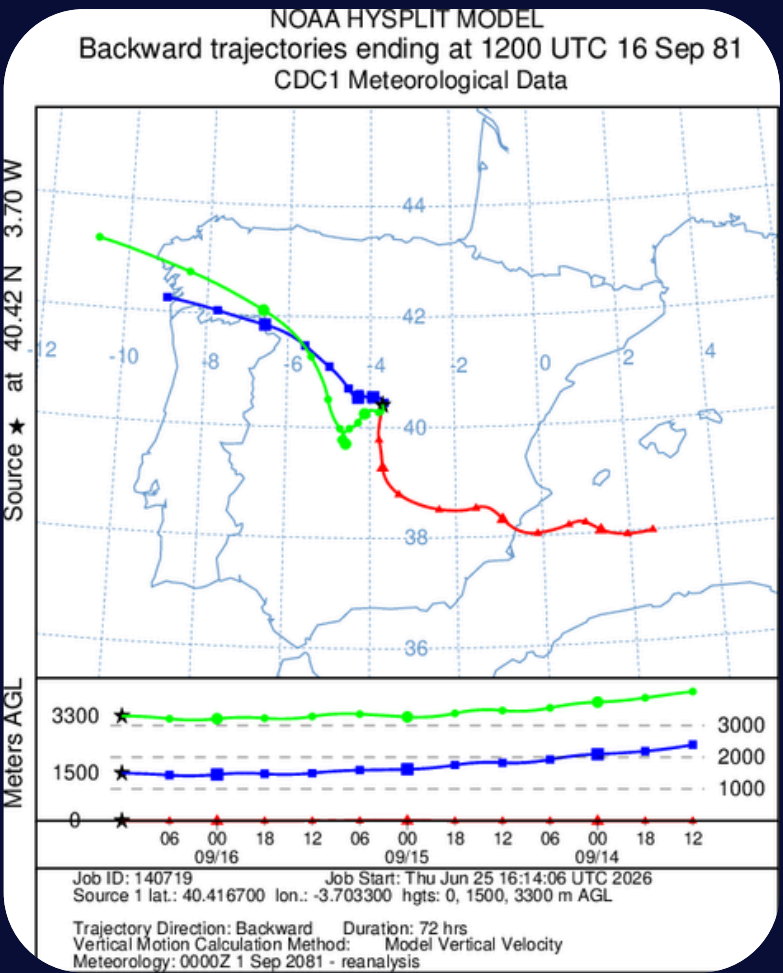


Figura 61: Retrotrayectorias HYSPLIT y mapas sinópticos para dos de los tres días con mayor peso de similitud diario durante el periodo de estudio para el TCWV3. Fuente: NOAA ARL READY/HYSPLIT y www.wetter3.de.

TCWV4: TOP 3 días con mayor peso diario

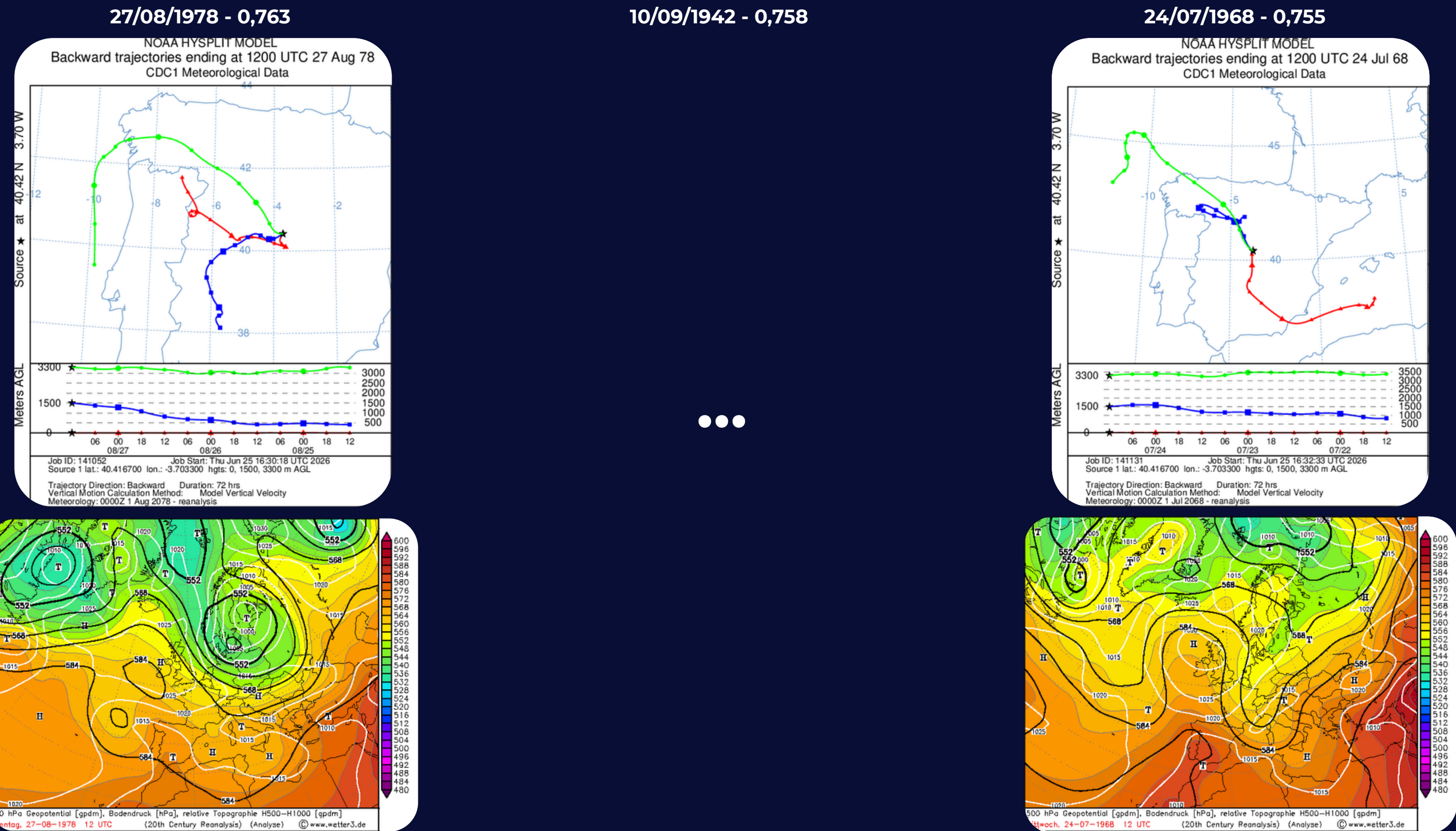


Componente	Día	UTC	Peso
TCWV4	27/08/1978	12:00	0,763
	10/09/1942		0,758
	24/07/1968		0,755

Selección de los días más representativos para el cálculo de retrotrayectorias *HYSPLIT*.

Tabla 8. Tres días con mayor peso diario para el cluster 4 del TCWV, usados para HYSPLIT. Fuente: Elaboración propia.

TCWV4: retrotrayectorias y mapas sinópticos



TCWV20: TOP 3 días con mayor peso diario



Componente	Día	UTC	Peso
TCWV20	14/08/2000	12:00	0,778
	15/08/2000		0,770
	01/08/1999		0,770

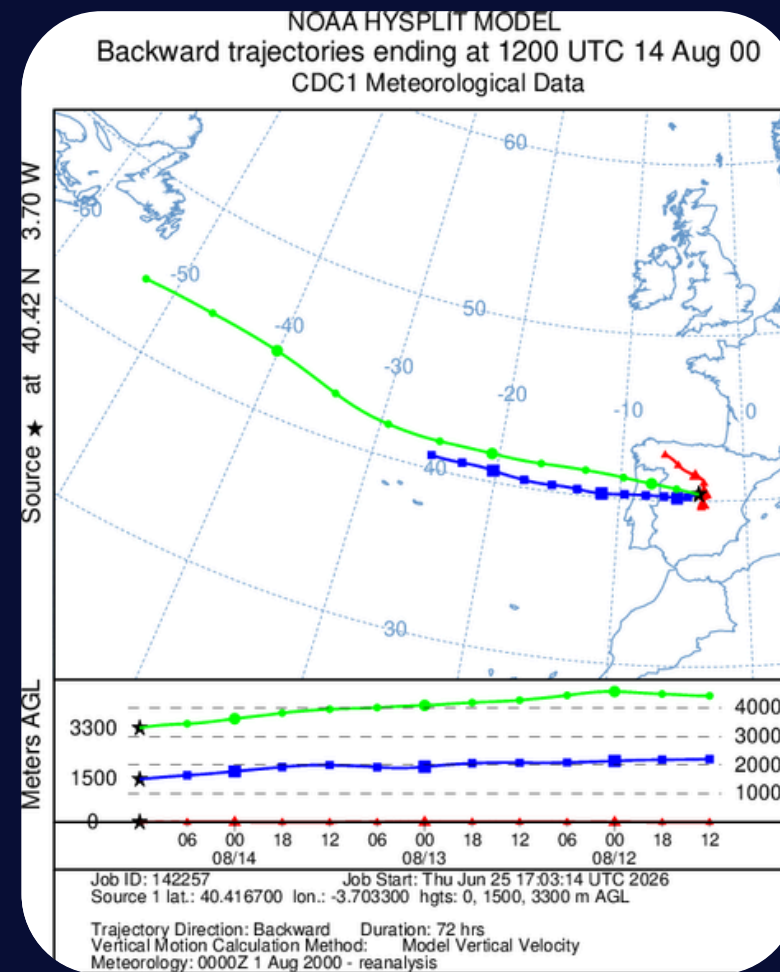
Selección de los días más representativos para el cálculo de retrotrayectorias *HYSPLIT*.

Tabla 9. Tres días con mayor peso diario para el cluster 20 del TCWV, usados para *HYSPLIT*. Fuente: Elaboración propia.

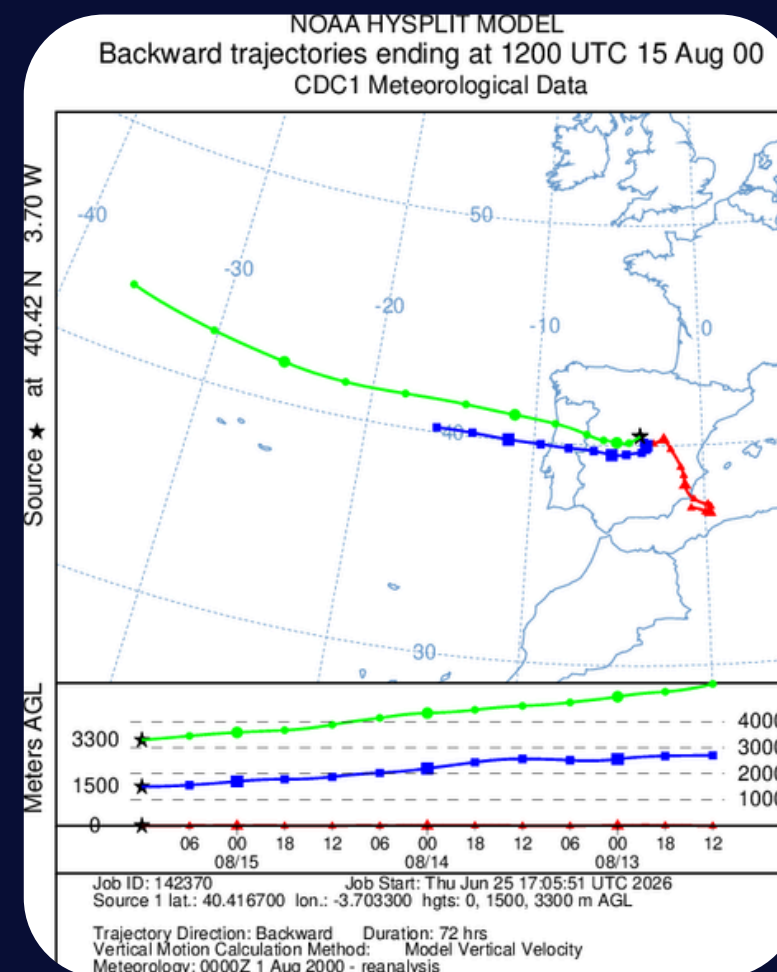
TCWV20: retrotrayectorias y mapas sinópticos



14/08/2000 - 0,778



15/08/2000 - 0,770



01/08/1999 - 0,770

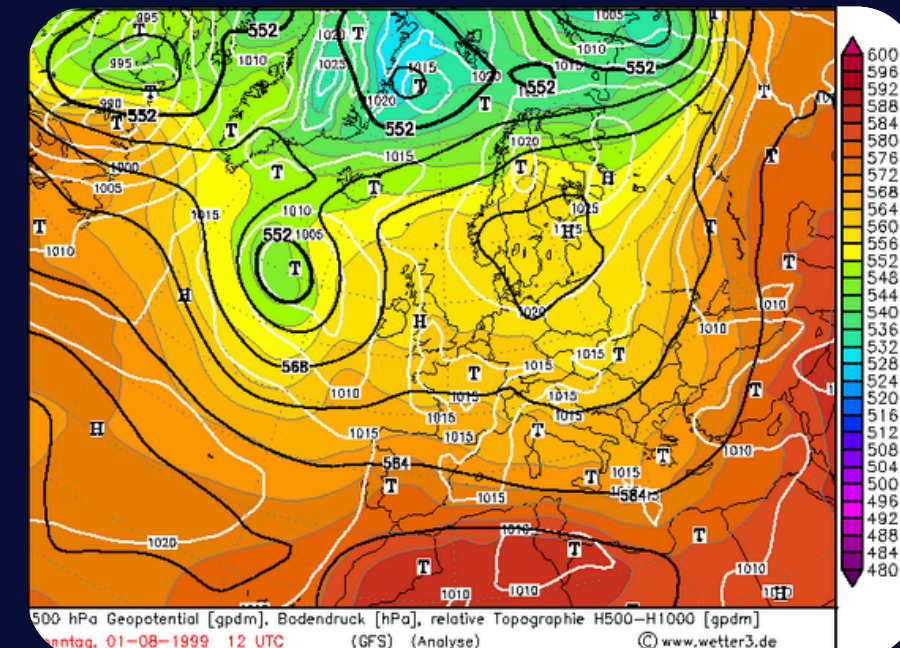
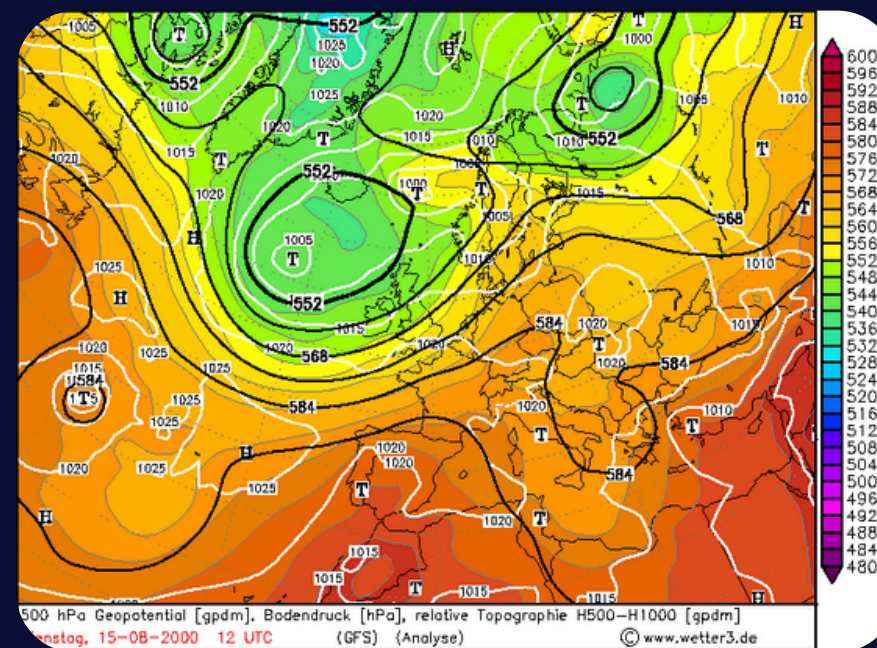
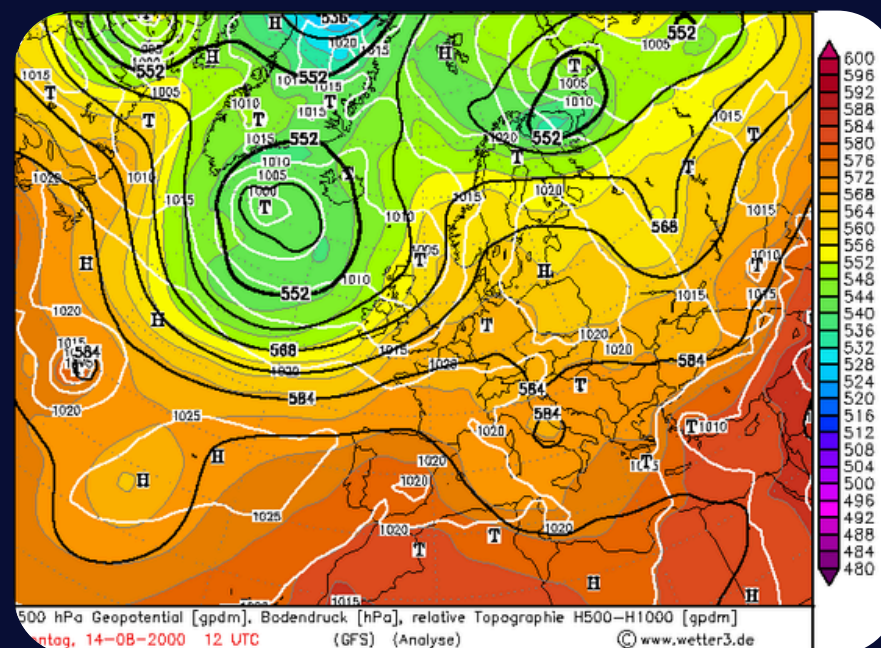
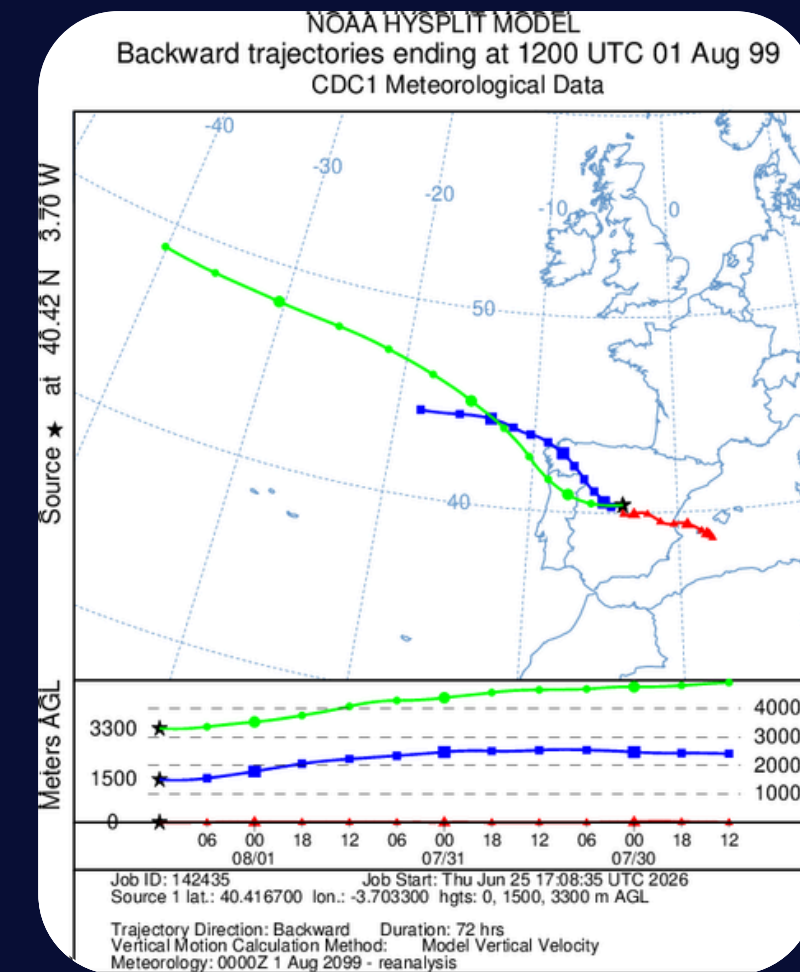


Figura 65: Retrotrayectorias HYSPLIT y mapas sinópticos para los tres días con mayor peso de similitud diario durante el periodo de estudio para el TCWV20. Fuente: NOAA ARL READY/HYSPLIT y www.wetter3.de.

TCWV23: TOP 3 días con mayor peso diario



Componente	Día	UTC	Peso
TCWV23	10/10/1983	12:00	0,752
	04/09/2001		0,751
	19/10/2013		0,749

Selección de los días más representativos para el cálculo de retrotrayectorias *HYSPLIT*.

Tabla 10. Tres días con mayor peso diario para el cluster 23 del TCWV, usados para HYSPLIT. Fuente: Elaboración propia.

TCWV23: retrotrayectorias y mapas sinópticos

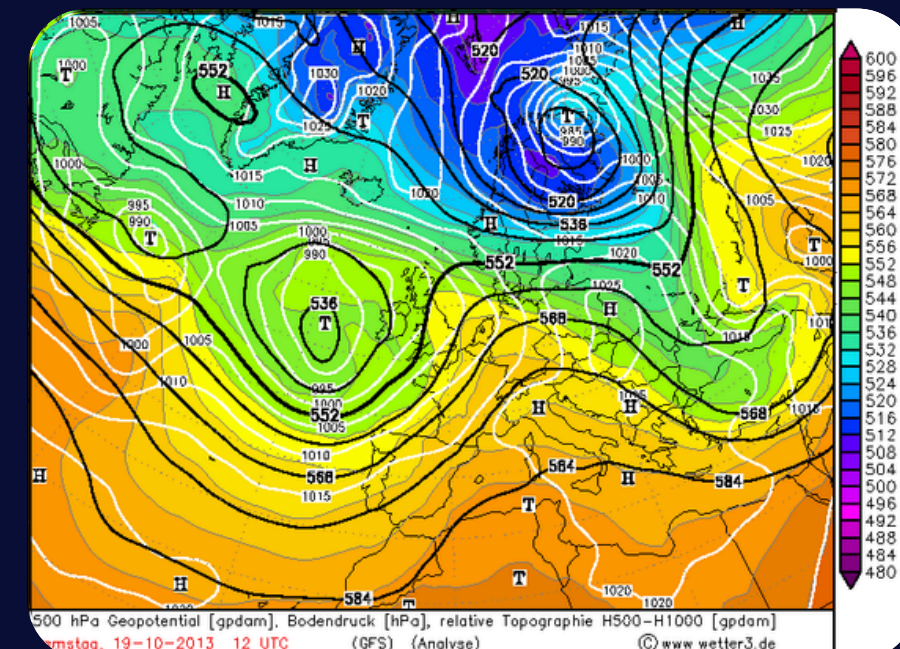
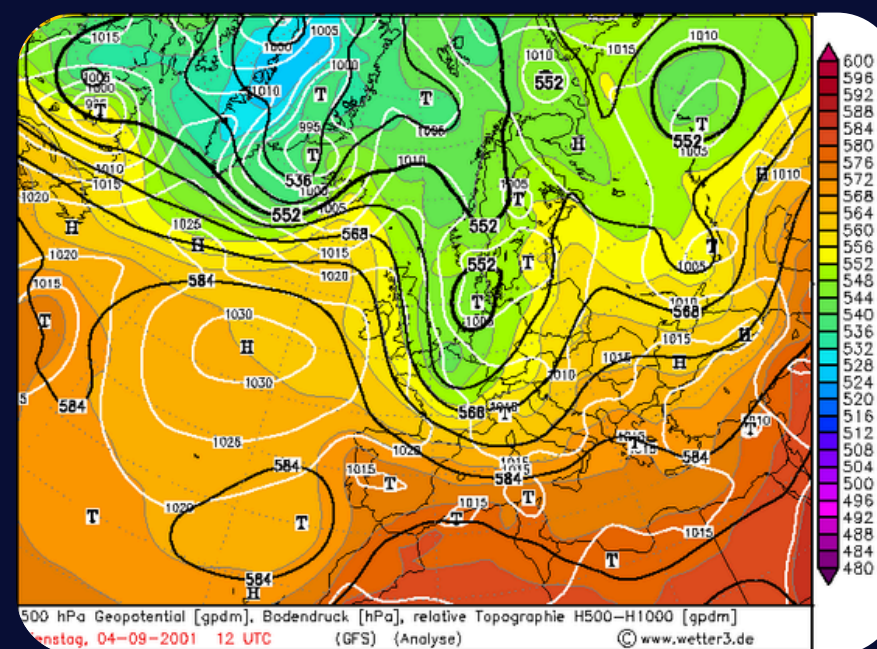
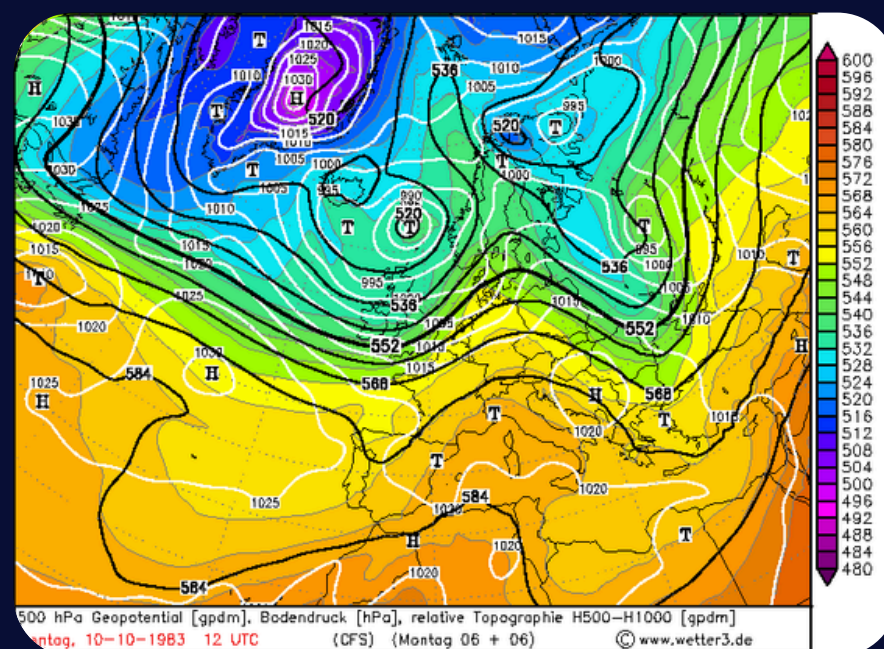
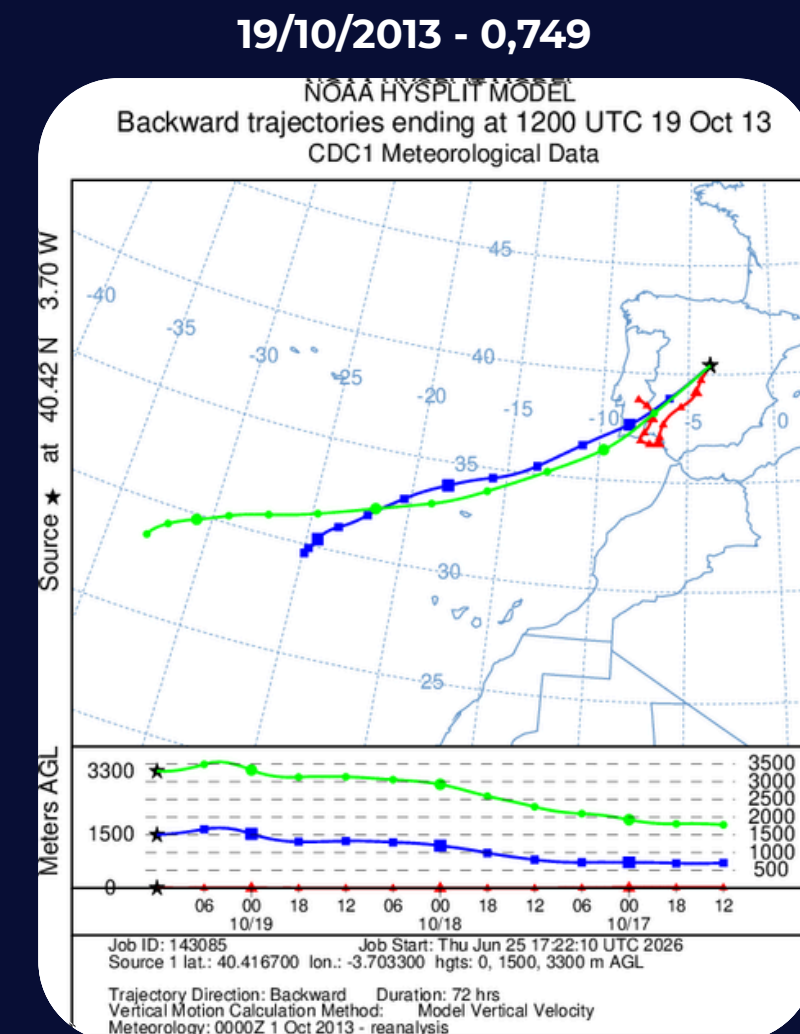
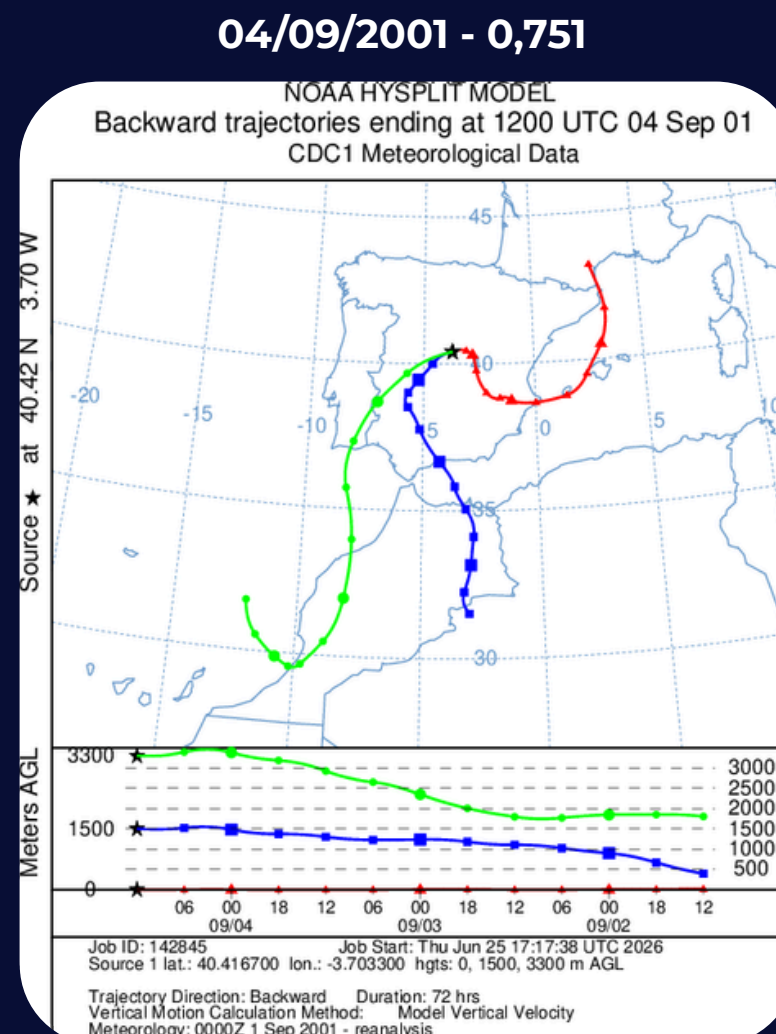
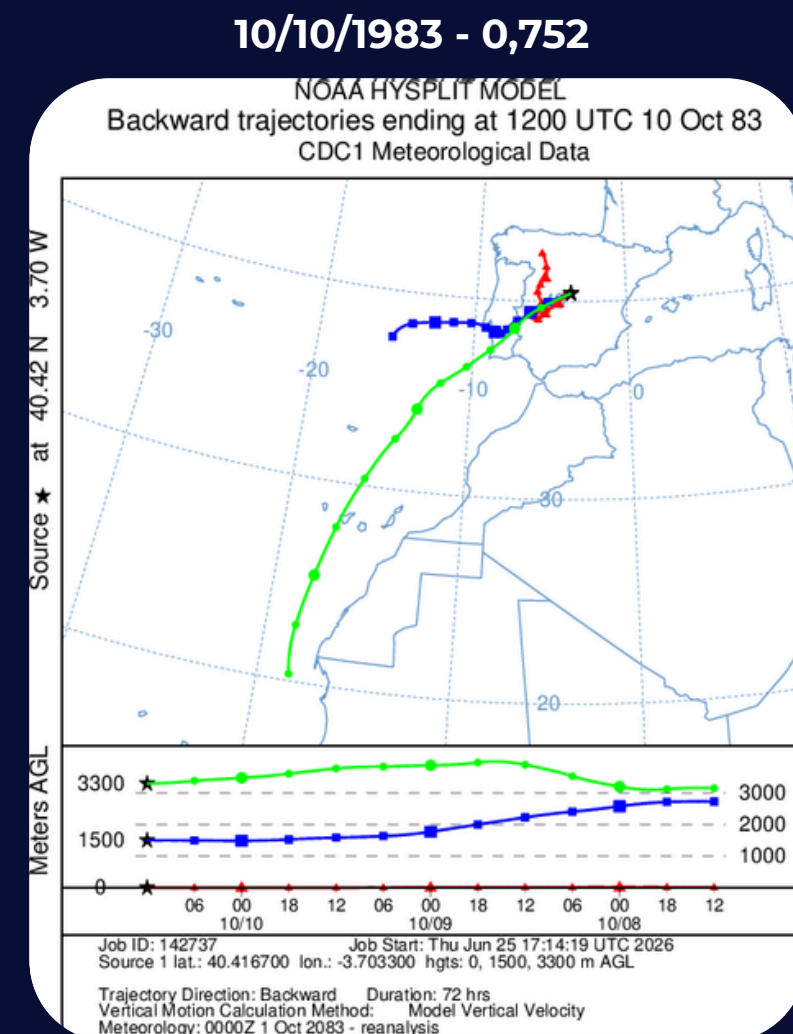


Figura 67: Retrotrayectorias HYSPLIT y mapas sinópticos para los tres días con mayor peso de similitud diario durante el periodo de estudio para el TCWV23. Fuente: NOAA ARL READY/HYSPLIT y www.wetter3.de.

Síntesis del apartado 4.6

Coherencia entre humedad y procedencia

El escenario moderado-seco presenta una procedencia principalmente continental o regional, mientras que los patrones más húmedos muestran influencias mediterráneas, atlánticas o subtropicales.

Humedad sin una única fuente

Los patrones más húmedos no siempre muestran una alimentación marítima profunda en toda la columna. Su humedad puede depender también del contexto cálido, de mares próximos y de aportes superficiales.

Conexión humedad-dinámica

La peligrosidad puede aumentar cuando las trayectorias conectan fuentes atlánticas, subtropicales o mediterráneas con zonas de convergencia y forzamiento dinámico favorable.

4.7 Discusión final de síntesis I

- Los resultados sugieren una reorganización dinámica: ganan escenarios de geopotenciales altos y pierden peso varias configuraciones onduladas o de vaguada (Cresswell-Clay et al., 2022; Gonzalo Alonso y Pérez González, 2025).
- La señal de Z500-Z700 apunta al ascenso de las superficies geopotenciales y a una mayor presencia de dorsales, coherente con el calentamiento troposférico (Santer et al., 2017; Hersbach et al., 2020).
- Esto no implica la desaparición de las DANAs, sino un cambio del contexto sinóptico en el que pueden aislarse, persistir e interactuar con el entorno mediterráneo.

4.7 Discusión final de síntesis II

El aumento del TCWV indica una atmósfera con más combustible termodinámico, especialmente en áreas marítimas y durante la estación cálida (Pastor et al., 2020; Agosta et al., 2026b).

La VIMD no muestra una organización uniforme de la convergencia: apunta a señales más locales y fragmentadas, donde brisas, relieve y bajas térmicas pueden ser decisivos (Azorin-Molina et al., 2015; Bedoya-Valestt et al., 2026).

La pérdida de peso de configuraciones sinópticas tradicionales apunta a una atmósfera más desorganizada a gran escala, donde la componente termodinámica gana protagonismo y los procesos locales pueden condicionar cada vez más la torrencialidad.

La peligrosidad mediterránea puede depender cada vez más de la coincidencia entre humedad elevada, dinámica favorable y convergencias locales, no solo de una DANA clásica bien definida (Llasat et al., 2021; Miró et al., 2022; Agosta et al., 2026b).

05

5. Conclusiones y Recomendaciones

Respuesta a hipótesis y líneas futuras

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

Conclusiones principales

C1

El enfoque ERA5 + *clustering* + tendencias + *HYSPLIT* permite integrar la dimensión dinámica, termodinámica y de procedencia de masas de aire en 1940-2025.

C3 

La H2 queda respaldada: aumenta el TCWV en gran parte del dominio y los *clusters* más húmedos muestran tendencia ascendente significativa.

C5 

La pérdida de peso de patrones sinópticos bien definidos sugiere una mayor desorganización de la circulación a gran escala, mientras la componente termodinámica y los procesos locales ganan protagonismo.

C2 

La H1 queda apoyada con matices: pierden peso varios patrones de vaguada o circulación ciclónica en Z500-Z700, mientras ganan dorsales y geopotenciales altos.

C4 

La H3 queda parcialmente respaldada: los patrones más húmedos presentan fuentes diversas, con aportes no solo mediterráneos y subtropicales, sino también atlánticos.

C6

El riesgo extremo debe interpretarse como interacción entre dinámica, humedad disponible, convergencia local y vulnerabilidad territorial, no solo como frecuencia de DANAs clásicas.

Recomendaciones

R1

Sería conveniente ampliar el análisis de retrotrayectorias *HYSPLIT* incorporando más puntos de llegada, especialmente en la fachada mediterránea y el suroeste peninsular.

R3

Incorporar otras variables meteorológicas como CAPE y CIN, más precipitación observada o reanalizada para conectar humedad disponible con tormentas organizadas.

R5

Adaptar vigilancia y gestión del riesgo a una atmósfera más cálida, húmeda y potencialmente más torrencial a escala local.

R2

Segmentar 1940-2025 en subperiodos para detectar fases internas, posibles aceleraciones recientes y cambios de régimen.

R4

Profundizar en brisas marinas, bajas térmicas, relieve, convergencias locales y disponibilidad de vapor de agua.

06

6. Bibliografía y Fuentes Documentales Consultadas

Listado completo de referencias del TFM

Defensa TFM · Gabriel Bernabé García

Bibliografía (1/5)

- Agosta, E. A., Corell, D., Miró, J. J., & Estrela, M. J. (2026a). From dynamic control to thermodynamic amplification: The structural redistribution of Iberian precipitation (1950–2024). *Atmospheric Research*, 338, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2026.108985>
- Agosta, E. A., Corell, D., Miró, J. J., & Estrela, M. J. (2026b). Asymmetric precipitation redistribution: The thermodynamic decoupling of extremes in Southwest Europe. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-026-01291-4>
- Agosta Scarel, E., Corell, D., Estrela, M. J., & Miró, J. (2025). A un año de la DANA de Valencia, ¿preludio de una nueva era climática? *Cuadernos de Geografía*, (114-115), 221-237. <https://doi.org/10.7203/CGUV.114-15.31889>
- Altava-Ortiz, V., Barnolas, M., Barrera-Escoda, A., et al. (2024, septiembre). Is Catalonia Facing a Megadrought Episode? Comunicación presentada en el EMS Annual Meeting 2024, Barcelona, España. EMS2024-783.
- Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., Baldi, M., Guijarro, J. A., & Jansà, A. (2015). High resolution HIRLAM simulations of the role of low-level sea-breeze convergence in initiating deep moist convection in the eastern Iberian Peninsula. *Boundary-Layer Meteorology*, 154, 81–100. <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9961-z>
- Bedoya-Valestt, S., Azorin-Molina, C., Plaza-Martin, N. P., Minola, L., Luis Gimeno, L., Andres-Martin, M., Vicente-Serrano, S. M., & Chen, D. (2026). Weaker and more frequent Mediterranean sea breezes in a warming climate. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-47025-4>
- Calvo-Sancho, C., Díaz-Fernández, J., González-Alemán, J. J., Halifa-Marín, A., Miglietta, M., Azorin-Molina, C., & Martín, M. L. (2026). Human-induced climate change amplification on storm dynamics in Valencia's 2024 catastrophic flash flood. *Nature Communications*, 17(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41467-026-68929-9>
- Campos, D. A., Grayson, K., Saurral, R. I., Beyer, S., John, A., Olmo, M., & Doblas-Reyes, F. (2025). The October 2024 Extreme Precipitation Event over Valencia: Storyline Attribution of the Synoptic-Scale Thermodynamic Drivers. *EGUsphere* [Preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-5929>
- Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM). (2023). Mediterranean Sea Surface Temperature Trend. Fundación CEAM.
- Copernicus Climate Change Service. (2024). ERA5 post-processed daily statistics on pressure levels from 1940 to present [Data set]. Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.50314f4c>
- Copernicus Climate Change Service. (2024). ERA5 post-processed daily statistics on single levels from 1940 to present [Data set]. Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.4991cf48>
- Coumou, D., Di Capua, G., Vavrus, S., Wang, L., & Wang, S. (2018). The influence of Arctic amplification on midlatitude summer circulation. *Nature Communications*, 9, 2959. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05256-8>

Bibliografía (2/5)

Cresswell-Clay, N., et al. (2022). Twentieth-century Azores High expansion unprecedented in the past 1,200 years. *Nature Geoscience*, 15, 548-553. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00971-w>

Fernández Monistrol, A. (2019). ¿Cómo evoluciona una DANA? *Revista digital del Consorcio de Compensación de Seguros*, (11).

Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 39(6). <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>

Gabriele, S., & Chiaravalloti, F. (2013). Searching regional rainfall homogeneity using atmospheric fields. *Advances in Water Resources*, 53, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.002>

Gil-Guirado, S., Pérez-Morales, A., Pino, D., Peña, J. C., & Martínez, F. L. (2022). Flood impact on the Spanish Mediterranean coast since 1960 based on the prevailing synoptic patterns. *Science of the Total Environment*, 807, 150777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150777>

Gonzalo Alonso, D., & Pérez González, M. E. (2025). Depresiones aisladas en niveles altos en la península ibérica durante el último siglo (1924-2023). *Cuadernos Geográficos*, 64(1), 259-285. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v64i1.32241>

Hersbach, H., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Hess, P., & Brezowsky, H. (1952). *Katalog der Großwetterlagen Europas*. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, 33. Bad Kissingen.

Insua-Costa, D., Senande-Rivera, M., Llasat, M. C., & Miguez-Macho, G. (2022). A global perspective on western Mediterranean precipitation extremes. *npj Climate and Atmospheric Science*, 5, 9. <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00234-w>

Jacobeit, J. (1993). Regionale Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationsgeschehen bei globalen Klimaveränderungen. *Erde*, 124, 63-77.

Jenkinson, A. F., & Collison, F. P. (1977). An initial climatology of gales over the North Sea (Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62). Meteorological Office.

Jézéquel, A., Faranda, D., Drobinski, P., & Lionello, P. (2025). Extreme Event Attribution in the Mediterranean. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.8799>

Bibliografía (3/5)

Kendall, M. G. (1962). Rank Correlation Methods. Hafner Publishing Company.

Lamb, H. (1972). British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861-1971 (Geophysical Memoirs, 116). HMSO.

Lecha Estela, L. B. (2024). La circulación atmosférica y el riesgo climático. Revista Cubana de Meteorología, 30(4).

Llasat, M. C., del Moral, A., Cortès, M., & Rigo, T. (2021). Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region. Atmospheric Research, 257, 105581. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105581>

Lorente-Plazas, R., et al. (2020). Unusual atmospheric-river-like structures coming from Africa induce extreme precipitation over the Western Mediterranean Sea. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(10). <https://doi.org/10.1029/2019JD031280>

MacQueen, J. B. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. En L. M. Le Cam & J. Neyman (Eds.), Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability (Vol. 1, pp. 281–297). University of California Press.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>

Martín León, F. (2003). Las gotas frías / DANAs. Ideas y conceptos básicos (Nota Técnica STAP n.º 38). Instituto Nacional de Meteorología.

Martín Vide, J. (1984). Interpretación de los mapas del tiempo. Anthropos.

Millán, M. M., Estrela, M. J., & Miró, J. J. (2005). Rainfall components: Variability and spatial distribution in a Mediterranean area (Valencia Region). Journal of Climate, 18(14), 2682–2705. <https://doi.org/10.1175/JCLI3426.1>

Miró, J. J., Lemus-Canovas, M., Serrano-Notivoli, R., Olcina Cantos, J., Estrela, M. J., Martín-Vide, J., & Meseguer-Ruiz, O. (2022). A component-based approximation for trend detection of intense rainfall in the Spanish Mediterranean coast. Weather and Climate Extremes, 38, 100513. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100513>

Bibliografía (4/5)

Miró, J. J., Estrela, M. J., Agosta Scarel, E., & Corell, D. (2025). Cambio climático y potencialidad pluviométrica en el contexto de las lluvias torrenciales de octubre de 2024 en València. Cuadernos de Geografía, (114-115), 191-220. <https://doi.org/10.7203/CGUV.114-15.31909>

Muñoz, C., Schultz, D. M., & Vaughan, G. (2020). A midlatitude climatology and interannual variability of 200- and 500-hPa cut-off lows. Journal of Climate, 33(6), 2201-2222. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0497.1>

Nieto, R., Gimeno, L., de la Torre, L., Ribera, P., Gallego, D., García-Herrera, R., & Lorente, J. (2005). Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. Journal of Climate, 18(16), 3085-3103. <https://doi.org/10.1175/JCLI3386.1>

Núñez Mora, J. A. (2019). Análisis meteorológico y climático del temporal de precipitaciones torrenciales de septiembre de 2019 en la Comunidad Valenciana. AEMET.

Olcina Cantos, J. (1994). Riesgos climáticos en la Península Ibérica. Acción Divulgativa.

Olcina Cantos, J. (2021). Cambio climático y riesgos en el ámbito mediterráneo. La necesidad de adaptación. Territorium, (28), 7-23.

Olcina Cantos, J., Martí Talavera, J., & Sánchez Almodóvar, E. (2024). Evolución reciente de precipitación y temperatura en la región mediterránea de la Península Ibérica: revisando la señal del calentamiento global a escala regional. Cuadernos Geográficos, 63(2), 51-73. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v63i2.28374>

Olcina Cantos, J., & Morote, Á. F. (2025). Comunicación y educación sobre cambio climático y extremos atmosféricos: el papel de la ciencia en la DANA de 2024 (Valencia, España). Documents d'Anàlisi Geogràfica, 71(3), 501-533. <https://doi.org/10.5565/rev/dag.1424>

Pastor, F., Valiente, J. A., & Khodayar, S. (2020). A Warming Mediterranean: 38 Years of Increasing Sea Surface Temperature. Remote Sensing, 12(17), 2687. <https://doi.org/10.3390/rs12172687>

Preece, J. R., et al. (2023). Summer atmospheric circulation over Greenland in response to Arctic amplification and diminished spring snow cover. Nature Communications, 14(1), 3759. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39466-6>

Preisendorfer, R. (1988). Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography (Developments in Atmospheric Science, Vol. 17). Elsevier.

Bibliografía (5/5)

Rantanen, M., et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00558-8>

Richman, M. B. (1986). Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, 6, 293-335.

Rivera, A. (2025). Danas. Letrame.

Rodrigo-Comino, J., et al. (2020). Impacts of Weather Types on Soil Erosion Rates in Vineyards at 'Celler Del Roure' Experimental Research in Eastern Spain. *Atmosphere*, 11(6), 551. <https://doi.org/10.3390/atmos11060551>

Santer, B. D., Solomon, S., Pallotta, G., Mears, C., Po-Chedley, S., Fu, Q., Wentz, F., Zou, C.-Z., Painter, J., Cvijanovic, I., & Bonfils, C. (2017). Comparing Tropospheric Warming in Climate Models and Satellite Data. *Journal of Climate*, 30(1), 373–392. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0333.1>

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>

Steiner, A. K., et al. (2020). Observed temperature changes in the troposphere and stratosphere from 1979 to 2018. *Journal of Climate*, 33(19), 8165-8194. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0998.1>

Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., & Woollings, T. (2021). The jet stream and climate change. En T. M. Letcher (Ed.), *Climate Change* (3.^a ed., pp. 327-357). Elsevier.

Tamayo, J., & Núñez, J. Á. (2020). Precipitaciones intensas en la Comunidad Valenciana: análisis, sistemas de predicción y perspectivas ante el cambio climático. En I. López-Ortiz & J. Melgarejo (Eds.), *Riesgo de inundación en España* (pp. 49-62). Universidad de Alicante.

Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205–1218. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>



¡Gracias!

Quedo a disposición del tribunal
Preguntas y comentarios

